СПРАВОЧНИК
ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

624(03)

СПРАВОЧНИК ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

Издание второе, переработанное и дополненное

1042

Под общей редакцией
М. В. Чуринова



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА» · МОСКВА 1974

УДК 624.131.1

Справочник по инженерной геологии. Изд. 2, перераб. и доп. Под общ. ред. М. В. Чуринова. М., «Недра», 1974. 408 с. с ил.

Основным содержанием справочника являются теоретически обоснованные и подтвержденные практикой инженерно-геологические сведения и положения, знание которых необходимо при проведении инженерно-геологических исследований.

Справочник включает также необходимый минимум сведений из сопредельных дисциплин, широко используемых при инженерно-геологических работах. В нем уделено большое внимание освещению новых перспективных методов в инженерной геологии.

Справочник предназначается для инженеров-геологов. Он будет полезен при выполнении инженерно-геологических исследований и при интерпретации их результатов.

Таблиц 128, иллюстраций 103, список литературы 127 назв.

С $\frac{20806-184}{043(01)-74}$ 16—73

© Издательство «Недра», 1974

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии с решениями XXIV съезда КПСС в нашей стране в текущей пятилетке намечается широкое развитие разнообразного строительства. В связи с этим потребуется проведение в значительных объемах инженерно-геологических исследований, осуществляемых в сжатые сроки, с максимальным экономическим эффектом на основе использования новейшей техники и передовой методики. Для успешного выполнения этих задач исследователь должен быть знаком со всеми современными достижениями в области инженерной геологии, обобщающими опыт различных производственных и научно-исследовательских организаций.

Вследствие высоких темпов развития инженерной геологии, широкого разветвления ее научных направлений и большого разнообразия объектов изучения работникам производства трудно следить за всеми новейшими достижениями в этой области.

Справочник по инженерной геологии, составленный и изданный в 1968 г. коллективом специалистов, по уровню изложенного в нем материала нуждается в дополнениях и изменениях. По замыслу авторов, настоящий справочник должен удовлетворять запросам практики и предоставить в распоряжение геологов, изыскателей и проектировщиков в сконцентрированном виде необходимый материал, отражающий последние достижения науки. Справочник призван облегчить методически правильное решение задач инженерно-геологических исследований с минимальными затратами средств и времени.

В настоящей работе много места уделяется новым методам инженерной геологии, еще не получившим широкого применения, но несомненно являющимся перспективными. Справочник состоит из двух частей — справочной, где материал изложен в традиционной форме справочника, и справочно-методической, в которой материал излагается в описательно-методическом плане.

Инженерная геология, как и другие науки, в настоящее время развивается по многим направлениям, поэтому составление справочника оказалось весьма сложным. Авторы и редактор не исключают возможности допущения некоторых ошибок и неточностей, за указание на которые они будут весьма признательны.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. И. В. Попову, взявшему на себя труд вторично просмотреть эту работу и давшему ценные указания по ее содержанию. Главный редактор выражает благодарность В. П. Лазаревой за помощь, оказанную при подготовке справочника к изданию.

Все замечания и пожелания по улучшению книги просим высылать в адрес ВСЕГИНГЕО:

Москва, Ж-17, Б. Ордынка, 32, главному редактору справочника по инженерной геологии проф. М. В. Чуринову.

Глава первая

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И СВЕДЕНИЯ ИЗ СОПРЕДЕЛЬНЫХ НАУК, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

I. ГЕОЛОГИЯ

1. **Геохронологические схемы.** При инженерно-геологическом картировании анализируются геологическое строение и состав пород в соответствии с геохронологическими схемами. Схемы показывают распространение различных по возрасту осадочных, вулканических и метаморфических образований с учетом времени их формирования (табл. 1—5).

Таблица 1

Геохронологическая шкала по данным определений абсолютного возраста, произведенных в СССР

Эра	Период, эпоха	Время (в млн. лет) границ периодов, эпох и т. д.
Кайнозой	Третичный *	
	Неоген { плиоцен	10
	Неоген { миоцен	25
	Палеоген { олигоцен	40
	Палеоген { эоцен	—
	Палеоген { палеоцен	70
Мезозой	Мел { верхний	100
	Мел { нижний	140
	Юра	185
	Триас	225
Палеозой	Пермь	270
	Карбон	320
	Девон	400
	Силур (готландий)	420
	Ордовик	480
	Кембрий	570

* Продолжительность четвертичного периода исчисляется в 1 млн. лет.

Продолжение табл. 1

Эра	Период, эпоха	Время (в млн. лет) границ периодов, эпох и т. д.
Докембрий IV	Рифей, синий, поздний докембрий, протерозой II	1100—1200
Докембрий III	Протерозой, протерозой I	1800—1900
Докембрий II	Архей	2600—2700
Докембрий I	Катархей	3400—3500

Таблица 2

Разрезы неогена юга Русской платформы
(по Д. В. Наливкину, 1962)

Отдел			Ярус	Южная Украина	Северное Приазовье	Апшеронский полуостров
N_2	Плиоцен	Верхний	Апшеронский Акчагыльский	Пресноводные отложения Таманские слои	Континентальные отложения	Апшерон Акчагыл
		Средний	Куяльницкий Киммерийский	Куяльницкие слои Морские отложения	Континентальные отложения	Континентальная продуктивная толща
		Нижний	Понтический	Континентальные отложения Нижний понт, морской		Морские отложения
N_1	Миоцен	Верхний	Мэотический Сарматский Конкский	Мэотис Сармат Конкские слои		Диатомовые слои
		Средний	Караганский Чокракский Тарханский	Караганские слои Чокракские слои Томаковские слои	?	
		Нижний	Сакаракульский	Нижний миоцен, морской	?	Верхний майкоп

Таблица 3

Геохронологическая характеристика четвертичного (антропогенового) периода по данным различных авторов

Отдел	Эпохи оледенений и межледниковья			Продолжительность, тыс. лет (по Р. Флинту)
	Альпы (по А. Пенку)	Европейская часть СССР (по И. П. Герасимову и К. К. Маркову)	Север Азиатской части СССР (по В. Н. Саксу и др.)	
Современный Q_{IV}	Послеледниковое время	Послеледниковое время	Послеледниковое время	6,5
Новый (верхний) Q_{III}	Вюрмское оледенение	Валдайское оледенение	Сартанское оледенение или стадия	15
			Зырянское оледенение	100
	Рисс-вюрмское межледниковье	Последнее межледниковье	Межледниковье (гданьское)	225
Средний Q_{II}	Рисское оледенение	Московская стадия	Тазовская стадия	325
		Одинцовский интерстадиал	Максимальное (самаровское) оледенение	
		Днепровское оледенение		
	Миндель-рисское межледниковье	Предпоследнее межледниковье	Межледниковье	600
Древний (нижний) Q_I	Миндельское оледенение Гюнц-миндельское межледниковье	Лихвинское оледенение	Ярское оледенение	700
Верхний плиоцен N_2	Гюнцское оледенение Дунайское оледенение (одно или несколько)	Ашперон Акчагыл	?	1000

Таблица 4

Стратиграфическая схема морских четвертичных отложений Каспийского бассейна
(по П. В. Федорову, 1953)

Отдел	Ярус	Горизонт, свита, слои
Современный (голоцен)	Новокаспийский Q_{IV}	Современные и новокаспийские слои

Продолжение табл. 4

Отдел	Ярус	Горизонт, свита, слои	
Новый (верхний) плейстоцен	Хвалынский Q_{III}	Верхнехвалынский горизонт Нижнехвалынский горизонт	
Средний плейстоцен	Хазарский Q_{II}	Верхнехазарский горизонт	
		Нижнехазарский горизонт	Гюргянская свита Урунджикский подгоризонт
Древний (нижний) плейстоцен	Бакинский Q_{I}	Верхнебакинский горизонт Нижнебакинский горизонт	

Таблица 5

Унифицированная схема четвертичных отложений Европейской части СССР, принятая на Межведомственном совещании 15—18 апреля 1963 г.

Система	Отдел	Основные подразделения	Надгоризонты и горизонты	
Четвертичная (антропогеновая)	Нижний (начало отдела)	Современные отложения IV	Современный	
		Верхнечетвертичные отложения III	Валдайский надгоризонт	Осташковский * (Балтийский) Молого-Шекснинский (Уласский) Калининский (Нарочанский) Микулинский
		Среднечетвертичные отложения II	Среднерусский надгоризонт	Московский Одинцовский Днепровский Лихвинский
		Нижнечетвертичные отложения I	Белорусский надгоризонт ** (?)	Окский Беловежский (?) Наревский (?)
				Вильнюсский (?)

* В скобках дается второй вариант названий для горизонтов, входящих в состав валдайского надгоризонта.

** Нижнечетвертичные подразделения, выделяемые условно.

На Русской платформе выделены синийские отложения, платформенные и геосинклинальные, не вошедшие в общую геохронологическую таблицу.

Платформенные образования синия развиты в центральной части Русской платформы, в Ленинградской области, в Прибалтике, в Московской и соседних с ней областях, в Белоруссии, на Подолии и по северной окраине Украинского массива, где они лежат на иотнии (овручских песчаниках).

Геосинклинальные отложения синия собраны в складки, метаморфизованы и достигают громадной мощности (несколько тысяч метров). Они развиты по северной и восточной окраинам Русской платформы. С 1962 г. Д. В. Наливкин относит синийский комплекс к верхнему протерозою.

Существуют местные геохронологические подразделения молодых отложений.

2. **Горные породы.** Земную кору слагают горные породы, разнообразные по происхождению и составу, обычно они состоят из скопления зерен нескольких минералов, реже — одного минерала.

Горные породы делятся на три группы: магматические, метаморфические и осадочные.

Магматические, или изверженные, породы. Магматические горные породы образуются в результате застывания и кристаллизации магмы при внедрении ее в земную кору или при излиянии на поверхность в процессе извержения вулканов. Свойства магматических горных пород зависят от положения остывающих магматических тел по отношению к поверхности земли, от условий температуры и давления, от состава магмы, скорости ее застывания и т. д.

При классификации магматических пород важнейшим признаком является их химический и минеральный состав.

Метаморфические породы. Метаморфические горные породы образуются из магматических и осадочных путем их глубоких изменений и преобразования под влиянием высокой температуры, давления и химически активных веществ. Различают несколько видов метаморфизма (табл. 6, 7).

Таблица 6

Основные признаки, используемые при определении метаморфических горных пород

Текстура	Порода	Минеральный состав	Строение и внешний вид
Сланцеватая	Гнейсы	Полевые шпаты, кварц, слюда, роговая обманка	Плотные светлые Полосы светлого полевого шпата чередуются с темными полосами слюды или реже роговой обманки. Минералы различимы
	Слюдяные сланцы	Слюда, кварц	Тонкосланцеватые, кварц часто неразличим
	Филлиты (древние глинисто-слюдяные сланцы)	Слюда, кварц и другие минералы	Тонкосланцеватые, минералы на глаз почти неразличимы
	Хлоритовые сланцы	Хлорит	Чешуйчатая или листовая масса зеленого цвета
	Тальковые сланцы	Тальк	Чешуйчатая масса талька. Чертится ногтем
	Роговообманковые сланцы	Роговая обманка, кварц	Сланцеватость часто выражена неясно

Продолжение табл. 6

Текстура	Порода	Минеральный состав	Строение и внешний вид
Массивная	Змеевики	Змеевик, магнетит	Плотная зеленая масса с пятнами белого, зеленого, желтого, красного цвета. Гладкие зеркально-эмалевые поверхности
	Мраморы	Кальцит, реже доломит	Плотные кристаллические породы белые, желтые, оранжевые, красные и других светлых цветов. Вскипают с соляной кислотой
	Кварциты	Кварц	Плотные, мелкозернистые, сливные, в изломе блестящие

Таблица 7

Главнейшие породообразующие минералы метаморфических горных пород (по П. Н. Панюкову)

Минерал	Химический состав	Распространенность
Андалузит	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	В гнейсах, сланцах, амфиболитах, иногда в контактово-метаморфических породах
Силлиманит	Полиморфная разновидность андалузита	То же
Ставролит	$Fe[OH]_2 \cdot Al_2SiO_5$	В кристаллических сланцах и контактово-метаморфических породах
Хлорит	Водный железо-магнезитовый силикат	Основной минерал хлоритовых сланцев
Тальк	$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$	Основной минерал тальковых и тальково-хлоритовых сланцев
Гранаты (альмандин, гроссуляр, уваровит и др.)	$3\ RO \cdot R_2O_3 \cdot 3SiO_2$, $RO \cdot CaO$, MgO, FeO, MnO, R_2O_3—Al_2O_3; Fe_2O_3; Cr_2O_3	Характерные минералы скарнов и эклогитов обычны для кристаллических сланцев и гнейсов
Кианит	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Характерный минерал кристаллических сланцев

Контактный метаморфизм наблюдается на контакте внедрившейся магмы с вмещающими горными породами, изменение которых происходит под влиянием теплового воздействия высокотемпературного (свыше 1000°) расплава магмы и горячих источников (гидротермальный метаморфизм).

Региональный метаморфизм проявляется на огромных площадях в подвижных зонах земной коры (геосинклиналях) под влиянием высокой температуры и большого давления.

Динамометаморфизм, или дислокационный метаморфизм, обусловливается односторонним давлением, которое испытывают породы под влиянием тектонических движений.

Осадочные породы обладают рядом характерных признаков: они слоисты, обычно пористы, в них содержатся ископаемые остатки животных и растений. В соответствии с генетическими особенностями осадочные породы подразделяются на три группы: на породы обломочного, химического и органогенного происхождения. Ниже приводятся классификации обломочных, глинистых и карбонатных пород, наиболее часто используемые в инженерной геологии.

Породы обломочного происхождения состоят из продуктов механического разрушения пород. По величине и форме слагающих частиц, а также по степени цементации они подразделяются на грубообломочные — псефиты; песчаные — псаммиты; алевритовые — алевриты и глинистые — пелиты (табл. 8—12).

Таблица 8

Классификация крупнообломочных пород (10—100 мм), сложенных неокатанными частицами, по степени их сцементированности

(по А. В. Хабакову)

Класс породы	Связность	Признаки, определяющие степень связности	Порода
0	Рыхлые (сыпучие)	Несцементированные, легко крошатся руками	Щебень
1	Слабо сцементированные	Распадаются на первичные обломки при легком ударе молотком	Щебневая порода
2	Сцементированные	Распадаются на куски и дробятся лишь при ударе молотком	Брекчия
3	Крепко сцементированные	При ударе молотком не распадаются или распадаются с трудом	Плотная брекчия
4	Скальные	С трудом разбиваются молотком	Скальная брекчия

Таблица 9

Классификация мелкообломочных пород, песчаных и алевритовых по составу слагающего их обломочного материала

(по А. В. Хабакову)

Класс породы	Связность	Признаки, определяющие степень связности	Порода
0	Рыхлые (сыпучие)	Несцементированные, неустойчивые (легко обрушиваются), крошатся, разрыхляются пальцами	Песок, алеврит
1	Слабо сцементированные	Легко раздавливаются и рассыпаются при легком ударе молотком	Песчаники и алевролиты, слабо сцементированные лёссы
2	Сцементированные	Разламываются и дробятся лишь под ударами молотка в ступе	Песчаники и алевролиты

Продолжение табл. 9

Класс породы	Связность	Признаки, определяющие степень связности	Порода
3	Крепко сцементированные	Разбиваются молотком с некоторым усилием, раскалываются легче по слоистости, огибая включения	Песчаники, алевролиты
4	Скальные	Разбиваются молотком с трудом	Сливные кварцитовидные песчаники

Таблица 10

Мелкообломочные песчаные породы
(по А. В. Хабакову)

Порода	Содержание фракций %		
	1—0,1 мм	0,1—0,01 мм	<0,01 мм
Песок	95—100	0—5	0—5
Алевритистый песок	75—95	5—25	0—5
Пелитисто-алевритистый песок	70—90	5—25	5—25
Пелитистый или глинистый песок	75—95	0—5	5—25
Алевритовый песок	50—75	25—50	0—5
Пелитисто-алевритистый песок	50—75	25—45	5—25
Пелитовый или сильноглинистый песок	50—75	0—5	25—50
Алеврит	95—100	0—5	0—5
Песчаный алеврит	75—95	5—25	0—5
Пелитисто-песчанистый алеврит	70—90	5—25	5—25
Пелитистый алеврит	75—95	0—5	5—25
Песчаный алеврит	50—70	25—50	0—5
Пелитисто-песчаный алеврит	50—70	25—45	5—25
Пелитовый или сильноглинистый алеврит	50—70	0—5	25—50

Таблица 11

Классификация глинистых пород (в зависимости от содержания слагающих глину частиц разного размера определяются ее гранулометрические структурные типы)

Глины	Содержание частиц, %			
	<0,001 мм (мелкий пелит)	0,001—0,01 мм (крупный пелит)	0,01—0,1 мм алеврит	>0,1 мм песок
Тонкодисперсная (тонкопелитовая)	50 и более	Меньше 50	До 50	—
Крупнодисперсная (крупнопелитовая)	Меньше 50 До 25	Больше 50	До 50	—
Алевритистая	Не менее	70	Больше 5 и меньше 25	До 5
Алевритовая		50	25—50	До 5
Песчанистая		70	До 5	5—25
Песчаная		50	До 5	25—50

Таблица 12

Классификация обломочных и глинистых пород по размерам обломков
(по Г. И. Ершовой)

Размер обломков, мм	Характер обломков	Группа пород	Рыхлые породы		Сцементированные породы	
			сложенные окатанными обломками	сложенные угловатыми обломками	сложенные окатанными обломками	сложенные угловатыми обломками
>100	Глыбы				Глыбовые брекчии	
1000–500 500–250 250–100	Валуны Отломы	Крупнообломочные (псефиты)	Валунник крупный средний мелкий	Отломник крупный средний мелкий	Валунные конгломераты крупновалунные средневалунные мелковалунные	Брекчии крупноотломные среднеотломные мелкоотломные
100–50 50–25 25–10	Галька Щебень		Галечник крупный средний мелкий	Щебень крупный средний мелкий	Конгломераты крупногалечные среднегалечные мелкогалечные	Брекчии крупнощебневые среднещебневые мелкощебневые
10–5 5–2,5 2,5–1	Гравий Дресва		Гравий крупный средний мелкий	Дресва крупная средняя мелкая	Гравелиты крупногравийные среднегравийные мелкогравийные	Дресвяники крупнодресвяные среднедресвяные мелкодресвяные
1–0,5 0,5–0,25 0,25–0,1	Песок	Мелкообломочные Пески (псаммиты)	Песок крупный средний мелкий		Песчаники крупнозернистые среднезернистые мелкозернистые	
0,1–0,05 0,05–0,01	Алеврит	Алевриты	Алевриты крупные мелкие		Алевролиты крупноалевролитовые мелкоалевролитовые	
0,01–0,001 <0,001	Пелит	Глинистые породы	Глины крупнопелитовые (крупнодисперсные), тонкопелитовые (тонкодисперсные)		Уплотненные глины, аргиллиты	

Глинистые породы сложены частицами менее 0,01 мм и содержат около 30% тончайших частиц (менее 0,001 мм).

Особенности изучения карбонатных пород. Карбонатные осадочные горные породы — известняки и доломиты — подразделяются по вещественному составу, способу образования и структуре. Известняки (доломиты) содержат нередко примеси глинистого, сульфатного, кремнистого, реже обломочного материала, образуя смешанные породы (табл. 13—16).

3. **Геологическая формация** является одним из важнейших положений в геологии, объединяющим целый ряд более частных понятий об определенном комплексе отложений, определенной структурной (геотектонической) зоне,

Таблица 13

Классификация известняков (доломитов), содержащих примесь кремнистого вещества

Порода	Содержание известково-доломитового компонента, %	Порода	Содержание, %	
			$CaCO_3$	кремнезема хемогенного или органогенного
По С. Г. Вишнякову (1957)		По Г. И. Теодоровичу (1958)		
Кремень (силиколит)	0—5	Известняк (доломит)	100—95	0—5
Кремень известковистый (доломитистый) . . .	5—25	Кремнистый известняк (доломит)	95—50	5—50
Кремень известковый (доломитовый)	25—50	Известковистый (доломитистый) силицит . . .	50—5	50—95
Известняк (доломит) кремневый	50—75	Силицит	0—5	100—95
Известняк(доломит)кремнистый	75—95			
Известняк (доломит) . .	95—100			

Таблица 14

Классификация основных разновидностей известково-доломитовых пород в смеси с гипсом, магнезитом и сидеритом

(по С. Г. Вишнякову)

Содержание известково-доломитового компонента, %	Гипсово-карбонатные породы	Магнезиально-доломитовые (известковые) породы	Сидерито-известковые (доломитовые) породы
0—5	Гипс	Магнезит	Сидерит
5—25	Гипс доломитистый (известковистый)	Магнезит доломитистый (известковистый)	Сидерит известковый
25—50	То же	То же	То же
50—75	Доломит (известняк) гипсовый	Доломит (известняк) магнезитовый	Известняк сидеритовый
75—95	То же	То же	То же
95—100	Известняки и доломиты	—	—

Таблица 15

Классификация известняков (доломитов), содержащих примесь терригенного материала (по И. В. Хворовой)

Породы	Содержание, %	
	карбонаты	терригенный материал
Известняк (доломит)	95—100	5—0
Алевритистый (песчанистый) известняк (доломит) или известняк (доломит) с гравием и галькой	75—95	25—5
Алевритовый (песчаный, гравийный, галечный) известняк (доломит)	50—75	50—25
Известковый (доломитовый) алевролит (песчаник, гравелит, конгломерат)	25—50	75—50
Известковистый (доломитистый) алевролит (песчаник, гравелит, конгломерат)	5—25	95—75
Алевролит (песчаник, гравелит, конгломерат) . . .	0—5	100—95
По С. Г. Вишнякову (1957)		
Известняк (доломит)	100—95	0—5
Песчанистый (алевритистый) известняк (доломит)	95—75	5—25
Песчаный (алевритовый) известняк (доломит)	75—50	25—50
Песчаник (алевролит) с известковым (доломитовым) цементом	50—5	50—95
Песок (алеврит)	5—0	95—100

Таблица 16

Классификация известково-доломитовых пород по химико-минералогическому составу

Порода	Содержание, %		Порода	Содержание, %	
	$CaCO_3$	$CaMg(CO_3)_2$		$CaCO_3$	$CaMg(CO_3)_2$
По Н. М. Страхову (1953)			По С. Г. Вишнякову (1933)		
Известняк . . .	95—100	5—0	Известняк . . .	95—100	5—0
Слабодоломитовый известняк . . .	80—95	20—5	Доломитистый известняк	75—95	25—5
Доломитовый известняк	50—80	50—20	Доломитовый известняк	50—75	50—25
Известковый доломит	20—50	80—50	Известковистый доломит	25—50	75—50
Доломит	0—20	100—80	Известковый доломит	5—25	95—75
			Доломит	0—5	100—95

Продолжение табл. 16

Порода	Содержание, %		Порода	Содержание, %	
	$CaCO_3$	$CaMg(CO_3)_2$		$CaCO_3$	$CaMg(CO_3)_2$
По Г. И. Теодоровичу (1935)			Слабодоломитовый известняк . . .	80—95	20—5
Известняк . . .	95—100	5—0	Доломитовый известняк	65—80	35—20
По М. В. Муратову (1940)			Сильнодоломитовый известняк	50—65	50—35
Известняк . . .	80—100	20—0	Сильноизвестковистый известняк	35—50	65—50
Доломитовый известняк	50—80	50—20	Известковистый доломит . . .	20—35	80—65
Известковый доломит	20—50	80—50	Слабоизвестковистый доломит .	5—20	95—80
Доломит	0—20	100—80	Доломит	0—5	100—95

определенной стадии ее развития, особом тектоническом режиме и определенной климатической обстановке.

Впервые И. В. Поповым было предложено при построении инженерно-геологических карт за основу деления пород принимать принцип формационного и литолого-генетического анализа территории. И. В. Попов пишет: «Формации в целом, как геологические тела, можно понять только на основании геологических исследований, прежде всего картирования».

Закономерности образования и распространения геологических формаций изучали и развили многие геологи — Н. С. Шатский, В. В. Белоусов, Н. М. Страхов, В. Е. Хаин, Л. Б. Рухин, Н. П. Херасков и др.

Н. С. Шатский понимает под формацией естественную ассоциацию горных пород, отдельные части которой парагенетически связаны друг с другом как в возрастном (переслаивание, последовательность), так и в пространственном отношении (фациальные смены).

По В. В. Белоусову, каждая осадочная формация представляет собой комплекс фаций, отвечающий определенной стадии геотектонического цикла и определенной геотектонической зоне.

Н. М. Страхов считает осадочной формацией тип осадочного процесса, т. е. способ образования осадков в основных седиментационных зонах земли: полярной, гумидной, аридной, а также в азонально расположенных участках эффузивной деятельности.

По В. Е. Хаину, формации — это прежде всего закономерное и естественное сочетание (парагенезис) определенного набора горных пород — осадочных, вулканогенных и интрузивных, образовавшихся на определенных стадиях развития основных структурных зон земной коры.

Л. Б. Рухин [17] понимает под формацией генетическую совокупность фаций, выделяющихся среди других особенностями своего состава или строения и устойчиво образующихся на более или менее значительном участке земной поверхности при определенном тектоническом и климатическом режиме.

Н. П. Херасков [21] дает определение формациям, как естественным ассоциациям горных пород и связанных с ними минеральных образований,

отдельные члены которых (породы, слои, толщи и т. д.) в результате парагенетических отношений тесно связаны друг с другом как в пространственном, так и в возрастном отношении.

Горная порода является парагенезисом минералов, а формация — парагенезом пород.

Под парагенезом минералов следует понимать более или менее резко выраженный способ их совместного нахождения — ассоциации.

Основными факторами, определяющими облик формаций, являются тектонический режим, климатические условия и для некоторых формаций вулканизм.

По тектоническим признакам формации осадочных пород подразделяются на геосинклинальные, платформенные, внешних (передовых) и внутренних (межгорных) прогибов.

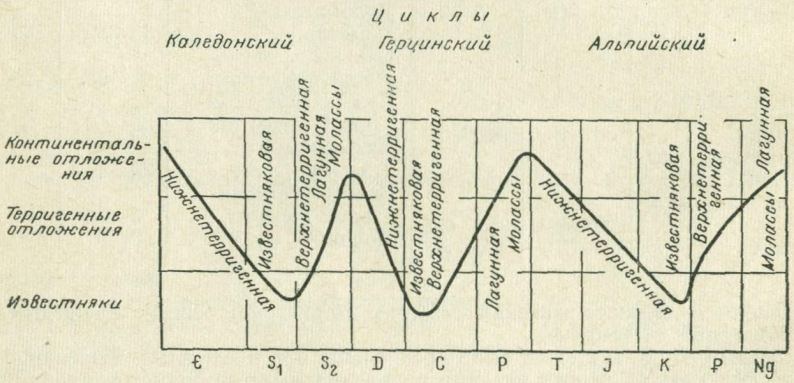


Рис. 1. Смена формаций во времени

В развитии формаций в течение геосинклинального цикла существует (по В. В. Белоусову) определенная последовательность: от морских терригенных отложений в начале цикла к морским известнякам в середине цикла и снова к терригенным, но уже преимущественно континентальным осадкам в конце цикла.

Морские отложения платформенных формаций обычно имеют небольшую мощность (десятки метров), а геосинклинальных формаций исчисляются сотнями и тысячами метров.

На платформах в каждом цикле отмечается та же последовательность формаций, что и в геосинклинальных областях, но некоторые из платформенных формаций, например флишевая, выпадают. На платформах вследствие меньшей интенсивности поднятий и размывов отсутствуют грубообломочные отложения (грубые конгломераты, валунные накопления), а в геосинклиналях у подножия поднимающихся хребтов среди молассовых отложений постоянно скапливается очень грубый материал. На платформах среди песков преобладают кварцевые породы, тогда как в геосинклиналях широко развиты граувакки.

Некоторые формации сочетают признаки геосинклинальных и платформенных образований, на основании чего они могут быть выделены в третью группу — переходных формаций.

Смена формаций (по В. В. Белоусову) во времени в течение каледонского, герцинского и альпийского циклов представлена на рис. 1.

В геосинклиналях В. В. Белоусов выделяет следующие осадочные формации, сменяющие друг друга во времени:

I. Нижняя терригенная формация, соответствующая началу цикла развития геосинклинали.

II. Известняковая формация, соответствующая концу первой половины цикла, т. е. времени максимального преобладания опусканий над поднятиями.

III. Верхняя терригенная формация, отвечающая началу второй стадии геотектонического цикла; в своем образовании тесно связана с возникновением внутри геосинклинали новых поднятий (центральное поднятие). За счет размыва таких быстрорастущих поднятий и накапливается эта формация.

IV. Лагунная формация, характеризующаяся значительным накоплением каменной и калийных солей, а также гипса, ангидрита и доломита.

IV. Молассовая формация, заканчивающая ряд геосинклинальных формаций, соответствует заключительной стадии развития геосинклинали, во время которой поднятия преобладают над опусканием.

В. Е. Хаин предлагает классификацию основных литологических формаций в геосинклинальных областях (табл. 17):

1) для платформы: нижняя терригенная, известняковая, верхняя терригенная (красноцветная);

2) для внешних и передовых прогибов в геосинклинальных областях формации: аспидная, известняковая, нижнемолассовая, верхнемолассовая;

3) для внутренних и межгорных прогибов в геосинклинальных областях формации: спилито-кератофировая, флишевая, лагунная, вулканогенная.

К главнейшим типам относятся следующие формации (выделяемые на инженерно-геологических картах ВСЕГИНГЕО). Для дочетвертичных пород: интрузивная, эффузивная, метаморфическая, терригенная нижняя, эффузивно-осадочная, терригенно-карбонатная, карбонатная, флишевая, верхняя терригенная (красноцветная), соленосная (лагунная), угленосная, молассовая.

Формации (парагенезисов) новейших континентальных отложений представляют собой естественную ассоциацию горных пород различного генезиса, образовавшихся в определенных ландшафтно-географических зонах в тесной связи с неотектоническими движениями, молодым вулканизмом, климатом и оледенением.

Н. И. Николаевым на рис. 2 представлена схема пространственных взаимоотношений основных формаций (парагенезисов) новейших континентальных отложений в СССР, основанная на выделении отдельных комплексов осадков, связанных с определенными климатическими условиями образования, тектоническим режимом и определенной естественноисторической средой.

Для формаций четвертичных отложений в соответствии с их генезисом выделяются комплексы: аллювиальные, делювиальные, пролювиальные и др.

М. В. Чуринов на инженерно-геологических картах предложил выделять следующие формации четвертичных отложений: 1) горного оледенения; 2) равнинного оледенения, включающая подформации оледенений: а) сартанского, б) валдайского (осташковского); в) калининского (зырянского), г) московского (тазовского), д) днепропетровского (самарского); 3) внеледниковая континентальная формация платформ, включающая подформации: а) лёссов и лёссовидных пород запада Русской платформы, б) покровных отложений востока Русской платформы, в) озерно-делювиальных отложений (юга Западно-Сибирской низменности), г) покровных отложений многолетней мерзлоты (Средне-Сибирское плоскогорье); 4) послеледниковая (на территории развития ледниковых отложений); 5) пустынная; 6) полупустынная; 7) мелкосопочника; 8) горных склонов; 9) предгорных равнин; 10) межгорных впадин; 11) морских позднетретичных и четвертичных трансгрессий; 12) вулканогенная.

Формации магматических пород подразделяются на эффузивные и интрузивные (глубинные и полуглубинные).

Формации метаморфических пород разделяются на три категории: сильной, средней и слабой степени метаморфизма.

Отмечается принадлежность геологической формации к определенному структурному этажу, что является важной инженерно-геологической характеристикой свойств комплексов горных пород. Для Атлантического пояса число структурных этажей соответствует числу главнейших циклов геотектонической

Классификация литологических формаций (типовые

(по В. Е. Хаину,

Стадии тектонического цикла	Устойчивые платформы		Подвижные платформы	
	гумидный климат	аридный климат	гумидный климат	аридный климат
Заключительная	Покровно-ледниковая формация. Каолиново-песчаная, кварцево-песчаная, лимническая угленосная формация	Красноцветная континентальная формация	Покровно-ледниковая формация с лёссовой субформацией	Трапповая формация с трахибазальтовой (щелочной) субформацией
Поздняя	Верхняя паралическая угленосная формация	Эвапоритово-красноцветная формация	Красноцветная аплитовая формация	Карбонатно-красноцветная формация
	Морская регрессивная терригенная формация с субформациями: глауконито-кварцевой, кремнистых глин и опок, полимиктовых песков и глин			
Средняя	Платформенная карбонатная формация		Лимническая угленосная формация	Карбонатно-красноцветная формация
	Слоистоизвестняковая, массивно-известняковая субформации; субформации мела и мергелей; горючих сланцев, битуминозных мергелей и глин	Гипсово-доломитовая субформация Платформенная рифовая субформация		
Ранняя (начальная)	Морская трансгрессивная терригенная формация с глауконито-кварцевой субформацией		Покровно-ледниковая формация	
	Базальная лагунно-континентальная формация		Трапповая формация	
	Сероцветная лимническая или нижняя паралическая угленосная субформации Субформация аркозовых песков	Красноцветная лагунная соленосная субформация		

Таблица 17

формационные ряды основных геоструктурных зон)

1964 г.)

Внешние (миогеосинклинали) и передовые прогибы		Внутренние (эвгеосинклинали) и межгорные прогибы	
гумидный климат	аридный климат	гумидный климат	аридный климат
Верхняя молассовая формация		Наземно-вулканогенная (порфировая) формация с субформациями: туфобрекчиевой, игнимбритовой, андезито-базальтовой, липарито-дацитовой	
Лимническая угленосная и континентальная сероцветная грубообломочная молассовые субформации	Красноцветная грубообломочная континентальная молассовая субформация	Диатомово-озерная субформация	
Нижняя молассовая (шлировая) формация		Лагунная оформация	
Морская нефтеносная и паралическая угленосная молассовые субформации	Лагунная соленосная молассовая субформация	Лимническая угленосная субформация	Соленосная субформация
Известняковая геосинклинальная формация с субформациями слоистых известняков массивных известняков и карбонатно-терригенной		Флишевая формация с субформациями: карбонатного флиша, терригенного флиша, туфогенного флиша, субфлишевой глинистой, грубого флиша	
Субформация битуминозных известняков	Субформация барьерных рифов	Порфиритовая (андезитовая) формация	
Аспидная (сланцево-граувакковая) формация с флишоидной, сланцевой, граувакковой и паралитической субформации		Спилито-кератофировая формация со спилитовой, диабазовой, кератофировой и яшмовой субформациями	

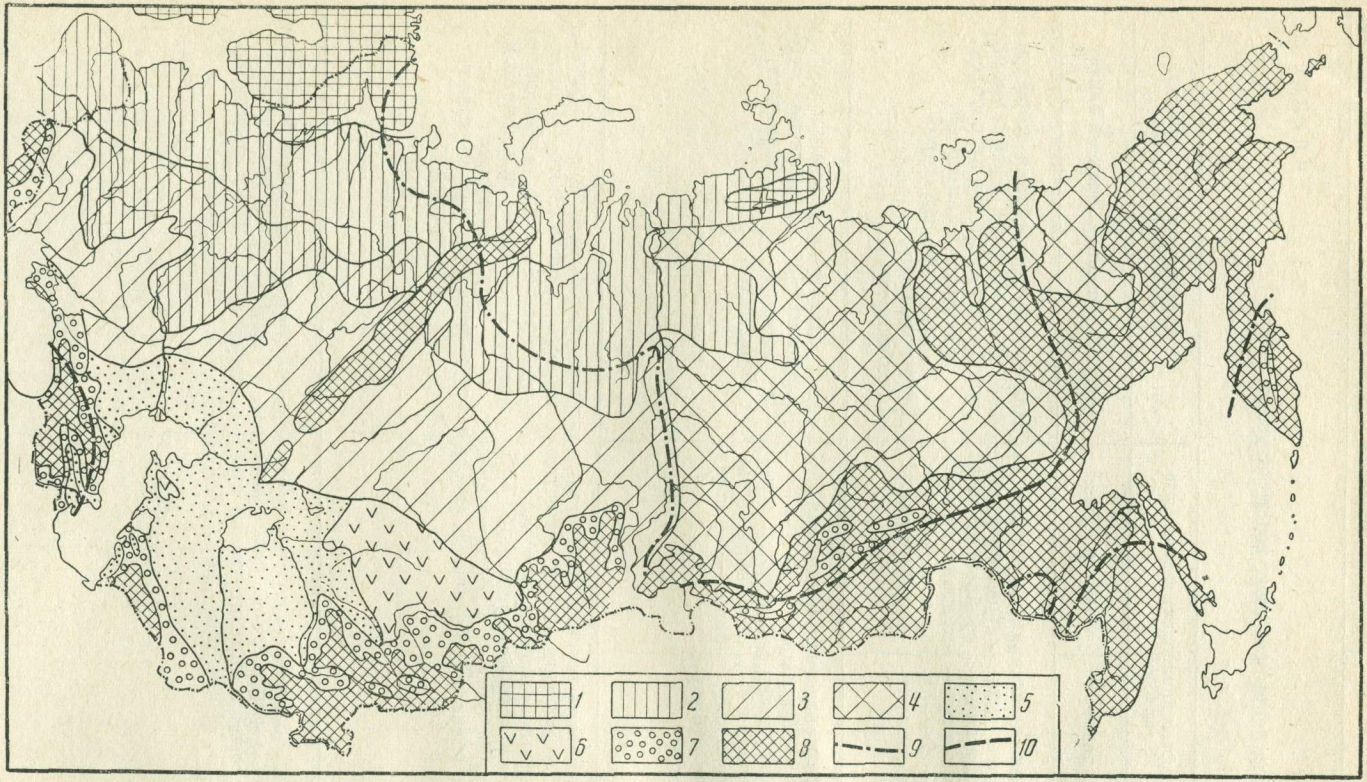


Рис. 2. Схема пространственных взаимоотношений основных формаций (парагенезисов) новейших континентальных отложений (по Н. И. Николаеву)

Формации ледниковых (субполярных) областей. Парагенезис четвертичных осадков: *1* — областей ледниковой денудации; *2* — областей ледниковой аккумуляции. Формации равнинных внеледниковых областей. Парагенезис четвертичных осадков: *3* — в условиях спорадического промерзания и при его отсутствии; *4* — в условиях многолетней мерзлоты. Формации пустынных и полупустынных областей. Парагенезис четвертичных осадков: *5* — в равнинных пустынных областях; *6* — в расчлененных областях (при развитии мелкосопочника); *7* — формации предгорных равнин и межгорных котловин; *8* — формации горных областей; *9* — граница распространения многолетней мерзлоты; *10* — граница области проявления четвертичного вулканизма

складчатости — докембрийской, каледонской, варисцийской, киммерийской альпийской, а для Тихоокеанского пояса — палеозойской, мезозойской, кайнозойской.

Структурный этаж образуется совокупностью пород, соответствующей крупным этапам развития земной коры. Границы между структурными этажами, как правило, выражаются перерывом, угловым несогласием или принципиальным изменением структурного плана. Крупные структурные этажи во времени соответствуют главнейшим циклам складчатости — каледонскому, герцинскому, киммерийскому и альпийскому.

Структурным ярусом называют структурный этаж, ограниченный в своем распространении отдельной структурно-фациальной зоной, т. е. участком земной коры с определенным режимом тектонического развития и типичными особенностями осадкообразования.

II. ГЕОМОРФОЛОГИЯ

Геоморфологическое изучение местности с ее морфометрической, морфогенетической и морфографической характеристикой является необходимой составной частью инженерно-геологических исследований. Вспомогательным материалом при составлении инженерно-геологических карт и карт районирования служат геоморфологические карты, разрезы и схемы соотношения различных генетических и возрастных элементов рельефа. Геоморфологические карты дают представление о распределении участков местности, различных по форме, генезису и возрасту элементов рельефа.

Формами рельефа можно назвать природные тела, слагающие рельеф. Они состоят из элементов, которыми являются точки, линии и поверхности, ограничивающие формы рельефа (табл. 18—20).

Таблица 18

Основные характеристики рельефа
(по А. И. Спиридонову)

Типы структур	Типы рельефа		
	генетические	морфографические	морфометрические
Ненарушенная Слабо нарушенная Складчатая Сбросовая Складчато-сбросовая	Морской абразионный и аккумулятивный, озерно-абразионный и аккумулятивный, озерно-ледниковый, абразионный и аккумулятивный Водно-эрозионный и водно-аккумулятивный Водно-ледниковый эрозионный и аккумулятивный Ветровой (дефляционный) и аккумулятивный Вулканический взрывной и аккумулятивный	Равнинный Холмистый Увалистый Гривистый Грядовой Сопочный Горный Платообразный Западинный Котловинный Ложбинный Овражный Балочный Долинный	Мелкий Средний Крупный Слабо расчлененный Средне расчлененный Сильно расчлененный Пологосклонный Среднесклонный Крутосклонный Низменный Возвышенный Нагорный

Таблица 19

Морфологические комплексы рельефа
(по А. И. Спиридонову)

Основные категории	Морфографические категории	Морфометрические категории			
		по абсолютной высоте	по относительной высоте (глубина) расчленения)	по густоте расчленений (удаленности) водоразделов от ближайших базисов денудации)	по углам склонов
Равнинный рельеф или плоская равнина (колебания высот до 10 м)	Волнистый, бугристый, гривистый, западинный и пр.	Низкий, 0—200 м Возвышенный, 200—500 м Нагорный более, 500 м: Низкий, 500—750 м Средневысотный, 750—1000 м Высокий, 1000—2500 м Очень высокий, более 2500 м	Очень мелкий, 0—1 м Мелкий, 1—2,5 м Средний, 2,5—5,0 м Крупный, 5,0—7,5 м Очень крупный, 7,5—10,0 м	Очень слабо расчлененный, более 2000 м Слабо расчлененный, 1000—2000 м Средне расчлененный, 500—1000 м	Очень пологий, 0—1° Среднепологий, 1—2° Пологопокатый, 4—6° Покатый, 6—8° Крутопокатый, 8—10° Умеренно крутой, 10—15° Средне крутой 15—30° Крутой 30—45° Очень крутой 45—60° Отвесный более 60°
Холмистый рельеф или холмистая равнина (колебания высот 10—100 м)	Волнистый, холмистый, увалистый, западинный, балочный, долинный и пр.	Низкий, 0—200 м Возвышенный, 200—500 м Нагорный, более 500 м: низкий, 500—750 м средневысотный, 750—1000 м высокий, 1000—2500 м осень высокий, более 2500 м	Мелкий, 10—25 м Средний, 25—50 м Крупный, 50—75 м Очень крупный 75—100 м	Умеренно расчлененный 100—500 м Сильно расчлененный 50—100 м Очень сильно расчлененный, менее 50 м	
Горный рельеф (колебания высот более 100 м)	Горнохребтовый, горноостровной с мягкими или резкими очертаниями и пр.	Низкий, до 200 м Возвышенный, 200—500 м Средневысотный, 500—1000 м Умеренно высокий, 1000—2500 м Высокий, 2500—5000 м Высочайший, более 5000 м	Мелкий 100—250 м Средний 250—500 м Крупный 500—750 м Очень крупный 750—1000 м Крупнейший, более 5000 м		

Таблица 20

Схема классификации рельефа суши по крутизне склонов
(по М. Ф. Скрибнову)

Примитивная характеристика	Обобщенная характеристика рельефа	Характеристика рельефа водосбора	Класс рельефа	sin α	tg α	Угол наклона поверхности, град
Равнины (0—7°)	Равнинный (0—1°)	Плоский	I	0—0,005	0—0,005	0—1/4
		Равнинный	II	0,01	0,01	1/2
		Волнистый	III	0,02	0,02	1
	Холмистый (1—7°)	Увалистый	IV	0,04	0,04	2
		Холмистый	V	0,07	0,07	4
		Сильно холмистый	VI	0,12	0,12	7
Горы (7—45°)	Гористый (7—24°)	Предгорный	VII	0,2	0,21	12
		Гористый	VIII	0,3	0,32	18
		Горный	IX	0,4	0,44	24
	Высотный (24—45°)	Высокогорный	X	0,5	0,58	30
		Высотный	XI	0,6	0,75	37
		Островершинный	XII	0,7	1,00	45

Различают две группы форм рельефа: положительные — выпуклые по отношению к плоскости горизонта, окруженные более низкими элементами рельефа (горы, холмы, гряды и пр.), и отрицательные — вогнутые, окруженные повышенными участками рельефа (долины, котловины и пр.).

Положительные формы рельефа:

нагорье — сплошная система горных хребтов и вершин, значительно возвышающихся над уровнем моря (например, Армянское нагорье);

горный кряж — невысокий горный хребет с пологими склонами и плоской или слабовыпуклой вершинной поверхностью (Тиманский кряж, Донецкий кряж);

горный хребет — вытянутая возвышенность с относительной высотой 200 м и более, с крутыми склонами, скалистыми обрывами на гребнях и склонах;

гора — положительная форма рельефа с относительной высотой более 200 м и крутыми склонами;

вершины и пики — наиболее возвышенные точки горных хребтов и нагорий; вершины гор могут быть плоские, куполообразные, пирамидальные, конические и т. д.;

плоскогорье — приподнятая обширная нагорная равнина с плоскими вершинными поверхностями, с хорошо выраженными склонами (Средне-Сибирское плоскогорье);

плато — приподнятая равнина, ограниченная хорошо выраженными, нередко обрывистыми склонами;

гряда — узкая вытянутая возвышенность с крутизной склонов более 20°, с плоскими или округлыми вершинами;

увал — вытянутая возвышенность значительной длины (до 10—15 км) с пологими ровными или выпуклыми вершинными поверхностями;

холм — обособленная куполообразная или коническая возвышенность с пологими склонами; курган — искусственный холм.

Отрицательные формы рельефа:

котловина — впадина, имеющая значительную глубину и крутые склоны;

впадина — понижение небольшой глубины с пологими склонами;

долина — вытянутое незамкнутое понижение с уклоном в одну сторону, часто с обнаженными склонами различной крутизны, нередко осложненными террасами, оползнями и промоинами;

балка — вытянутое углубление с пологими задернованными или покрытыми растительностью склонами, открытое в сторону общего уклона местности; бровка склона не всегда выражена отчетливо, длина может достигать нескольких километров;

овраг — вытянутое углубление с крутыми и местами отвесными, обычно обнаженными склонами; глубина и длина оврагов самые различные;

промоина — углубление небольшой глубины, ширины и длины, обычно с крутыми обнаженными склонами, с резко выраженной бровкой в верхнем конце промоина замыкается;

ложбина стока — вытянутое углубление с пологими склонами, покрытыми растительностью, и неясно выраженной бровкой; ложбина имеет небольшую глубину (несколько метров) и незначительную протяженность (до 200—500 м).

Морфометрические показатели: абсолютная высота, глубина, густота расчленения, угол наклона земной поверхности; густота, или интенсивность горизонтального расчленения, определяемые длиной эрозионной сети (в км на 1 км^2); показатель густоты расчленения, представляющий собой относительную величину (картограмма густоты долинно-балочной сети), глубина расчленения или интенсивность вертикального расчленения (относительная высота).

Глубина расчленения и угол наклона земной поверхности обозначаются абсолютными величинами, которые можно вычислить для любой точки на земной поверхности.

При составлении инженерно-геологических карт проводится геоморфологическое районирование изучаемой территории.

А. И. Спиридонов выделяет признаки, которые необходимо учитывать при комплексном геоморфологическом районировании: 1) стратиграфия и тектоника района, петрографический состав пород, геологические структуры и история их формирования; 2) новейшая тектоника; 3) рыхлые отложения (особенно четвертичные): их состав, генезис, возраст, история накопления; 4) внешние (морфографические и морфометрические) особенности рельефа; 5) генезис господствующих и сопутствующих форм; 6) генетические типы рельефа и их сочетания; 7) история формирования рельефа, его возраст и стадия развития; 8) современные геоморфологические процессы, их распространение и интенсивность.

III. ТОПОГРАФИЯ И РЕЛЬЕФ

Топографическая карта с рельефом является основой, на которой составляются инженерно-геологические карты различных масштабов.

На топографических картах рельеф обычно изображается в горизонталях, а местные предметы (ситуация) — в условных знаках.

Выбор сечения рельефа, т. е. того промежутка по высоте, через который горизонтали проводятся на карте, зависит от масштаба карты и углов наклона изображаемой местности.

Величина сечения на картах разных масштабов не может быть одинаковой.

Более того, на одной карте для изображения равнинных и горных районов целесообразно применять различное сечение рельефа.

Для наглядного и выразительного изображения рельефа на картах используется гипсометрический способ, в котором горизонтали сочетаются с послойной гипсометрической окраской.

В СССР абсолютные отметки суши считают от нуля Кронштадтского футштока, превышающего на 1—2 см средний уровень Балтийского моря.

Масштабом называется степень уменьшения линий на карте относительно горизонтальных проложений соответствующих им линий на местности.

На картах обычно указывается только масштаб, характеризующий степень уменьшения земного эллипсоида, изображаемого на плоскости. Его либо подписывают в виде численного масштаба (например, 1 : 2 500 000), либо изображают в виде графика (линейный масштаб), либо выражают длиной линии на местности, соответствующей единице длины на карте (например, в 1 см — 25 км).

В настоящее время пользуются следующими масштабами:

Численными		Линейными	
1 : 1 000 000	1 : 50 000	1 см = 10 км	1 см = 500 м
1 : 500 000	1 : 25 000	1 см = 5 км	1 см = 250 м
1 : 200 000	1 : 10 000	1 см = 2 км	1 см = 100 м
1 : 100 000		1 см = 1 км	

Условные знаки, применяемые на географических картах, подразделяются на три основные группы: контурные, внемасштабные и линейные.

Контурные (иначе масштабные) знаки предназначены для изображения объектов в их действительном очертании в масштабе карты.

Внемасштабные условные знаки, применяемые для изображения не выражающихся в масштабе карты объектов, обычно преувеличивают их действительные размеры.

Линейные условные знаки применяются для изображения объектов линейного протяжения, таких, как реки, дороги, линии связи, границы и т. п. Они могут быть контурными и внемасштабными.

Проекция карты — это математический способ изображения поверхности земного эллипсоида на плоскости. Топографические и обзорно-топографические карты масштабов от 1 : 2000 до 1 : 1 000 000 служат целям географического и инженерно-геологического изучения земной поверхности, а также для решения широкого круга задач народнохозяйственного значения.

К топографическим относятся карты масштабов 1 : 2 000—1 : 100 000, к обзорно-топографическим — масштабов 1 : 200 000 — 1 : 1 000 000.

Топографические и обзорно-топографические карты СССР масштабов от 1 : 500 000 и крупнее составляются отдельными участками в равноугольной поперечно-цилиндрической проекции Гаусса, вычисленной по элементам эллипсоида Красовского в пределах трехградусных и шестиградусных зон. Для карт масштабов 1 : 2000—1 : 5000 приняты трехградусные зоны, а масштабов 1 : 10 000—1 : 500 000 — шестиградусные.

Проекция Гаусса в пределах установленных зон обеспечивает изображение поверхности референц-эллипсоида на плоскости без существенных искажений. В ней отсутствует искажение углов и сохраняется подобие бесконечно малых фигур. Максимальные для территории СССР линейные искажения на широте $f = 36°$ на краю шестиградусной зоны не превышают 0,001.

Проекция обеспечивает внутри установленных зон возможность одновременного нанесения трапеций и опорных пунктов в единой системе прямоугольных координат и исключает разрывы по границам соседних листов.

Карта масштаба 1 : 1 000 000 составляется, в отличие от других карт рассматриваемой группы, в видоизмененной поликонической проекции, применяемой в качестве многогранной. Каждый лист карты с размерами 4° по широте и 6° по долготе отдельно проектируется на плоскость.

Листы карты масштаба 1 : 1 000 000 складываются без разрывов или по направлению меридианов, или по направлению параллелей, т. е. по колоннам или поясам.

К северу и югу от экватора пояса обозначаются заглавными буквами латинского алфавита. Счет колонн ведется с запада на восток, начиная от меридиана

с долготой 180° от Гринвича; колонны обозначаются арабскими цифрами от 1 до 60.

Номенклатура листа карты масштаба 1 : 1 000 000 складывается из обозначения пояса и номера колонны. Например, лист, на котором расположена Москва, получает номенклатуру N — 37 (рис. 3).

Колонны листов совпадают с шестиградусными зонами проекции Гаусса. Средний меридиан каждого листа карты является осевым меридианом зоны. Номенклатура и размеры трапеции топографических и обзорно-топографических карт приведены в табл. 21 и на рис. 4.

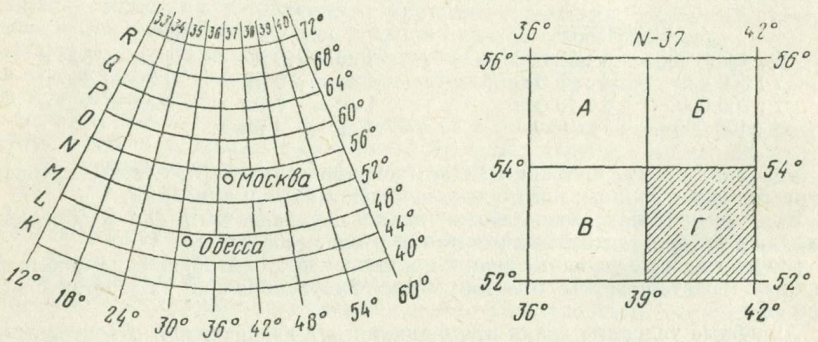


Рис. 3. Детализация международной разграфки листов

Рельеф, представляя собой всю совокупность естественных неровностей земной поверхности, является одним из основных природных факторов, обусловливающих размещение вод, растительности и других элементов географической среды.

Зная преобладающие углы наклона и относительные высоты характерных форм рельефа, можно установить для каждого масштаба карты несколько высот сечения, которыми и следует пользоваться в зависимости от особенностей

Таблица 21

Номенклатура и размеры трапеций топографических и обзорно-топографических карт

Масштаб	Размер трапеций по		Номенклатура
	широте	долготе	
1 : 1 000 000	4°	6°	N—37
1 : 500 000	2°	3°	N—37—А
1 : 300 000	1° 20′	2°	III—N—37
1 : 200 000	40′	1°	N—37—XXIV
1 : 100 000	20′	30′	N—37—120
1 : 50 000	10′	15′	N—37—120—А
1 : 25 000	5′	7′ 30″	N—37—120—Б—б
1 : 10 000	2′ 30″	3′ 45″	N—37—120—Б—г—4
1 : 5 000	1 15	1 52,5	N—37—120—(160)
1 : 2 000	0 25	0 37,5	N—37—120—(160—а)

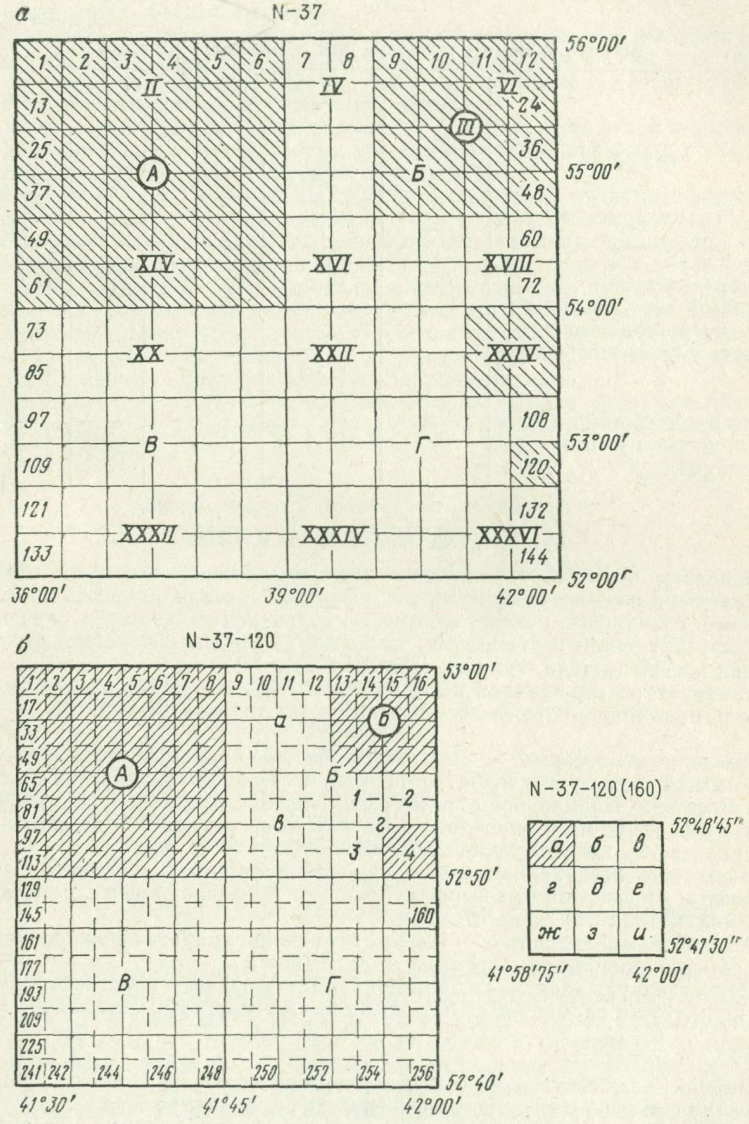


Рис. 4. Номенклатура и размеры трапеции топографических и обзорно-топографических карт.

Разграфка листов карт масштабов:
а — 1 : 500 000; 1 : 300 000; 1 : 200 000; 1 : 100 000 на листе миллионной карты; *б* — 1 : 50 000; 1 : 25 000; ; 1 : 10 000; 1 : 5 000; *в* — 1 : 2000.

местности и требований, предъявляемых к изображению рельефа (табл. 22). Это и принято на всех современных топографических картах СССР.

Таблица 22

Высота сечения рельефа для различных районов

Рельеф	Масштаб					
	1 : 2 000	1 : 5 000	1 : 10 000	1 : 25 000	1 : 50 000	1 : 100 000
Плоскоравнинный	0,5	0,5	1,0—2,5	2,5	10,0	20,0
Равнинный пересеченный и всхолмленный с преобладающими углами наклона до 6°	0,5—1,0	1,0—2,0	2,5	5,0	10,0	20,0
Горный и предгорный, а также песчаные пустыни . .	2,0	5,0	5,0	5,0	10,0	20,0
Высокогорный	—	—	—	10,0	20,0	40,0

IV. МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТ

Основные понятия. К основным метеорологическим факторам относятся: температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, облачность, осадки, видимость, солнечная радиация, а также тепловое излучение земли и атмосферы, температура почвы, испарение, различные явления погоды (метели, туманы, грозы и т. д.).

Температура выражается по стоградусной шкале ($t°$ С), но нередко при расчетах применяется также абсолютная шкала температур ($T°$, °К); $T = 273, 16 + t$.

Давление атмосферы P — сила, действующая на единицу поверхности, измеряемая высотой ртутного столба (мм рт. ст.), вес которого уравновешивает давление атмосферы. Нормальное атмосферное давление измеряется весом ртутного столба высотой 760 мм и основанием 1 см² при температуре 0° С на уровне моря и на широте 45°, где ускорение силы тяжести $g = 980,6$ см/с².

Влажность воздуха измеряется величиной упругости водяного пара, содержащегося в воздухе. Она выражается, как и давление воздуха, в миллибарах или миллиметрах ртутного столба.

Абсолютная влажность a — количество водяного пара, содержащегося в единице объема, измеряется в граммах на 1 м³ (г/м³).

Относительная влажность f определяется отношением упругости пара в воздухе к упругости насыщенного пара при той же температуре, выражается в процентах ($f = \frac{C}{E} 100\%$).

Дефицит влажности — разность при данной температуре между упругостью насыщенного пара E и упругостью фактически содержащегося в воздухе водяного пара e. Он обозначается через d и измеряется в миллибарах или миллиметрах:

$$d = E - e.$$

Если упругость паров в воздухе больше абсолютной влажности при той же температуре, то происходит процесс конденсации. Влажность воздуха измеряется гигрометрами и психометрами.

Точка росы — это температура, до которой при неизменном давлении нужно охладить воздух для того, чтобы пар, находящийся в нем, достиг состояния насыщения; ее обозначают через τ.

Направление и скорость ветра даются по странам света — с делением горизонта на 8 или 16 румбов или по азимутам, выраженным в градусах. Отсчет ведется от севера через восток, так что северное направление соответствует 0° (или 360°), восточное 90°, южное 180° и западное 270°.

Скорость ветра выражается в м/с или км/ч; иногда она дается в условных единицах — баллах по шкале Бофорта, взятых из морской практики, но последняя шкала практически уже вышла из употребления.

Облачность — один из важнейших элементов погоды. Облака образуются на некоторой высоте над земной поверхностью в результате конденсации и сублимации водяного пара, они состоят из капелек воды или кристаллов льда.

Наблюдения за облачностью включают определение рода облаков и оценку их количества, определение высоты, а также направления и скорости движения. Количество облаков оценивается по десятибалльной шкале в зависимости от степени покрытия неба: при ясном небе — 0 баллов, при сплошной облачности — 10 баллов. Высота облаков определяется с помощью аэрологических методов или визуально; последние определения весьма приблизительны.

Направление и скорость движения облаков так же, как и ветра, указываются в градусах или румбах, а скорость — в м/с. Международная классификация облаков дана в табл. 23.

Таблица 23

Международная классификация облаков

Ярус	Род	Характер облаков
Верхний (более 6 км)	1	Перистые
	2	Перисто-кучевые
	3	Перисто-слоистые
Средний (2—6 км)	4	Высококучевые
	5	Высокослоистые
Нижний (менее 2 км)	6	Слоисто-кучевые
	7	Слоистые
	8	Слоисто-дождевые
	9	Кучевые
	10	Кучево-дождевые
	Особый	Разорванные (кучевые, слоистые, дождевые)

Испарение наблюдается с водной поверхности, с поверхности суши, с растительного покрова. Для наблюдений с водной поверхности применяется эвапарометр Вильда, для наблюдений с поверхности суши — почвенный испаритель М. А. Рыкачева и В. Н. Попова. При наблюдениях с растительного покрова используется метод срезов А. А. Ничипоровича (в первые 10—15 мин срезанное растение испаряет столько же воды, сколько и на корню).

Величина испарения с водной поверхности за месяц V подсчитывается по формуле Крицкого, Менкеля и Россинского:

$$V = 9\,(l_0 - l_{200})\sqrt{1+0{,}015W_{900}},$$

где l_0 — упругость насыщенного водяного пара, соответствующая температуре воды водоема;

l_{200} — упругость водяного пара в воздухе на высоте 200 см над поверхностью земли;

W_{900} — скорость ветра на высоте 900 см.

Значения l_{200} и W_{900} принимаются по данным ближайшей метеорологической станции.

Для более точного определения величины месячного испарения с водной поверхности пользуются формулой Б. Д. Зайкова:

$$U = 0{,}2\,(d_0 - d_{200})\,(1 + 0{,}85V_{100})\ \text{мм},$$

где d_0 — средняя месячная упругость насыщенного водяного пара, рассчитанная по температуре поверхности воды, в мм;

d_{200} — упругость водяного пара в воздухе на высоте 200 см от поверхности воды в мм;

V_{100} — среднемесячная скорость ветра (м/сек) на высоте 100 см.

Суммарную величину месячного испарения с поверхности речного бассейна можно определить по графикам Б. В. Полякова. Величина испарения определяется только для месяцев с отрицательными температурами, с учетом широтных зон, но без учета месячной суммы осадков.

При определении величины испарения по графикам вводятся поправочные коэффициенты на зоны. Например, для Азиатской части СССР рекомендуются следующие поправочные коэффициенты:

Зоны	Коэффициент
Смешанный лес	1,10
Широта 62—64°	1,10—0,90
Широта 64—66°	0,90—0,85
Заполярье	0,85—0,80

Испарение с поверхности суши (по Б. В. Полякову) достигает следующих величин:

U, мм/месяц	при температуре, °С	*U*, мм/месяц	при температуре, °С
30	0	17	—5
27	—1	12	—7
24	—2	7	—10
22	—3	4	—15
20	—4	3	—20

Испарение с поверхности льда несколько ниже, чем с поверхности снега, но при температуре от 0 до минус 2° эти величины становятся практически одинаковыми.

Осадки обычно характеризуются: по видам — роса, иней, дождь, снег, град и т. д.; по характеру выпадения — обложные, ливневые, моросящие; по количеству, которое измеряется в миллиметрах столба воды.

На основании карт осадков, составленных О. А. Дроздовым и М. И. Львович, определено следующее годовое количество осадков по широтным зонам:

Годовое количество осадков, см	Широтные зоны, градусы	Годовое количество осадков, см	Широтные зоны, градусы
145	0—10	74	40—50
84	10—20	63	50—60
59	20—30	27	60—90
66	30—40		

В северном полушарии в среднем выпадает 77 мм осадков за год.

В СССР наибольшее количество атмосферных осадков за сутки выпадает в Потийской низменности (около 307 мм) и в Батуми (294 мм); в Московской области наибольшая суточная сумма осадков достигает 160 мм, а в более северных районах она не превышает 75 мм. Интенсивность осадков убывает от экваториальных широт к высоким.

Годовой ход осадков определяется тремя факторами: атмосферной циркуляцией, влагосодержанием воздуха и его относительной влажностью.

Условия увлажнения зависят от соотношения осадков и испаряемости: при одном и том же количестве осадков в одних районах суши может быть переувлажнение, в других — недостаточное увлажнение. В районах, где количество осадков больше испаряемости, отмечается избыточное увлажнение, приходится заботиться об осушении территории и защите ее от заболачивания. В районах, где количество осадков меньше величины испаряемости, увлажнение обычно недостаточно, а если величина испаряемости более чем в три раза превышает количество осадков, то возникает пустыня.

Величина испарения для условий суши кроме тепловых ресурсов (определяемых главным образом радиационным балансом) существенно зависит от водных ресурсов.

Солнечная радиация является одним из основных климатообразующих факторов. Сведения о ней широко используются при расчетах теплового баланса и ряда других показателей. От высоких широт к более низким величинам радиации возрастает почти в три раза, причем по мере продвижения к югу радиация становится все более интенсивной. Самые высокие значения радиации наблюдаются в пустынных районах Средней Азии, где они превышают 160 ккал/см² в год.

Климат СССР. Климатическое районирование СССР построено на основе климатической классификации, в которой климатические области выделены на

Таблица 24

Классификация климатов СССР (общая схема)

Термические условия теплого периода и сумма температур земной поверхности	Условия увлажнения, комплексный индекс сухости			
	избыточно влажные; α меньше 0,45	влажные, α от 0,45 до 1,00	недостаточно влажные, α от 1,00 до 3,00	сухие, α больше 3,00
Очень холодные, температура воздуха в течение года ниже 10°	Арктическая пустыня	—	—	—
Холодные, меньше 1000°	Тундра и лесотундра	—	—	—
Умеренно теплые, от 1000 до 2200°	Альпийские луга	Хвойные леса	Горная степь и степи Сибири	Горная пустыня
Теплые, от 2200 до 4400°	—	Смешанные и широколиственные леса	Степь и лесостепь	Северная пустыня
Очень теплые, больше 4400°	—	Субтропические леса	Ксерофитная субтропическая растительность	Пустыня

основании количественных метеорологических показателей, соответствующих физико-географическим зонам.

Физико-географические зоны в свою очередь определяются балансом радиационной энергии и распределения радиационного индекса сухости — отношения радиационного баланса к количеству тепла, необходимому для испарения годовой суммы осадков.

При переходе от одного широтного пояса к другому в ряде природных зон, соответствующих изменениям условий увлажнения, периодически повторяются признаки сходства наряду с различиями, определяемыми изменениями тепловых энергетических условий. Такая закономерность была названа периодическим законом географической зональности.

Периодический закон географической зональности устанавливает определенную зависимость размещения географических зон от климатических факторов. Поэтому он может служить основой для построения физико-географической классификации климата (табл. 24).

Таблица 25

Климатические условия

Условия увлажнения	Отношение величины комплексной испаряемости к количеству осадков	Географические условия
Избыточно влажные	Меньше 0,45	Арктическая пустыня, тундры, лесотундры, альпийские луга
Влажные	От 0,45 до 1,00	Лес
Недостаточно влажные	От 1,00 до 3,00	Лесостепь, степь, сухая субтропическая растительность
Сухие	Больше 3,00	Пустыня

Таблица 26

Климатическая характеристика

Термические условия теплового периода	Сумма температур земной поверхности за период с температурой воздуха выше 10° С	Географические условия
Очень холодные	Температура воздуха в течение года не превышает 10°	Арктическая пустыня
Холодные	Меньше 1000°	Тундра и лесотундра
Умеренно теплые	От 1000 до 2000°	Хвойный лес, альпийские луга, горные степи и степи Сибири
Теплые	От 2200 до 4400°	Смешанный и широколиственный лес, лесостепь, степь, северная пустыня
Очень теплые	Больше 4400°	Субтропическая растительность, пустыня

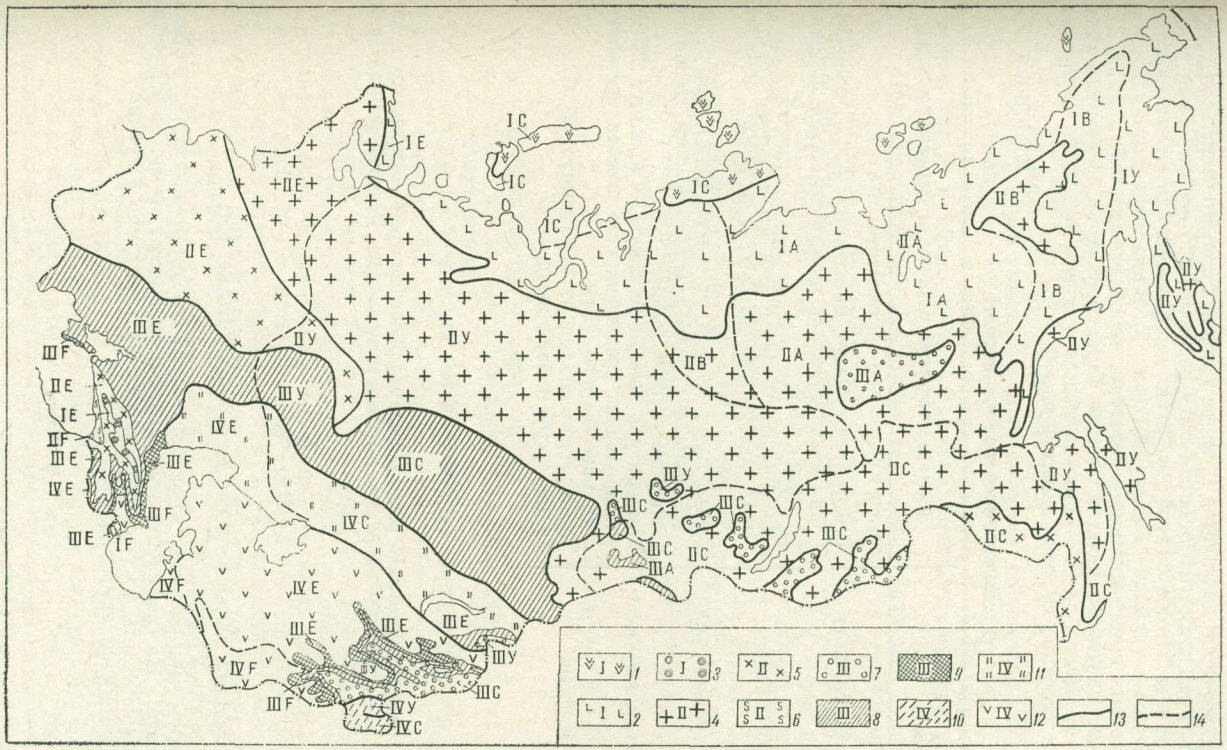


Рис. 5. Схематическая карта климатического районирования СССР.

Климат: I — Избыточно влажный (лето): *1* — очень холодное; *2* — холодное; *3* — умеренно теплое. II — Влажный (лето); *4* — умеренно теплое; *5* — теплое; *6* — очень теплое. III — Недостаточно влажный (лето): *7* — умеренно теплое, *8* — теплое; *9* — очень теплое. IV — Сухой (лето): *10* — умеренно теплое; *11* — теплое; *12* — очень теплое; *13* — граница территорий с различным климатом.

Зима (буквы на карте): *A* — сухая малоснежная; *B* — суровая снежная; *C* — умеренно суровая малоснежная; *У* — умеренно суровая снежная; *E* — умеренно мягкая; *F* — мягкая; *14* — граница территорий с различной зимой

На территории СССР выделяется 12 типов основных климатических зон, которые включают 31 тип климатических областей, различных по особенностям условий зимнего периода. На основе этой системы классификации климатов построена карта климатического районирования СССР (рис. 5). В классификации климатов СССР использованы климатические показатели, приведенные в табл. 25, 26, 27.

Климатические условия каждой области характеризуются сочетанием трех показателей, например, II 4У — климатические условия влажные, умеренно теплое лето, с умеренно суровой снежной зимой.

Таблица 27

Климатические показатели

Термические условия зимы	Метеорологические показатели зимнего периода
А. Суровая малоснежная	Температура января ниже минус 32° С, наибольшая среднедекадная высота снежного покрова меньше 50 см
В. Суровая снежная	Температура января ниже минус 32° С, наибольшая среднедекадная высота снежного покрова больше 50 см
С. Умеренно суровая малоснежная	Температура января от минус 13 до минус 32, наибольшая среднедекадная высота снежного покрова меньше 50 см
I Умеренно суровая снежная	Температура января от минус 13 до минус 32° С, наибольшая среднедекадная высота снежного покрова больше 50 см
Е. Умеренно мягкая	Температура января от 0 до минус 13° С
F. Мягкая	Температура января выше 0° С

V. ГИДРОЛОГИЯ

Элементы характеристики рек. Площадь бассейна реки определяют по картам различного масштаба методом планиметрирования. Густоту речной сети находят из равенства

$$D=\frac{\sum L}{F},$$

где ΣL — суммарная длина всех рек на данном участке, км;

F — площадь участка, км².

Гидрографом реки называют хронологический график режима речного стока (график расхода). На графике по оси абсцисс откладывают время, по оси ординат расход, выраженный в кубических метрах в секунду или в сутки.

Коэффициент извилистости реки:

$$\varphi=\frac{l}{L},$$

где l — длина реки по руслу, м;

L — расстояние между теми же точками по прямой, м.

Речной сток бывает среднемесячный, среднесезонный, среднегодовой и среднемноголетний.

Объемы стока вычисляются путем умножения расходов на число секунд в расчетном отрезке времени. Выражаются объемы в миллионах метров или километрах кубических. Высота слоя стока определяется по формуле

$$A = \frac{Q - T}{F \cdot 1000} \text{ мм},$$

где Q — расход, м³/с;
T — расчетное время;
F — площадь бассейна реки, км².

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений многолетние нормы стока вычисляют по карте изолиний среднего модуля годового стока рек СССР, по методу аналогии по эмпирическим формулам М. А. Великанова, Д. Л. Соколовского и Б. В. Полякова и по методам, основанным на применении уравнения водного баланса.

При коротком или недостаточном сроке наблюдений многолетние нормы стока вычисляют по графикам связи. При помощи этих графиков устанавливают корреляционные зависимости между стоком реки, для которой имеются лишь краткосрочные наблюдения, и стоком реки, для которой имеются долгосрочные наблюдения, проведенные при аналогичных условиях водосборов.

Глубинная и боковая эрозия. Водный поток размывает русло и переносит измельченные продукты. Интенсивность размыва, устанавливаемая по количеству донных и взвешенных наносов, зависит от массы воды и скорости потока. В верховьях рек вследствие значительного уклона русла скорость движения потока и интенсивность размыва больше, чем в низовьях.

Для ориентировочного подсчета количества образующихся донных наносов Г. В. Лопатиным предложена формула

$$G = \frac{1{,}4 \cdot 10^6 I^{4/3} (\overline{U} - V_0)}{\sqrt[3]{\overline{d}}} \cdot B,$$

где G — расход донных наносов, кг/с;
B — часть русла, где интенсивность наносов наибольшая;
I — уклон потока;
d — средняя крупность наносов (мм) по поперечному профилю;
$\overline{U}$ — средняя скорость течения потока, м/с;
V_0 — скорость течения, при которой начинается движение наносов, м/с.

Формирование долины реки связано с ее историко-геологическим развитием. В приподнятых местах образуются пороги, при опусканиях — заболоченные участки. На участках поднятий река врезается в долину, а в местах опусканий долину заносит осадками. Следовательно, новейшие движения сказываются на расходе реки, на ее эрозионной и аккумулятивной деятельности.

В речных долинах Северного полушария вследствие вращения Земли формируется более крутой правый берег, что приводит к асимметрии речных долин. На это впервые указал Г. А. Соловцов, а затем через 30 лет более четко сформулировал К. М. Бэр (закон Бэра). Вследствие длительной эрозионной работы рек происходит перемещение русла, одностороннее формирование террас, интенсивная переработка подмываемого берега и развитие оползней.

Морская абразия — это подмыв, перенос и отложение галечников. Изучение режима морских берегов необходимо проводить для целей навигации, берегоукрепления и портостроения. Советская школа исследователей считает деятельность волн ведущим фактором морской абразии. Главным фактором развития и движущей силой большинства береговых процессов являются волны, а также прибрежные дрейфовые и компенсационные течения, возбуждаемые ветром и действующие одновременно с волнами. В зависимости от местных условий волны либо производят разрушение (абразию) пород береговой зоны, отодвигая берег в сторону суши, либо наращивают его, аккумулируя отложения вдоль

берегов морей, крупных озер и водохранилищ. Механическую энергию, полученную от ветра, волны доносят к берегам в виде более или менее однородных и весьма широких потоков, возникающих в поверхностном слое воды. Эти потоки, встречая края суши, производят механическое разрушение твердой земной оболочки, обусловливают постоянное движение и измельчение обломков горных пород и других твердых частиц (наносов). Иногда они и переносят их на большие расстояния.

Воздействие прибоя волн на основание берегового склона может вызвать его быстрое разрушение, а следовательно, и разрушение расположенных на нем сооружений (набережных, жилых кварталов, дорог и т. д.).

Размеры реки, условия ее питания, степень зарегулированности озерами или водохранилищами, а также морфологические свойства русла в отдельных случаях вызывают существенные отклонения от нормальных сроков льдообразования, от дат начала ледостава и весеннего ледохода.

VI. ГИДРОГЕОЛОГИЯ

Основные понятия и терминология. В связи с тем, что существует справочник гидрогеолога, в настоящем разделе приводятся лишь наиболее важные понятия и термины, необходимые при инженерно-геологических исследованиях.

Водоносный пласт — это обводненная осадочная порода однородного петрографического состава, генезиса и возраста, сравнительно ограниченной мощности и значительного площадного распространения. Водоносный пропласток — это водоносный пласт малой мощности и незначительного площадного распространения.

Водоносная линза — то же, что и водоносный пласт, но линзообразной формы и сравнительно ограниченная по площади распространения.

Водоносный горизонт — обводненная пачка осадочных или вулканогенных пород однородного или разнородного петрографического состава, генезиса и возраста, с различной водопроницаемостью, но с единой пьезометрической поверхностью, ограниченная снизу и сверху регионально выдержанными водоупорами.

Водоносный комплекс — обводненная толща осадочных или вулканогенных пород разнородного петрографического состава, генезиса и возраста с различной водопроницаемостью, с единой или разной пьезометрической поверхностью, не имеющая снизу четко выраженного регионального водоупора и местных водоупоров для выделения в ней водоносных горизонтов.

Воды спорадического распространения представляют собой скопления подземных вод в гидравлически разобщенных линзах и пропластках, залегающих на различной глубине и находящихся внутри осадочной водопроницаемой или слабопроницаемой толщи.

В предгорных впадинах, в синеклизах платформ и в крупных межгорных впадинах почти всегда имеется не один, а несколько водоносных горизонтов, которые можно объединить в водонапорную систему (А. М. Овчинников). Под последней следует понимать группу смежных выше и ниже залегающих водоносных горизонтов и комплексов, находящихся в пределах крупной единицы стратиграфической шкалы и приуроченных к отрицательной геологической структуре. Водонапорная система может включать последнюю полностью или частично.

Выделять водонапорные системы среди высокометаморфизованных и изверженных пород не следует, так как встречающиеся среди них грунтовые воды зоны открытой трещиноватости не являются напорными, а воды глубоких тектонических трещин имеют локальное распространение и гидравлически изолированы.

Грунтовые воды — это подземные воды, образующие одну из самых верхних гидрогеологических зон. На формирование грунтовых вод влияют непосредственно: атмосфера, поверхностные воды, климат, почвенный и растительный покров, рельеф, состав водовмещающих пород и пород зоны аэрации.

Ф. П. Саваренский называет грунтовыми воды, находящиеся в первом от поверхности водопроницаемом слое и подстилающиеся первым водоупорным горизонтом.

Горизонт грунтовых вод — первый от поверхности земли постоянный во времени, регионально выдержанный водоносный горизонт, имеющий единую (или общую) гидравлическую поверхность, давление на которой, как правило, равно атмосферному. Верховодкой (по Ф. П. Саваренскому) обычно называют ближайшие к поверхности грунтовые воды, развитые на небольших площадях и непостоянные во времени.

Систематика подземных вод.

I. Для районов распространения осадочных, метаморфизованных или слабо метаморфизованных и частично для вулканогенных пород.

1. Верховодка, имеющая практическое значение и более или менее широкое распространение.

2. Болотные воды и воды обводненных торфяников.

3. Грунтовые воды ледниковых отложений: а) основной (песчаной) морены, б) надморенные, в) зандров, г) озов, д) конечноморенных образований (собственно конечных морен, кам, друмлинов и т. п.).

4. Грунтовые воды речных, озерных и морских отложений: а) современных и древних аллювиальных образований и надпойменных террас, б) погребенных долин, в) современных и древних озерных отложений, г) современных и древних морских прибрежных осадков, д) песчаных островов, е) пролювиальных отложений и образований предгорных шлейфов.

5. Грунтовые воды: а) лёссов и лёссовидных суглинков, б) бугристо-грядовых песков и песчаных массивов, в) дюн и барханов.

6. Линзы пресных вод — подлиманные, подтакырные, низкогорных и предгорных равнин, подпесчаные, песчаных пустынь.

7. Грунтовые воды дочетвертичных отложений, подразделяющиеся по возрасту водовмещающих пород.

8. Воды спорадического распространения.

9. Артезианские водоносные горизонты, подразделяющиеся по возрасту водовмещающих пород и (если это нужно) по признаку литолого-гидродинамической неоднородности: а) водоносных подгоризонтов, б) однородных, условно однородных и неоднородных водоносных горизонтов, в) в двух, трех и более артезианских водоносных горизонтах с указанием для всех водоносных горизонтов условий их дренирования (поверхностное, подземное и смешанное) и условий распространения (неограниченные, литологически или стратиграфически выклинивающиеся, замкнутые, подземного распространения).

10. Водоносные комплексы, подразделяющиеся по возрасту водовмещающих пород, с указанием так же, как и для водоносных горизонтов, условий дренирования и ограниченности или неограниченности их распространения по падению слоев.

11. Карстовые воды: а) регионального и локального распространения, б) карстовые реки и озера.

12. Воды зон тектонических разломов.

13. Воды лавовых потоков.

II. Для районов распространения изверженных и осадочных сильно метаморфизованных пород.

14. Воды регионального распространения: а) грунтовые воды зоны открытой трещиноватости с подразделением вод по петрографическому составу, генезису и возрасту водовмещающих пород, б) воды водоносных серий и свит с подразделением вод по возрасту и генезису водовмещающих пород, в) напорные воды погребенных зон открытой трещиноватости, г) воды элювия (дресвы) изверженных сильно метаморфизованных пород, д) напорные воды кристаллического фундамента.

15. Воды локального распространения: а) воды зон тектонических разломов, б) воды глубоких открытых и закрытых трещин, т. е. выходящих и не выходящих

на земную поверхность, в) воды контактов метаморфизованных пород с интрузивными телами, в том числе с дайками и жилами, г) воды стратиграфически несогласных контактов.

III. Для районов развития многолетнемерзлых пород.

16. Воды регионального распространения: а) верховодка, имеющая практическое значение и более или менее широкое распространение (сезонных и временных таликов), б) надмерзлотные (грунтовые) воды с переменным годовым и фазовым режимом, подразделяющиеся по возрасту и генезису водовмещающих пород, в) постоянные грунтовые надмерзлотные воды, подразделяющиеся по возрасту и генезису водовмещающих пород, г) различные воды подмерзлотных вод.

17. Воды локального распространения: а) воды многолетних и сезонных замкнутых таликов вдоль рек, б) надмерзлотные многолетние подрусловые воды вдоль мелких рек, в) подрусловые многолетние воды вдоль крупных рек, часто соединяющиеся с подмерзлотными водами, г) воды надпойменных террас крупных рек, д) воды конусов выноса, горных осыпей и обвалов, е) воды отложений морских побережий, ж) воды несквозных и сквозных таликов, подразделяющиеся на речные и озерные, з) межмерзлотные термокарстовые воды спорадического распространения, и) межмерзлотные воды (при ярусном строении многолетнемерзлотных и талых пород) напорные, спорадического распространения и подрусловые.

Особые случаи изучения режима подземных вод. Наряду с изучением естественного режима подземных вод для различных целей народного хозяйства бывает необходимо выяснить, какое влияние оказывают искусственные сооружения и проводимые инженерно-геологические мероприятия на изменение уровня подземных вод. В связи с этим проводится специальное изучение режима подземных вод, методика которого меняется в зависимости от профиля и назначения работ (табл. 28).

Изучение режима подземных вод при гидротехническом строительстве. Известно, что на участках расположения плотин возникает фильтрация в основании и в обход сооружений, в зоне водохранилища образуется подпор подземных вод, а иногда и изменяется направление их движения.

При сооружении плотины в ее основании возникает напорная фильтрация, а в зоне примыкания — безнапорная. По этой причине движение воды в основании плотины и основные характеристики потока (напоры, расход) при наполнении водохранилища очень быстро устанавливаются, достигая нормального подпорного горизонта (НПГ), а в дальнейшем столь же быстро реагируют на изменения горизонта водохранилища при его сработках, паводках и т. п. фильтрация в примыканиях плотин (обходная фильтрация) формируется в течение более или менее длительного периода, в связи с чем особое значение приобретают наблюдения за режимом подземных вод, производимые до начала строительства плотины, а также при наполнении и эксплуатации водохранилища.

Для рационального размещения наблюдательных скважин на участках примыкания плотины необходимо предварительно получить представление о возможных размерах зоны обходной фильтрации в условиях установившегося движения, т. е. в предельных во времени условиях.

При изучении режима подземных вод на участке плотины основными задачами являются: а) установление взаимосвязи между водоносными горизонтами и рекой, б) определение водопроницаемости горных пород в примыканиях плотины к склонам долины, в) получение исходных данных для расчета фильтрации в обход плотины.

Если в основании проектируемой плотины залегают два или более водоносных горизонта, разделенных относительно водоупорными слоями, то для строительства плотины весьма важно установить степень взаимосвязи между этими горизонтами и рекой. Для этой цели выбирают поперечник, по которому на нескольких участках закладывают группы скважин и в каждой скважине уста-

Таблица 28

Классификация факторов режима подземных вод
(по М. Е. Альтовскому)

Генетические группы факторов	Факторы		
	медленно изменяющиеся	быстро изменяющиеся	эпизодические
Климатические	Типы климата	Сезонные осадки, испарение, атмосферное давление, температура воздуха	Ливни, оттепели
Гидрологические	Типы режима рек, озер и морей	Половодья, прибой, приливы и отливы	Паводки, сгон и нагон воды ветрами, ледовые заторы
Геологические	Геологические структуры, тектонические движения, внутренняя теплота земного шара, кинематика земного шара, радиоактивные элементы горных пород	—	Землетрясения, извержения вулканов, грязевые вулканы, оползни
Почвенные	Типы почвообразовательных процессов	—	—
Биогенные	Многовековая транспирация растительных сообществ	Сезонная транспирация растительности	—
Искусственные	—	Осушающие, обводняющие, упругие, термические	—

навливают фильтр в определенном водоносном горизонте. Таким образом, число скважин в группе определяется количеством водоносных горизонтов, подлежащих изучению (табл. 29).

Наблюдения за режимом подземных вод по системе скважин, произведенные в период значительных колебаний уровня воды в реке, позволяют установить,

Таблица 29

Генетические типы режима подземных вод
(по М. Е. Альтовскому)

Гидрогеологические зоны	Типы режима подземных вод	
	зональные	азональные
Грунтовых вод	Ледниковый, мерзлотный, снеговой, дождевой, пустынный	Речной, озерный, морской, карстовый, радиоактивный, искусственный
Глубоких напорных вод	Напорно-проточный, напорно-бессточный	Вулканический, гейзерный, газовый, радиоактивный, искусственный

какие водоносные горизонты и в какой мере реагируют на эти колебания, а в каких режим не зависит от режима реки.

Наблюдения на участках примыкания плотины следует продолжать в период наполнения и эксплуатации водохранилища с целью принятия своевременных мер для улучшения фильтрации (цементационная завеса) или защиты склонов в нижнем бьефе от оползания, а пониженных мест от подтопления (дренирования).

Продолжительность наблюдений за режимом подземных вод неодинакова и меняется в зависимости от поставленных задач. Для получения расчетных данных по определению фильтрационных потерь из водохранилища срок наблюдений может быть ограничен одним годом. Если же наблюдения производятся с целью изучения скорости фильтрации или определения градиентов в нижнем бьефе, то их необходимо продолжать до тех пор, пока фильтрация не приобретет установившийся характер, так как и скорости, и градиенты в нижнем бьефе в период неустановившегося движения возрастают. В этом случае могут потребоваться наблюдения в течение нескольких лет.

Изучение режима при наличии на исследуемой территории водозаборных и других сооружений, влияющих на этот режим. Материал, получаемый при изучении режима грунтовых вод в районах проектируемых или действующих водозаборных сооружений, должен служить основой для проекта производства работ, для правильного выбора места расположения водозаборов, рациональной эксплуатации водозаборов и прогноза возможных при эксплуатации изменений режима грунтовых вод.

Перед строительством водозабора в дополнение к требованиям, изложенным выше, оборудуют наблюдательную сеть, состоящую не менее чем из двух взаимно перпендикулярных поперечников, проходящих через место заложения будущего водозабора по направлению грунтового потока и перпендикулярно к нему. Это необходимо для прогноза развития воронки депрессии водозабора и ее изучения с самого начала эксплуатации, а также для изучения районной воронки депрессии, если водозабор осуществляется в нескольких точках. При этом конечные наблюдательные скважины на поперечниках следует располагать за пределами предполагаемой воронки депрессии с целью увязки и анализа режима грунтовых вод в естественных и нарушенных водозаборами условиях.

При вводе водозаборов в эксплуатацию организуются систематические наблюдения за образованием и развитием воронки депрессии каждого водозабора или районной воронки депрессии всех водозаборов, а также за режимом работы водозаборов. В периоды длительных остановок в работе водозаборных сооружений необходимо проводить наблюдения за восстановлением в них уровня воды.

Режим грунтовых вод может быть нарушен не только водозаборными, но и другими сооружениями (горными выработками с водоотливом, плотинами, дренажными и оросительными каналами, жилыми поселками и промышленными предприятиями, особенно со сбросовыми водами). Каждое такое сооружение или агромелиоративное мероприятие необходимо учитывать и проводить на изучаемой территории наблюдения в соответствии с изложенными выше указаниями.

С особым вниманием следует относиться к выбору и оборудованию для этой цели новых наблюдательных точек, а также к методике наблюдений на них. Эти точки должны быть расположены как в зоне, так и вне зоны влияния искусственных сооружений или агромелиоративных мероприятий, что позволит более полно выявить влияние последних на закономерности изменения режима искусственных сооружений: для водозаборных сооружений (колодцев, буровых скважин, галерей) — времени и продолжительности работы, количества отбираемой воды, для полей орошения — времени полива и его продолжительности, количества и качества воды, поступившей на орошаемый участок, схемы распределения воды, расходуемой на испарение, инфильтрацию, сток и транспирацию растениями; для горных выработок — водоотлива и его режима.

Таблица 30

Нормы выщелачивающей агрессивности — среды*

Условия омывания бетона водой (окружающая среда)	Наименьший поперечный размер (толщина) конструкции, м	Безнапорные сооружения		Напорные сооружения	
		обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые и шлаковые портландцементы	обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые и шлаковые портландцементы
Открытый водоем или грунт с коэффициентом фильтрации более 10 м/сут	Менее 0,5	1,5	0,5	2,0	0,7
	От 0,5 до 2,5	0,75	Не нормируется	1,2	0,4
	Более 2,5	0,4	То же	0,7	Не нормируется
Грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 м/сут	Менее 0,5	0,75	Не нормируется	1,0	0,4
	От 0,5 до 2,5	0,4	То же	0,6	Не нормируется
	Более 2,5	Не нормируется	»	Не нормируется	То же
Грунт с коэффициентом фильтрации менее 0,1 м/сут	Менее 0,5	Не нормируется	Не нормируется	Не нормируется	Не нормируется
	От 0,5 до 2,5	То же	То же	То же	То же
	Более 2,5	»	»	»	»

* При гидрокарбонатной щелочности (мг-экв) ниже приведенных величин считается агрессивной.

Нормы общекислотной агрессивности — среды*

Условия омывания бетона водой (окружающая среда)	Наименьший поперечный размер (толщина) конструкции, м	Безнапорные сооружения		Напорные сооружения	
		обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые и шлаковые портландцементы	обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые и шлаковые портландцементы
Открытый водоем или грунт с коэффициентом фильтрации более 10 м/сут	Менее 0,5	6,7	6,7	7,0	7,0
	От 0,5 до 2,5	6,2	6,4	6,5	6,7
	Более 2,5	5,7	6,0	6,0	6,2
Грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 м/сут	Менее 0,5	6,2	6,4	6,4	6,6
	От 0.5 до 2,5	5,2	5,5	5,7	6,0
	Более 2,5	Не нормируется	Не нормируется	5,2	5,5
Грунт с коэффициентом фильтрации менее 0,1 м/сут	Менее 0,5	Не нормируется	Не нормируется	5,2	5,5
	От 0,5 до 2,5	То же	То же	Не нормируется	Не нормируется
	Более 2,5	»	»	То же	То же

* При значении pH ниже приведенных величин вода считается агрессивной.

Нормы углекислой агрессивности — среды*

Условия омывания бетона водой (окружающая среда)	Наименьший поперечный размер (толщина) конструкции, м	Безнапорные сооружения		Напорные сооружения	
		обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые и шлаковые портландцементы	обычный и сульфатостойкий портландцементы	обычные и сульфатостойкие пуццолановые портландцементы
Открытый водоем или грунт с коэффициентом фильтрации более 10 м/сут	Менее 0,5	5	0	0	0
	От 0,5 до 2,5	20	15	10	5
	Более 2,5	30	25	20	15
Грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 м/сут	Менее 0,5	40	30	25	20
	От 0,5 до 2,5	80	60	50	40
	Более 2,5	Не нормируется	Не нормируется	80	70
Грунт с коэффициентом фильтрации менее 0,1 м/сут	Менее 0,5	Не нормируется	Не нормируется	80	70
	От 0,5 до 2,5	То же	То же	Не нормируется	Не нормируется
	Более 2,5	»	»	То же	То же

* При содержании в воде свободной углекислоты (мг/л) больше величины, определяемой по формуле $a \cdot Ca^{2+} + b + K$, вода считается агрессивной. Содержание Ca^{2+} выражается в мг/л. Значения a и b устанавливаются по специальной таблице.

Оценка качества воды по отношению к бетону. Оценка качества воды по отношению к бетону производится по нормам и техническим условиям Н—114-54 (бетон гидротехнический. Признаки и нормы агрессивности воды — среды введены с 1 апреля 1954 г. взамен ГОСТ 4706-49), а также по СН—249-63.

Для приготовления гидротехнического бетона выбирают цемент, по отношению к которому данная вода как среда не является агрессивной по всем установленным признакам агрессивности. Если вода признается агрессивной по отношению к выбранному цементу, хотя бы по одному признаку, то водостойкость бетона должна быть обеспечена специальными мероприятиями: гидроизоляцией, применением защитных оболочек, снижением степени агрессивности воды, дренажем (табл. 30, 31). При отборе проб воды для определения агрессивности должны быть обеспечены условия, позволяющие получить правильные результаты определения свободной углекислоты, гидрокарбонатной щелочности (ионов HCO_3^-) и pH.

Таблица 31

Значения коэффициентов *a* и *b* для определения углекислой агрессивности воды как среды

Гидрокарбонатная щелочность		Суммарное содержание $Cl^- + SO_4^{-2}$, мг/л											
		0—200		201—400		401—600		601—800		801—1000		более 1000	
мг-экв	градусы жесткости	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
1,4	(4)	0,01	16	0,01	17	0,01	17	0,00	17	0,00	17	0,00	17
1,8	(5)	0,04	17	0,04	18	0,03	17	0,02	18	0,02	18	0,02	18
2,1	(6)	0,07	19	0,06	19	0,05	18	0,04	18	0,04	18	0,04	18
2,5	(7)	0,10	21	0,08	20	0,07	19	0,06	18	0,06	18	0,05	18
2,9	(8)	0,13	23	0,11	21	0,09	19	0,08	18	0,07	18	0,07	18
3,2	(9)	0,16	25	0,14	22	0,11	20	0,10	19	0,09	18	0,08	18
3,6	(10)	0,20	27	0,17	23	0,14	21	0,12	19	0,11	18	0,10	18
4,0	(11)	0,24	29	0,20	24	0,16	22	0,15	20	0,13	19	0,12	19
4,3	(12)	0,28	32	0,24	26	0,19	23	0,17	21	0,16	20	0,14	20
4,7	(13)	0,32	34	0,28	27	0,22	24	0,20	22	0,19	21	0,17	21
5,0	(14)	0,36	36	0,32	29	0,25	26	0,23	23	0,22	22	0,19	22
5,4	(15)	0,40	38	0,36	30	0,29	27	0,26	24	0,24	23	0,22	23
5,7	(16)	0,44	41	0,40	32	0,32	28	0,29	25	0,27	24	0,25	24
6,1	(17)	0,48	43	0,44	34	0,36	30	0,33	26	0,30	25	0,28	25
6,4	(18)	0,54	46	0,47	37	0,40	32	0,36	28	0,33	27	0,31	27
6,8	(19)	0,61	48	0,51	39	0,44	33	0,40	30	0,37	29	0,34	28
7,1	(20)	0,67	51	0,55	41	0,48	35	0,44	31	0,41	30	0,38	29
7,5	(21)	0,74	53	0,60	43	0,53	37	0,48	33	0,45	31	0,41	31
7,8	(22)	0,81	55	0,65	45	0,58	38	0,53	34	0,49	33	0,44	32
8,2	(23)	0,88	58	0,70	47	0,63	40	0,58	35	0,53	34	0,48	33
8,6	(24)	0,96	60	0,76	49	0,68	42	0,63	37	0,57	36	0,52	35
9,0	(25)	1,04	63	0,81	51	0,73	44	0,67	39	0,61	38	0,56	37

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтовский М. Е. Методические указания по составлению гидрогеологических карт масштаба 1 : 1000 000 — 1 : 500 000 и 1 : 200 000—1 : 100 000. М., Госгеолтехиздат, 1960, 51 с.

2. Атлас текстур и структур осадочных горных пород. Обломочные и глинистые породы, ч. II. М., Госгеолтехиздат, 1962. 578 с. Авт.: Е. В. Дмитриева, Г. И. Ершова, Е. И. Орешникова, М. Ф. Викулова и А. В. Хабакова.

3. Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. М., Госгеолтехиздат, 1962, 608 с.
4. Геохронологическая шкала в абсолютном летоисчислении по данным лабораторий СССР на 1960 г. Сер. геол., № 10, М., Изд-во АН СССР, 1960, с. 17—22.
5. Егоров В. В., Соколов О. В., Тарновский Л. Ф. Составление и редактирование карт. М., Геодезиздат, 1962, 239 с.
6. Костенко Н. П. Развитие рельефа горных стран М., «Мысль», 1970, 202 с.
7. Кузнецов Е. А. Петрография магматических и метаморфических пород. Изд. МГУ, 1956, 412 с.
8. Курс метеорологии (физики атмосферы). Под ред. П. Н. Тверской. М. Г. Гидрометеоиздат, 1951, 888 с.
9. Климатический атлас СССР. Т. I и II. Под ред. Ф. Ф. Давитая. М., Гидрометеоиздат, 1960, 287 с.
10. Методическое руководство по гидрогеологической съемке. М., Госгеолтехиздат, 1961, 319 с.
11. Наливкин Д. В. Геология СССР. М., Изд-во АН СССР, 1962, 813 с.
12 Николаев Н. И. Неотектонические структурные формы и их распространение на территории СССР. — «Сов. геология», 1962, № 5, 39 с.
13. Осадочные и вулканогенные формации. М., «Недра», 1966, 146 с.
14. Пиотровский В. В. Геоморфология с основами геологии. М., Геодезиздат, 1961, 28[illegible].
15. Попов И. В. Инженерная геология. Изд. МГУ, 1959, 443 с.
16. Попов В. Н. Организация и производство наблюдений за режимом подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1955, 198 с.
17. Рухин Л. Б. Основы литологии. М., Гостоптехиздат, 1961, 703 с.
18. Спиридонов А. И. Основы общей методики полевых геоморфологических исследований. Ч. III, вып. 2. Изд МГУ, 1966, 302 с.
19. Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. Т. I. М., Изд-во АН СССР, 1960, с. 203—209.
20. Хаин В. Е. Общая геотектоника. М., «Недра», 1964, 477 с.
21. Херасков Н. П. Тектоника и формации. М., «Недра», 1967, 404 с.
22, Щукин Н. С. Общая геоморфология. Т. I. Изд. МГУ, 1960, 615 с.

Глава вторая

ГРУНТОВЕДЕНИЕ

I. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

«Грунты — это любые горные породы и почвы, которые изучаются как многокомпонентные системы, изменяющиеся во времени, с целью познания их как объекта инженерной деятельности человека» [11].

Определение гранулометрического состава связных и несвязных пород. К связным породам относятся глинистые и лёссовые, а к несвязным — песчаные и крупнообломочные. Гранулометрическим составом называют содержание в породе частиц различной крупности (фракций), выраженное в процентах к весу абсолютно сухого образца.

При инженерно-геологических исследованиях размеры фракций подразделяются в соответствии с классификацией В. В. Охотина (табл. 32).

К глинистым относятся породы, у которых содержание глинистых частиц превышает 3%. К лёссовым принадлежат породы, содержащие более 50% частиц размером 0,05—0,005 мм и обладающие высокой пористостью и наличием макропор.

Гранулометрический состав связных пород определяется ареометрическим методом (ГОСТ 12536-67) или методом пипетки. Эти методы основаны на различной скорости оседания частиц в воде. Скорость оседания рассчитывается по формуле Стокса.

Средние пробы для ареометрического анализа отбираются в зависимости от дисперсности пород в количестве: 20 г — для глин, 30 г — для суглинков, 40 г — для супесей.

Для анализа по ГОСТ 12536-67 пользуются стеклянным ареометром, позволяющим измерять плотность суспензий в диапазоне величин от 0,995 до 1,030 г/см^3. Расчет диаметров частиц при ареометрическом анализе осуществляется с помощью номограммы Казагранде, в основу которой положена формула Стокса.

Гранулометрический состав характеризует содержание в породе первичных частиц. Поэтому при подготовке к гранулометрическому анализу пользуются методами, приводящими к предельной диспергации породы, т. е. разрушающими все микроагрегаты, содержащиеся в породе. Для подготовки связных пород к гранулометрическому анализу часто применяется простой и эффективный метод подготовки, заключающийся в растирании породы до состояния пластичного теста с насыщенным раствором пирофосфорнокислого натрия. Рекомендуется также кипячение с аммиаком (в соответствии с ГОСТ 12536-67). Для получения представления о природной дисперсности породы необходимо знать содержание и размер вторичных частиц (микроагрегатов). Подготовка к микроагрегатному анализу предусматривает только механическое воздействие на породу, обеспечивающее сохранение естественных микроагрегатов. Отношение содержания

Таблица 32

Классификация гранулометрических элементов

Порода	Фракции	Размер частиц
Валуны (окатанные) и камни (угловатые)	Крупные	> 80 см
	Средние	80—40 см
	Мелкие	40—20 см
Булыжник, галька (окатанные) и щебень (угловатый)	Булыжник и крупный щебень	20—10 см
	Щебень и крупная галька	10—6 см
	Мелкие галька и щебень	6—4 см
Гравий (окатанный) и хрящ (угловатый)	Крупный	40—20 мм
	Средний	20—10 мм
	Мелкий	10—4 мм
	Очень мелкий	4—2 мм
Песок	Грубый	2—1 мм
	Крупный	1—0,5 мм
	Средний	0,5—0,25 мм
	Мелкий	0,25—0,1 мм
	Тонкий	0,1—0,05 мм
Пыль	Крупная	0,05—0,01 мм
	Мелкая	0,01—0,005 мм
	Иловатая	0,005—0,001 мм
Глина	Собственно глина	1—0,25 мк
	Коллоидная глина	< 0,25 мк

частиц $<0{,}001$ и $<0{,}005$ мм, полученное при гранулометрическом и микроагрегатном анализе, называется коэффициентом агрегированности — $K_{агр}$. Величина коэффициента агрегированности позволяет судить о характере преобладающих структурных связей в породах. Характеристика структурных связей в зависимости от $K_{агр}$ частиц меньше 0,005 мм (по И. М. Горьковой, 1965) следующая:

Величина $K_{агр}$ для частиц < 0,005 мм	Тип структурных связей
1,0—1,2	Стабилизационные и коагуляционные
1,3—2,0	Пластифицированно-коагуляционные
Больше 2,0	Цементационные (конденсационные и кристаллизационные)

Гранулометрический состав несвязных пород определяется, как правило, с помощью ситового анализа (ГОСТ 12536-67), который заключается в последовательном просеивании породы через набор сит и взвешивании материала, остающегося на каждом сите. Для просеивания песчаных пород применяется стандартный набор сит с диаметром отверстий 10;

5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,1 м. Величина навески устанавливается в зависимости от содержания в песчаной породе частиц размером более 2 мм:

Навеска, г	Содержание частиц размером более 2 мм, %
100	$\leqslant 5$
200	5—10
500	10—20
1000	> 20

Содержание каждой выделенной фракции A определяется как отношение массы фракции $g_ф$ к массе воздушно-сухой навески, взятой для анализа $g_н$, выраженное в процентах:

$$A = \frac{g_ф}{g_н} \cdot 100\%.$$

Гранулометрический состав пород для наглядности может быть представлен в виде: 1) кривой гранулометрического состава (интегральной кривой или кривой однородности), построенной в полулогарифмическом масштабе; 2) циклограммы; 3) треугольника Фере. Кривая однородности позволяет подсчитать величину коэффициента неоднородности:

$$K_{\frac{60}{10}} = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

где $K_{\frac{60}{10}}$ — коэффициент неоднородности

d_{60} и d_{10} — диаметры частиц, меньше которых в данной породе содержится соответственно 60 и 10% частиц по весу.

По СН и П II-Б.1-62 при значениях коэффициента неоднородности, превосходящих 3, к наименованию песков гравелистых, крупных и средней крупности добавляют характеристику «неоднородный».

В грунтоведении связные и несвязные породы подразделяются на основании гранулометрического состава наиболее часто в соответствии с классификацией В. В. Охотина.

Определение плотности и объемной массы пород, расчет пористости. Плотностью породы $\gamma_у$ называют отношение массы твердых частиц к их объему. Плотность породы зависит не от ее пористости и влажности, а только от плотности слагающих породу минералов и присутствия органических веществ. Величина плотности песчано-глинистых пород лежит в интервале от 2,5 до 2,8 г/см^3. Меньшие значения плотности имеют породы, содержащие гумус, большие — породы, содержащие тяжелые минералы (пирит, окислы железа). Величина плотности глин, как правило, превышает величину плотности песков. Для приближенных расчетов можно пользоваться средними значениями плотности, полученными Д. Е. Польшиным на основе обработки значений плотности многочисленных образцов. По Д. Е. Польшину, средние значения $\gamma_у$ составляют (в г/см^3): для песков 2,66; для супесей 2,70; для суглинков 2,71; для глин 2,74.

В СССР методика определения плотности пород стандартизирована (ГОСТ 5181-64). По ГОСТу плотность пород определяется пикнометрическим методом. При определении плотности пород, содержащих легководорастворимые соли, вместо воды пользуются аполярной жидкостью — чаще керосином, реже бензином, толуолом. При расчете величины плотности по ГОСТу учитываются: масса воды, масса пикнометра, масса породы. Известен способ

определения плотности обладающий рядом преимуществ перед стандартным методом. Сущность метода сводится к гидростатическому взвешиванию навески сухой породы (~10 г) в керосине. Сухая порода помещается в коническую колбу емкостью 50 мл, заливается керосином и вакуумируется в течение 10 мин. Затем колба почти нацело заполняется керосином и взвешивается на технических весах I класса точности. Расчет величины плотности $\gamma_у$ выполняется по формуле

$$\gamma_у = \frac{g\gamma_к}{g - g_1},$$

где g — масса сухой породы, г;
g_1 — масса сухой породы в керосине, г;
$\gamma_к$ — плотность керосина, г/см³.

Объемная масса влажной породы γ_0 — это масса единицы объема породы при естественной влажности и пористости. Она определяется по формуле:

$$\gamma_0 = \frac{P}{V},$$

где γ_0 — объемная масса влажной породы, г/см³;
P — масса пробы породы, г;
V — объем пробы, см³.

Объемная масса дисперсных пород в большей степени зависит от их пористости и влажности и в гораздо меньшей степени — от минерального состава. Обычно величина объемной массы дисперсных пород лежит в пределах от 1,30 до 2,40 г/см³. Величина объемной массы влажной породы входит в целый ряд формул, применяемых в инженерных расчетах. Объемная масса влажной породы непостоянна и изменяется в зависимости от количества содержащейся в ней воды. Поэтому при проведении определений отмечается влажность породы, при которой определялась объемная масса. Более постоянной величиной является объемная масса скелета породы — масса твердой компоненты в единице объема породы. Объемная масса скелета $\gamma_{ск}$ обычно вычисляется по формуле

$$\gamma_{ск} = \frac{\gamma_0}{1 + 0{,}01 \cdot W},$$

где W — влажность породы, %.

Объемная масса пород ненарушенного сложения обычно определяется следующими стандартными методами.

Метод режущих колец (ГОСТ 5182-64) применяется для некрошащихся связных пород и для песчаных ненарушенного сложения. Метод сводится к вырезанию точного объема породы с помощью стандартного режущего кольца и к взвешиванию его.

Метод парафинирования (ГОСТ 5182-64) применяется для связных пород, склонных к крошению. Сущность метода состоит в простом и гидростатическом взвешивании куска породы округлой формы, покрытого пленкой парафина. Объемная масса песков с нарушенным сложением определяется при двух состояниях: предельно рыхлом и предельно плотном. По объемной массе песков при плотном $\gamma_{ск\ max}$ и рыхлом $\gamma_{ск\ min}$ сложениях судят о способности песка к уплотнению. Чем больше разность $\gamma_{ск\ max} - \gamma_{ск\ min}$, тем выше эта способность. Величины плотности пород и объемной массы скелета используются при расчете пористости породы.

Пористость — это суммарный объем всех пор в единице объема породы, независимо от их величины, заполнения и характера взаимосвязи. Пористость определяется как отношение объема пор в породе $V_п$ ко всему

занимаемому породой объему V, выраженное в процентах: $n = \frac{V_п}{V} \cdot 100\%$, или к объему, занимаемому только грунтовыми частицами V_s, выраженное в долях единицы:

$$\varepsilon = \frac{V_п}{V_s}.$$

Величину n называют пористостью, величину ε — коэффициентом пористости, или приведенной пористостью.

Для расчета величины пористости n и коэффициента пористости ε используют следующие формулы:

$$n = \frac{\gamma_у - \delta}{\gamma_у} \cdot 100\%; \quad n = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}; \quad \varepsilon = \frac{\gamma_у - \gamma_{ск}}{\gamma_{ск}}; \quad \varepsilon = \frac{n}{1-n}.$$

Коэффициент пористости позволяет рассчитать показатель уплотненности связных пород K_d (по В. А. Приклонскому).

Показатели, характеризующие пористость грунтов, часто служат классификационными характеристиками, а также входят в формулы для расчета водопроницаемости и сжимаемости грунтов.

В зависимости от величины коэффициента пористости песчаные грунты делятся на ряд групп по плотности их сложения (табл. 33).

Таблица 33

Классификация песков по плотности в зависимости от величины коэффициента пористости

(по СНиП II-Б. 1-62)

Песчаные грунты	Плотные	Средней плотности	Рыхлые
Пески гравелистые крупные и средней крупности	$\varepsilon < 0{,}55$	$0{,}55 \leqslant \varepsilon \leqslant 0{,}70$	$\varepsilon > 0{,}70$
Пески мелкие	$\varepsilon < 0{,}60$	$0{,}60 \leqslant \varepsilon \leqslant 0{,}75$	$\varepsilon > 0{,}75$
Пески пылеватые	$\varepsilon < 0{,}60$	$0{,}60 \leqslant \varepsilon \leqslant 0{,}80$	$\varepsilon > 0{,}80$

В инженерно-геологической практике для оценки плотности сложения песков применяется так называемый коэффициент плотности D:

$$D = \frac{\varepsilon_{рых л} - \varepsilon}{\varepsilon_{рых л} - \varepsilon_{пл}},$$

где ε — коэффициент пористости песка при естественном или искусственно созданном в насыпи сложении;

$\varepsilon_{рых л}$ — коэффициент пористости при предельно рыхлом сложении;

$\varepsilon_{пл}$ — коэффициент пористости при плотном сложении.

Зависимость коэффициента плотности от характера сложения пород следующая:

Плотность сложения	Коэффициент плотности D
Рыхлое	0,0—0,33
Среднее	0,34—0,66
Плотное	0,67—1,0

Определение влажности и максимальной молекулярной влагоемкости. Влажностью называется отношение массы воды к массе скелета породы (к массе абсолютно сухого грунта) * в данном объеме, выраженное в процентах; естественной влажностью — количество воды, содержащейся в порах пород в условиях их естественного залегания. Методика определения влажности стандартизирована (ГОСТ 5179-64).

Различается весовая (абсолютная) и относительная влажность породы. Влажность, выраженная по отношению к массе абсолютно сухого грунта, представляет *весовую, или абсолютную, влажность W. Относительная влажность* — это отношение массы воды в породе к объему пор; она выражается в долях единицы. Относительная влажность называется также коэффициентом водонасыщения, или степенью водонасыщенности, так как характеризует степень заполнения пор водой.

Расчет весовой влажности W и относительной влажности (коэффициента водонасыщения) G производят по следующим формулам:

$$W=\frac{q_1}{q}\cdot 100\%;\quad G=\frac{W\gamma_y(1-n)}{n},$$

где q_1 — масса воды, г;

q — масса абсолютно сухой породы, г.

При коэффициенте водонасыщения, близком к единице, порода представляет собой двухфазную систему (минеральные частицы + вода); при коэффициенте водонасыщения меньше единицы — трехфазную (минеральные частицы + вода + + воздух).

Песчаные породы классифицируются в зависимости от величины коэффициента водонасыщения (СНиП II-Б. 1-62):

Значение коэффициента G	Характеристика влажности песка
$G \leqslant 0{,}5$	Маловлажный
$0{,}5 < G \leqslant 0{,}8$	Очень влажный
$G > 0{,}8$	Насыщенный водой

Максимальная молекулярная влагоемкость характеризует количество воды, удерживающееся в породе благодаря молекулярным силам сцепления между грунтовыми частицами и водой, т. е. она показывает содержание в породе связанной воды. Эта величина является условной и зависит от методики определения.

Максимальная молекулярная влагоемкость приблизительно соответствует влажности при нижнем пределе пластичности. В лабораторных условиях величина максимальной молекулярной влагоемкости определяется методами влагоемких сред и высоких колонн, иногда методом центрифугирования. Наиболее распространен метод влагоемких сред, он применяется для песчаных и глинистых пород, не содержащих частиц крупнее 0,5 мм. Метод высоких колонн используется для песчаных пород.

Определение пластичности, липкости, набухания и водопрочности. Пластичность — это способность породы под воздействием внешних усилий изменять форму без разрушения или разрыва и сохранять приданную ей форму после устранения действия внешней силы. Пластичность наблюдается в определенном для каждой породы интервале влажности. Влажности,

* Абсолютно сухим называется грунт, высушенный при температуре 105—107° С до постоянной массы.

ограничивающие интервал проявления пластических свойств породы, называются пределами пластичности.

Под верхним пределом пластичности $W_т$ понимается влажность, при увеличении которой порода теряет свои пластические свойства и переходит в текучее состояние (граница текучести). Нижний предел пластичности $W_р$ характеризует минимальную влажность, при которой частицы способны перемещаться относительно друг друга без нарушения сплошности породы (граница раскатывания).

В СССР методика определения верхнего и нижнего пределов пластичности стандартизирована (ГОСТ 5183-64 и 5184-64). Разность между величинами влажности породы при верхнем и нижнем пределах пластичности называется *числом пластичности* $W_п$. Число пластичности является важным показателем и используется при следующей классификации глинистых грунтов:

Порода	Число пластичности
Супесь	$1 \leqslant W_п \leqslant 7$
Суглинок	$7 \leqslant W_п \leqslant 17$
Глина	$W_п > 17$

Деформационное поведение связной породы изменяется в зависимости от содержания в ней воды и характеризуется видами консистенции. Для оценки консистенции пределы пластичности сравниваются с естественной влажностью. Это сопоставление позволяет ориентировочно судить о состоянии пород в естественном залегании.

Для приближенной оценки консистенции связных пород в строительных целях пользуются показателем консистенции B:

$$B = \frac{W - W_р}{W_п}.$$

При $B < 0$ породы называются твердыми, при B от 0 до 1 — пластичными, при $B > 1$ — текучими. Эта классификация весьма условна, так как она не учитывает уменьшения прочности за счет нарушения структуры пород, которое имеет место при определении пределов пластичности. Классификация связных пород по показателю консистенции по СНиП II-Б. 1-62 следующая:

Породы	Показатель консистенции B
Супеси:	
твердые	$B < 0$
пластичные . .	$0 \leqslant B \leqslant 1$
текучие	$B > 1$
Суглинки и глины:	
твердые	$B < 0$
полутвердые .	$0 \leqslant B \leqslant 0{,}25$
тугопластичные	$0{,}25 < B \leqslant 0{,}5$
мягкопластичные	$0{,}5 < B \leqslant 0{,}75$
текучепластичные	$0{,}75 < B \leqslant 1$
текучие	$B > 1$

Л и п к о с т ь — это способность пород при определенном содержании воды прилипать к поверхности различных предметов. Липкость характеризуется тремя показателями: влажностью начального и максимального прилипания (%) и максимальным значением липкости (гс/см²). Количественной характеристикой липкости является усилие (гс/см²), требующееся для отрыва прилипшего предмета от породы при различных ее влажностях. В инженерно-геологической практике для определения липкости применяется прибор Охотина; для научно-исследовательских целей рекомендуется прибор Качинского, позволяющий измерять небольшую липкость (в интервале от 0,1 до 15 гс/см²) при нагрузке до 0,05 кгс/см². Описание этих приборов и методика испытания приводятся в Методическом пособии по инженерно-геологическому изучению горных пород [7]. Величина максимального значения липкости для пород в зависимости от их состава изменяется от 20—30 до 500—550 гс/см² [11]; наиболее часто она составляет 50—200 гс/см². Породы с ненарушенной структурой всегда обладают меньшей липкостью, чем те же породы с нарушенной структурой.

Н а б у х а н и е, — т. е. способность грунта увеличивать объем при увлажнении, — характеризуется тремя показателями:

1) *степенью*, или деформацией, набухания, определяемой по изменению объема, массы или высоты образца:

$$R_v = \frac{V_к - V_н}{V_н} \cdot 100\%; \quad R_g = \frac{g_к - g_н}{V_н \cdot \gamma_в} \cdot 100\%; \quad R_h = \frac{h_к - h_н}{h_н} \cdot 100\%,$$

где R_v, R_g, R_h — степень набухания, определенная соответственно по изменению объема, массы и высоты образца, %;
$V_н$, $V_к$ — начальный и конечный объем образца, см³;
$g_н$, $g_к$ — начальная и конечная масса образца, г;
$h_н$, $h_к$ — начальная и конечная высота образца, мм;
$\gamma_в$ — плотность воды, г/см³;

2) *влажностью набухания* — той влажностью, при которой прекращается процесс поглощения жидкости:

$$W_н = \frac{g_к - g_с}{g_с} \cdot 100\%,$$

где $W_н$ — влажность набухания, %;
$g_к$ — масса полностью набухшего образца, г;
$g_с$ — масса абсолютно сухого образца, г;

3) *давлением набухания* — давлением, которое развивается при невозможности объемных деформаций в процессе набухания породы:

$$P_н = \frac{F}{S},$$

где $P_н$ — давление набухания, кгс/см²;
F — сила набухания, кгс;
S — площадь образца, см².

Наиболее распространено определение степени набухания по изменению высоты образца в приборах ПНГ, серийно выпускаемых нашей промышленностью.

По СНиП II-Б.1-62 к набухающим относятся глинистые породы, у которых значение отношения $\frac{\varepsilon - \varepsilon_f}{1+\varepsilon} < 0{,}4$ (где ε и ε_f — соответственно коэффициенты пористости образца с естественной влажностью и влажностью на границе текучести $\varepsilon_f = \frac{W_f \gamma_у}{100\,\gamma_в}$).

Водопрочность — это способность пород сохранять механическую прочность и устойчивость при взаимодействии с водой; она характеризуется размокаемостью и размываемостью.

Под размокаемостью понимается способность пород при погружении в спокойную воду терять связность и превращаться в рыхлую массу с частичной или полной потерей несущей способности. Размокаемость чаще характеризуют двумя показателями: 1) *временем размокания*, 2) *характером размокания*. В ряде случаев определяют также *влажность размокшего образца*. Для определения размокаемости рекомендуется применять прибор ПР конструкции Знаменского-Хаустова. Кубик породы со стороной 2,5 см помещают на сетке с квадратными отверстиями 1 × 1 см в сосуд с водой, отмечают характер распада образца (форма и размер структурных отдельностей). Размокание считают достигнутым, когда образец полностью провалится сквозь сетку на дно сосуда.

Под размываемостью пород понимают их способность отдавать агрегаты и элементарные частицы движущейся воде, воздействующей на поверхность грунтовой толщи. Определение размываемости проводится в гидравлических лотках.

Определение коэффициента фильтрации. Фильтрацией называется движение воды в породах под действием напора.

Коэффициент фильтрации $K_ф$ является основной характеристикой водопроницаемости пород; он равен скорости движения воды при градиенте напора, равном единице. Для определения коэффициента фильтрации пород в лабораторных условиях имеется целый ряд приборов.

В последнее время определение коэффициента фильтрации песчано-глинистых пород производится с помощью универсальной трубки К-01, изготовляемой заводом «Нефтеавтоматика». Универсальная трубка позволяет проводить опыты в условиях установившегося движения при напорных градиентах, лежащих в пределах от 0,1 до 1,0. Применяется чаще всего для песчаных пород.

Коэффициент фильтрации рассчитывается в соответствии с законом Дарси по формуле

$$K_ф = \frac{Q \cdot 864}{TFrI} \text{ м/сут},$$

где Q — объем профильтровавшейся воды, см³;
T — время фильтрации, с;
F — площадь поперечного сечения образца, см²;
I* — напорный градиент;
r** — температурная поправка;
864 — коэффициент пересчета см/с на м/сут.

Из числа приборов, позволяющих проводить определение коэффициента фильтрации с переменным напором, в условиях неустановившегося движения, в настоящее время серийно выпускаются промышленностью приборы марки ПВ-2 и Ф-1М. Эти приборы применяются в основном для определения коэффициента фильтрации связных пород.

В приборе Ф-1М водопроницаемость определяется в кольце объемом 150 или 200 см³. Расход профильтровавшейся воды рассчитывается по повышению уровня воды в одном пьезометре или по его понижению в другом.

Прибор Ф-1М позволяет создавать любые градиенты в интервале от <1 до 50, что особенно важно при определении $K_ф$ таких слабоводопроницаемых пород, как глинистые, в которых при малых напорах фильтрации может вообще не происходить.

Для глинистых пород существует понятие *начального градиента* или *градиента порога фильтрации* $I_{нач}$.

---

* $I = \frac{H}{L}$, где H — разность напоров; L — длина пути фильтрации.

** $r = 0{,}7 + 0{,}03t°$.

Начальный градиент — это некоторая определенная для данной породы величина напора, до достижения которой в глинистых породах не может начаться процесс фильтрации. Наиболее высоким значением $I_{нач}$ обладает монтмориллонит, а наиболее низким — каолинит. Водопроницаемость некоторых пород неодинакова в вертикальном и горизонтальном направлениях. У лёссовых пород коэффициент фильтрации значительно больше в вертикальном направлении, чем в горизонтальном, а у ленточных глин — наоборот.

Определение угла естественного откоса. Углом естественного откоса песков называют угол, образуемый поверхностью песчаного конуса с горизонтальной плоскостью при свободном высыпании песка на плоскость; он определяется с помощью приборов различных конструкций — УО, УВТ, УЕО. Угол естественного откоса песков является весьма грубым приближением к углу внутреннего трения и лишь в частном случае, когда давление на частицы песка очень мало и определяется только весом частиц, приблизительно равен ему.

Определение угла естественного откоса проводится в воздушно-сухом состоянии и под водой.

При расчете устойчивости реальных откосов из несвязных пород следует ориентироваться на наименьшее значение угла откоса, которое получается в результате увлажнения или динамического воздействия.

Определение сжимаемости и сопротивления сдвигу песчано-глинистых пород. С ж и м а е м о с т ь ю породы называют ее способность к уменьшению объема под воздействием нагрузки.

При сжатии породы вертикальной нагрузкой в условиях свободного бокового расширения — при о д н о о с н о м с ж а т и и, — *относительной деформацией* e называют отношение величины абсолютного уменьшения высоты нагруженного образца Δh к его начальной высоте h_0; эти величины связаны уравнением

$$e = \frac{\Delta h}{h_0}.$$

Зависимость между напряжением σ и величиной относительной деформации e при нагрузках, меньших предела пропорциональности, определяется выражением:

$$\sigma = Ee, \text{ (закон Гука)},$$

где E — модуль упругости.

При сжатии образца вертикальной нагрузкой происходит увеличение диаметра d_0 его поперечного сечения на абсолютную величину Δd. Отношение $e_п = \frac{\Delta d}{d_0}$ есть *относительная деформация в поперечном направлении.* Отношение $e_п/e = \mu$ для данного материала является величиной постоянной и называется *коэффициентом поперечной деформации — коэффициентом Пуассона.* Коэффициент Пуассона для разных пород имеет следующие значения (по СНиП II-Б.1-62):

Породы	Значения μ
Крупнообломочные . .	0,27
Пески и супеси . . .	0,30
Суглинки	0,35
Глины	0,42

В том случае, если образец породы сжимается в жесткой обойме, препятствующей возникновению поперечных деформаций, возникает *компрессионное сжатие*; зависимость между напряжением и относительной деформацией будет несколько иной:

$$\sigma = E_к e,$$

где

$$E_к = \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \cdot E.$$

Величина $E_к$ называется *компрессионным модулем упругости*, который обычно больше модуля упругости. При сжатии породы вертикальной нагрузкой возникает напряжение $\sigma_б$ стенки обоймы испытывают боковое давление, равное $\sigma_б$. Отношение $\frac{\sigma_б}{\sigma} = \frac{\mu}{1-\mu}$ называется коэффициентом *бокового распора* и обозначается ξ.

В общем случае порода, находящаяся в основании сооружения, испытывает всестороннее — трехосное сжатие. Возникшие при этом деформации, происходящие в трех взаимно перпендикулярных направлениях (оси главные), подчиняются обобщенному закону Гука:

$$e_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)];$$

$$e_2 = \frac{1}{E}[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)];$$

$$e_3 = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)].$$

Величину компрессионного сжатия породы определяют в компрессионных приборах. Применяются приборы Всесоюзного гидрогеологического треста (конструкции Знаменского), МОСГИДЭПа (конструкции Лурье), Н. Н. Маслова, МГРИ, Гидропроекта, ЦНИИ МПС и др. Испытания (в общей схеме) производятся в следующем порядке.

Образец, помещенный в компрессионный прибор-одометр, последовательно нагружают, причем нагрузка последующей ступени, как правило, в два раза превышает нагрузку предыдущей. На каждой ступени нагрузки образец выдерживают до стабилизации уплотнения. При изучении упругих свойств и получения кривой набухания производят разгрузку образца (теми же ступенями). Обычно применяются следующие ступени нагрузки: 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 кгс/см². Для слабоуплотненных пород первую ступень нагрузки уменьшают до 0,125 или 0,250 кгс/см², для плотных — увеличивают до 1—2 кгс/см². Возникающие деформации замеряют с помощью индикатора с ценой деления 0,01 мм. На каждой ступени нагрузки проводится ряд замеров: в момент приложения нагрузки и последовательно через 5, 10, 20, 30 мин и через 1, 2, 3, 6 ч. Затем деформации замеряют в начале и в конце рабочего дня. Принято считать, что уплотнение на данной ступени нагрузки достигло стабилизации, если разница в отчетах по индикатору составляет не более 0,01 мм/сут — для глин, а для суглинков за 12 ч.

По полученным значениям строят график зависимости $e = f(\sigma)$. Кривую сжимаемости также строят в виде зависимости $\varepsilon = f(\sigma)$, где ε — коэффициент пористости, соответствующий законченной во времени деформации от данной ступени нагрузки σ. Значение коэффициента пористости, соответствующее данной ступени нагрузки и данной относительной деформации, находят по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - e(1 + \varepsilon_0),$$

где ε_0 — начальный коэффициент пористости.

Характеристикой сжимаемости обычно служит наклон кривой (спрямленной) в некотором выбранном диапазоне нагрузок. Он характеризуется *коэффициентом уплотнения a*, который вычисляется из отношения

$$a = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_1} \text{ см}^2/\text{кг},$$

где σ_1 и σ_2 — нагрузка в начале и в конце спрямленного участка;

ε_1 и ε_2 — коэффициенты пористости, соответствующие нагрузкам σ_1 и σ_2.

По величине коэффициента уплотнения глинистые породы относятся к сильносжимаемым ($a > 0{,}1$) и к практически несжимаемым ($a > 0{,}001$).

Для характеристики сжимаемости часто используют *модуль общей деформации* E_0, который определяется из равенства

$$E_0 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{e_2 - e_1},$$

где e_1 и e_2 — относительные деформации, соответствующие нагрузкам σ_1 и σ_2. Модуль общей деформации связан с коэффициентом уплотнения следующей зависимостью:

$$E_0 = \frac{1 + \varepsilon}{a}.$$

В инженерно-геологической практике в качестве показателя сжимаемости часто используют *модуль осадки* e_p — фактическую величину относительной вертикальной деформации:

$$e_p = 1000 \frac{\Delta h}{h_0} \text{ мм/м}.$$

Модуль осадки показывает величину сжатия в миллиметрах слоя породы высотой 1 м при приложении к нему дополнительной нагрузки P (табл. 34).

Таблица 34

Классификация пород по величине модуля осадки при $P = 3$ кгс/см²
(по Н. Н. Маслову)

Модуль осадки, мм/м	Характеристика сжимаемости	Категория породы по сжимаемости
< 1	Практически несжимаемый	0
1—5	Слабосжимаемый	I
5—20	Среднесжимаемый	II
20—60	Повышенносжимаемый	III
> 60	Сильносжимаемый	IV

Существует несколько методов определения величины деформации образца при компрессионных испытаниях: весовой — по изменению массы образца; объемный — по изменению объема образца; высотный — измерение деформаций образца по индикатору.

В настоящее время принято вести расчет компрессии по данным непосредственных измерений деформаций образца (высотный метод) с последующей корректировкой полученных данных по объемному методу или по методу трех кривых.

Непременным условием проведения компрессионных испытаний является моделирование работы породы в натуре. В зависимости от вида породы и условий строительства применяются различные схемы испытаний. К основным схемам проведения компрессионных испытаний относятся:

1. Изучение сжимаемости образцов естественной структуры при естественной влажности без заливки водой с предохранением образца от высыхания.
2. Изучение сжимаемости образцов естественной структуры после пребывания их в воде без возможности набухания (под арретиром).
3. Изучение сжимаемости пород до определенного давления при естественной влажности, а затем после насыщения водой.

Процесс уплотнения породы во времени при постоянной нагрузке называется консолидацией и характеризуется зависимостью $e = f(t)$. График зависимости $e = f(t)$ называется *кривой сжатия* или *кривой консолидации*.

Консолидация породы характеризуется *степенью* ее консолидации: $Q = e_t/e_\infty$, где e_t и e_∞ — относительная деформация соответственно в данный момент времени и при времени t, равном бесконечности. Влияние на процесс консолидации основных факторов отражается на величине коэффициента консолидации C_v:

$$C_v = \frac{K_\Phi (1+\varepsilon)}{a\,\gamma_в},$$

где K_Φ — коэффициент фильтрации;
ε — коэффициент пористости;
a — коэффициент сжимаемости;
$\gamma_в$ — объемная масса воды.

Просадочность — способность некоторых пород резко уменьшать свой объем (давать значительные и сравнительно быстро протекающие дополнительные осадки) при замачивании их водой при определенном давлении.

Просадочность — типичное свойство лёссов и лёссовидных пород. Однако оно может наблюдаться и в мерзлых породах при их оттаивании, и в сухих мелкозернистых песках при их увлажнении. Значение просадочности определяется в компрессионных приборах. Компрессионная кривая просадочной породы имеет характерный вид в результате скачкообразного изменения коэффициента пористости при замачивании. Степень просадочности лёссовых пород оценивается по величине *относительной просадочности* из отношения

$$i_p = \frac{h_p - h'_p}{h_p},$$

где h'_p — высота образца породы после уплотнения нагрузкой P, кгс/см²;
h_p — высота образца породы после замачивания под той же нагрузкой.

При $i_p \geqslant 0{,}02$ порода считается просадочной. Просадочность может характеризоваться также изменением коэффициента пористости в результате замачивания породы под нагрузкой P кгс/см²:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p - \varepsilon'_p,$$

где ε_m — коэффициент макропористости;
ε_p — коэффициент пористости до замачивания;
ε'_p — коэффициент пористости после замачивания.

Коэффициент просадочности можно рассчитать также по формуле

$$i_m = \frac{\Delta h_2}{h - \Delta h_1},$$

где h — высота образца породы до испытания;
Δh_1 — уменьшение высоты образца породы при естественной влажности под нагрузкой P кгс/см²;
Δh_2 — уменьшение высоты образца породы под той же нагрузкой после замачивания.

Значения i_p, ε_m и i_m различны при разных нагрузках, поэтому для получения сравнимых характеристик породы принято определять просадочность при стандартной нагрузке 3 кгс/см². Для прогноза величины просадки ее определяют в зависимости от нагрузок, имеющих место в действительности.

По СНиП II—Б.1—62 к просадочным относятся глинистые породы, у которых степень влажности $G \leqslant 0{,}6$ и значение $\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_т}{1+\varepsilon_0} \geqslant -1$, где ε_0 и $\varepsilon_т$ —

соответственно коэффициенты пористости породы в естественном состоянии и при влажности на пределе текучести.

По СНиП II-Б.2-62 лёссовые отложения подразделяются в зависимости от проявления просадки породы от ее собственного веса при замачивании на два типа: I тип грунтовых условий — просадка породы от собственного веса практически отсутствует или не превышает 5 см; II тип грунтовых условий — может быть просадка породы от собственного веса и величина ее превышает 5 см. Это деление является сугубо ориентировочным.

С о п р о т и в л е н и е с д в и г у. Прочностные свойства пород определяются целым рядом показателей, относящихся к категории прямых расчетных показателей. Они непосредственно используются при различных инженерных расчетах для оценки несущей способности и устойчивости пород. К числу прямых расчетных показателей прочностных свойств относятся следующие: сцепление C, *коэффициент и угол внутреннего трения* $\operatorname{tg}\varphi$ и φ, *сопротивление сдвигу* τ, *коэффициент и угол сдвига* $\operatorname{tg}\psi$ и ψ, *временное сопротивление сжатия* σ_0. Все эти показатели могут быть получены при изучении прочности пород лабораторными методами.

Прочность пород характеризуется способностью сопротивляться сдвигающим усилиям (сопротивлением сдвигу).

С д в и г о м называется процесс деформации и разрушения породы вследствие смещения одной ее части относительно другой. Сдвиг по данной площадке вызывается касательными напряжениями к ней. Сопротивлением сдвигу называется минимальная величина касательных напряжений, вызывающая сдвиг. Сопротивление сдвигу зависит от величины вертикальной (нормальной) нагрузки σ, приложенной к образцу. В настоящее время прочность пород оценивается в основном по теории Мора. Согласно этой теории разрушение тела происходит при определенном предельном соотношении нормальных и касательных напряжений.

Для данного состояния породы каждому значению нормальной нагрузки σ (кгс/см^2) соответствует свое значение сдвигающего усилия τ (кгс/см^2), отнесенного к единице поперечного сечения образца. Предельное состояние для любой породы по теории Мора определяется некоторой кривой в плоскости $\sigma - \tau$. Зависимость $\tau = f(\sigma)$ называют *диаграммой сдвига*, *паспортом прочности* или *предельной огибающей Мора*. Условием разрушения является касание предельной огибающей круга Мора, построенного на разности максимального и минимального главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$ — трехосное сжатие (рис. 6). При $\sigma_3 = 0$ и $\sigma_1 = \sigma_0$ круг Мора касается оси ординат; это указывает на существование в породе одноосного напряженного состояния (рис. 6, *а*). В общем случае диаграмма сдвига является криволинейной. В механике грунтов обычно аппроксимируют предельную огибающую прямой, так как кривизна ее в пределах наиболее часто встречающихся в строительной практике нагрузок весьма незначительна. Прямая (рис. 6, *б*) определяется уравнением Кулона

$$\tau = C_0 + \sigma \operatorname{tg}\varphi.$$

При значениях напряжений, которые на графике лежат выше этой кривой (прямой), породы разрушаются. Величины C_0 (сила сцепления на единицу площади сдвига) и φ являются параметрами данной породы. Они носят условный характер. В этом случае сопротивление сдвигу можно рассматривать как состоящее из двух частей: величины, не зависящей от вертикального давления (C_0) и сопротивления внутреннего трения, и величины, зависящей от вертикального давления. Принимается, что в связных породах сопротивление сдвигу обусловлено силами внутреннего трения и сцепления, а в несвязных — только силами внутреннего трения ($C_0 = 0$). При $C_0 = 0$ уравнение Кулона приобретает вид

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}\varphi,$$

а прямая проходит через начало координат (рис. 6, *в*). Если известна предельная огибающая, то могут быть найдены другие показатели прочности: коэффициент сдвига

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\tau}{\sigma}$$

и временное сопротивление сжатию σ_0.

Временное сопротивление сжатию (для глинистых пород эту величину называют также сопротивлением раздавливанию) — простейшая характеристика

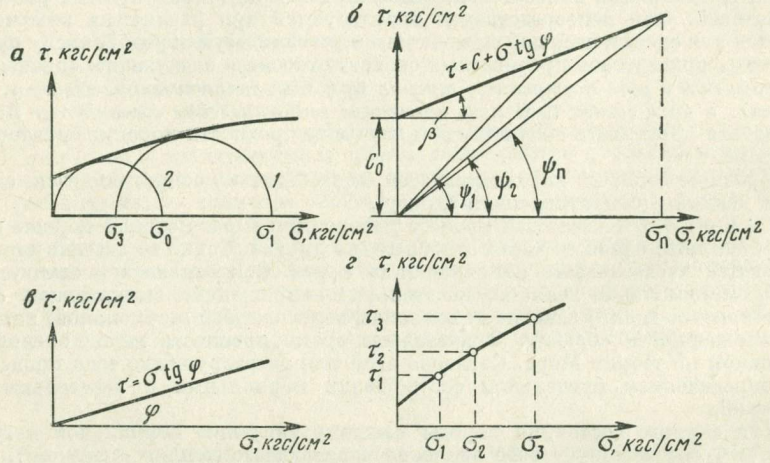


Рис. 6. Предельные огибающие для пород

а — условие разрушения напряженного образца; *1* — при трехосном сжатии, *2* — при одноосном сжатии; *б* — диаграмма сдвига глинистых пород; *в* — диаграмма сдвига песчаных пород; *г* — построение предельной огибающей методом одноплоскостного среза

прочности породы. В инженерно-геологической практике величиной временного сопротивления сжатию характеризуют так называемую механическую прочность.

На характер предельной огибающей для водонасыщенных пород весьма существенное влияние оказывают условия оттока воды. Общепринятой величиной, отражающей влияние этих факторов, в настоящее время является поровое давление. С учетом порового давления уравнение Кулона приобретает вид

$$\tau = C_0 + \sigma_э \operatorname{tg}\varphi; \quad \sigma_э = \sigma - P,$$

где $\sigma_э$ — эффективное напряжение (напряжение, воспринимаемое скелетом породы);

P — поровое давление (давление в свободной воде, содержащейся в порах породы).

В лабораторных условиях сопротивление сдвигу пород определяется тремя основными методами: методом среза (чаще всего одноплоскостного), методом одноосного сжатия и методом трехосного сжатия. Первый метод позволяет определять лишь сопротивление сдвигу. Второй и третий методы дают возможность определять как сопротивление сдвигу, так и сжимаемость.

Следует иметь в виду, что факторы, способствующие консолидации (хороший водоотток, медленный рост нагрузки, предварительное уплотнение и т. п.),

во всех случаях увеличивают прочность породы — дают более высокое расположение предельной огибающей. Поэтому даже в пределах одного метода условия испытания должны выбираться с учетом реальных условий работы породы в основаниях сооружений, откосах выемок и т. п. В настоящее время для каждого метода определения сопротивления сдвигу разработан ряд стандартных схем испытаний.

Методика и аппаратура для определения сопротивления сдвигу выбираются также с учетом текстурно-структурных особенностей пород. Так, одноплоскостной срез можно рекомендовать для испытания слоистых пород с ослабленными связями по плоскостям напластования, в которых при взаимодействии с сооружением действительно может проявиться плоский сдвиг, а также для оценки устойчивости сооружений по схеме плоского сдвига. В остальных случаях (при изотропном строении грунтовой толщи, при моделировании выпора грунта из-под подошвы сооружения и др.) более достоверные данные о прочности могут быть получены путем испытаний в стабилометрах. При выборе методики определения сопротивления сдвигу полезно учитывать соотношение между величинами структурной прочности пород и интенсивности внешнего воздействия на породу, что позволит более обоснованно подойти к выбору нагрузки предварительного уплотнения и нагрузки при опыте.

Выбор метода исследования прочности в большой степени зависит также от стадии изысканий. При региональных исследованиях, выполняемых на этапе перспективного проектирования, основным методом оценки может стать метод одноосного сжатия. Вследствие своей несложности и быстроты выполнения определений этот метод может быть весьма эффективным при сравнительной оценке прочностных свойств пород на больших территориях.

При детальных исследованиях, выполняемых на этапе строительного проектирования, вопросы, связанные с моделированием условий, можно решить при испытании пород методом трехосного сжатия.

В практике отечественных инженерно-геологических лабораторий из перечисленных методов широко применяется только метод одноплоскостного среза. Объясняется это частично тем, что до последнего времени нашей промышленностью серийно выпускались лишь сдвиговые приборы.

О д н о п л о с к о с т н о й с р е з. Одноплоскостным срезом называется прямой срез образца породы по фиксированной плоскости. Известно несколько конструкций приборов одноплоскостного среза. Наиболее распространен прибор одноплоскостного среза (модель ГГП-30) конструкции Маслова — Лурье в модернизации Гидропроекта. Прибор изготовляется мастерскими Гидропроекта и на заводе «Нефтеавтоматика». Этими же заводами выпускаются уплотнители марки ГГП-29 для одновременного уплотнения 12 образцов. Конструкция прибора ГГП-30 позволяет производить сдвиг путем непосредственного приложения к образцу сдвигающего усилия, а при испытании мягкопластичных разностей, обладающих малым сопротивлением сдвигу, — путем наклона нагруженного образца. Максимальная допустимая вертикальная нагрузка составляет 12 кгс/см^2, а максимальное сдвигающее усилие — 10 кгс/см^2. Образец породы, помещенный в разъемное кольцо и затем в обойму (также разъемную), сдвигается усилием τ при вертикальной прижимающей нагрузке. При заданном вертикальном напряжении σ определяют линейное сдвигающее напряжение τ, при котором возникает незатухающее скольжение одной части образца по другой. По полученным парам значений σ и τ строят предельную огибающую — диаграмму сдвига (см. рис. 6, *г*), отвечающую выражению

$$\tau = C_0 + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

(для глинистых пород) и

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

(для песчаных пород). Для получения достоверной диаграммы сдвига сопротивление сдвигу, как правило, определяется при трех разных вертикальных

нагрузках — σ_1, σ_2, σ_3. Сдвигающую нагрузку τ увеличивают ступенями, величина которых определяется выбранной схемой испытаний и характером породы. В результате испытаний получают диаграмму сдвига. Значения $\operatorname{tg}\varphi$ и C_0 вычисляют путем обработки экспериментально полученных значений τ и σ по методу наименьших квадратов. В зависимости от задач исследований выбирают ту или иную схему испытаний на сдвиг методом среза. Из всей совокупности схем можно выделить две основные: испытания по схемам неконсолидированного и консолидированного сдвига (рис. 7).* Сдвиг по схеме 1 проводят без предварительного уплотнения образцов с сохранением естественной влажности и плотности в процессе опыта. В природных или искусственно созданных условиях эта схема соответствует или работе породы под воздействием собственного веса (в карьерах, откосах насыпей и выемок, на оползневых склонах), или наличию переуплотненной породы, на которой не сказывается приложение внешней нагрузки.

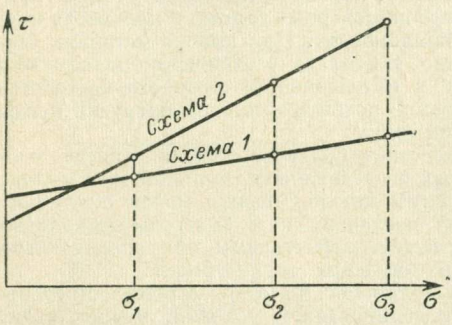


Рис. 7. Предельные огибающие для испытаний по схемам неконсолидированного (схема 1) и консолидированного (схема 2) сдвига

Консолидированный сдвиг (схема 2) проводят после предварительного уплотнения образцов разными нагрузками до полной стабилизации. Он осуществляется при нагрузках, равных нагрузкам предварительного уплотнения. Такой сдвиг позволяет оценить поведение породы в основаниях сооружений при их длительной эксплуатации. Известны также промежуточные схемы испытаний. В зависимости от скорости приложения сдвигающего усилия различают быстрый, ускоренный, замедленный и медленный сдвиги.

Кроме того, существует целый ряд специальных схем, назначение которых предусматривается особым заданием: сдвиг по заготовленной плоскости, сдвиг после предварительного уплотнения (или набухания) под проектной нагрузкой, сдвиг после частичной разгрузки, сдвиг глинистых пород с нарушенной структурой. Из сдвиговых приборов широко известна портативная модель сдвигового прибора ВСВ-1 (настольного типа) конструкции Гидропроекта, завод-изготовитель УЭРМЗ. Выпускается малыми сериями, применяется как в лабораторных, так и в полевых условиях.

О д н о о с н о е с ж а т и е. В практике лабораторных и полевых инженерно-геологических изысканий целого ряда зарубежных стран повсеместно используется чрезвычайно простой и в то же время в достаточной степени информативный метод изучения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии образцов. До самых последних лет этот метод не находил сколько-нибудь заметного применения в инженерно-геологических изысканиях, проводимых в Советском Союзе.

Метод одноосного сжатия является стандартным при определении механической прочности пород, характеризующейся временным сопротивлением сжатию. Этим методом можно также определять сопротивление сдвигу и устанавливать типы деформаций пород и показатели их деформируемости.

Одноосным называется сжатие образца в условиях свободного бокового расширения ($\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$). Цилиндрический образец породы, последовательно увеличивающейся нагрузкой доводят до разрушения. Рассчитывают напряжение, при котором произошло разрушение или началось интенсивное

* Испытания по схеме консолидированного сдвига в настоящее время гостированы.

течение образца — σ_0 кгс/см² — временное сопротивление сжатию. Вычисление σ_0 производится по формуле

$$\sigma_0 = \frac{F}{S} \text{ кгс/см}^2,$$

где F — разрушающее усилие на образец, кгс;

S — площадь среднего по высоте сечения в момент разрушения, см².

При хрупком типе разрушения S практически равно S_0. При пластическом и хрупко-пластическом типах разрушения можно принимать

$$S = \frac{S_0}{4}\left(3\sqrt{\frac{1}{1-e_1}} - 1\right)^2,$$

где S_0 — начальная площадь сечения;

e_1 — относительная продольная деформация в момент разрушения в долях единицы.

Определенная величина временного сопротивления сжатию (одноосного предела текучести, сопротивления раздавливанию, прочности на одноосное сжатие) является важной характеристикой прочностных свойств грунта и может использоваться в самых различных целях.

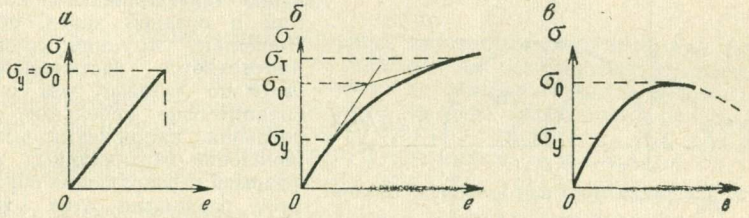


Рис. 8. Диаграмма сжатия породы

а — хрупкой; *б* — пластичной; *в* — хрупко-пластичной

В ходе опыта может быть записана диаграмма «продольная деформация — напряжение» ($\varepsilon = f(\sigma)$), позволяющая определять модули общей деформации и упругости E_0 и E и тип деформационного поведения породы.

По характеру поведения образца в процессе деформации, включая и поведение после момента разрушения, целесообразно выделить следующие пять типов деформаций глинистых пород при одноосном сжатии: хрупкий, хрупко-вязкий, хрупко-пластический, пластическо-вязкий и пластический. Основные три типа деформаций (хрупкий, пластический и хрупко-пластический) легко выделяются по характеру диаграммы $\varepsilon = f(\sigma)$ (рис. 8). При хрупком типе разрушения деформация образца при сжатии носит упругий характер до величины предела упругости σ_y; затем наступает быстрое разрушение образца с потерей сплошности и прочности. Практически предел упругости для хрупких образцов совпадает с пределом прочности $\sigma_y = \sigma_0$. При пластическом типе разрушения вслед за пределом упругости σ_y наступает пластическое течение, не приводящее к разрушению образца. Если не происходит нарушения целостности образца, то усилие растет пропорционально увеличению площади его сечения, а диаграмма $\varepsilon = f(\sigma)$ с момента, соответствующего пределу текучести $\sigma_т$, представляет собой наклонную прямую. Фактически деформация в этом случае протекает при постоянном отношении усилия к площади поперечного сечения, без увеличения нагрузки.

Если упругие свойства грунта незначительны, то участок пропорциональности деформаций нагрузкам ($0\ \sigma_y$) невелик, и диаграмма сжатия с самого начала носит криволинейный характер, подобный участку $\sigma_y - \sigma_т$.

В тех случаях, когда при разрушении четко выявляется плоская площадка скольжения, метод одноосного сжатия позволяет определять величины сцепления C_0 и угла внутреннего трения φ_0. С этой целью замеряют угол наклона поверхности площадки α к горизонтали. По определенным величинам σ_0 и α находится прямолинейная огибающая диаграмма Мора (рис. 9):

$$C_0 = \frac{\sigma_0}{2 \operatorname{tg} \alpha}; \quad \varphi = 2\alpha - 90°.$$

При малых углах внутреннего трения, когда $\alpha = 45°$, а $\varphi = 0$, сцепление численно равно сопротивлению сдвигу, т. е.

$$C = \frac{\sigma_0}{2} = \tau.$$

Эту зависимость широко используют в зарубежной практике для получения расчетных показателей сопротивления сдвигу мягких глинистых пород. Для некоторых пород, например для лёссовидных суглинков, возможно разрушение хрупкого образца по плоскостям, параллельным оси образца. Это является следствием неоднородности напряженного состояния образца, а именно — появления растягивающих тангенциальных напряжений в средней части образца. Поскольку хрупкий грунт сопротивляется растяжению значительно меньше, чем сжатию, сравнительно небольшие растягивающие напряжения вызывают появление вертикальных трещин разрыва и разрушение образца за счет раскрытия этих трещин. В некоторых случаях площадка скольжения формируется в виде комбинации вертикальных и наклонных поверхностей скола. При этом среднее значение угла α для площадки оказывается завышенным, что приводит к завышению угла φ. Это является одной из причин, по которым определение угла внутреннего трения методом одноосного сжатия дает для некоторых определенных типов грунтов существенные ошибки.

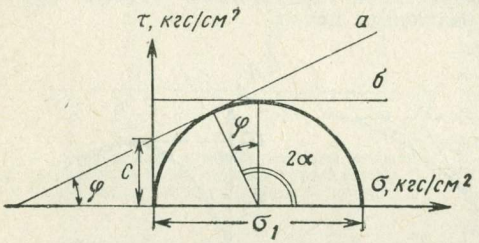


Рис. 9. Диаграмма Мора при одноосном сжатии: $а$ — $\varphi \neq 0$; $б$ — $\varphi = 0$

Одноосное сжатие выполняют на образцах дисперсных пород, способных держать вертикальные стенки. Испытаниям подвергают образцы с ненарушенной и нарушенной структурой (в виде паст заданной плотности и влажности) с отношением диаметра к высоте 1 : 2 или 1 : 1,5. Породы со скрытотекучей консистенцией (типа ильдиевых глин) и мягкопластичатые рекомендуется испытывать на более низких образцах ($d : h = 1 : 1{,}5$) во избежание искажения результатов за счет потери устойчивости вследствие изгиба образцов. Время проведения стандартных испытаний на одноосное сжатие составляет не более 5—7 мин. Однако скорость проведения опыта на сжатие в зависимости от задач исследований может изменяться.

Отношение величины временного сопротивления сжатию образца с естественной структурой $\sigma_е$ к величине сопротивления сжатию образца с нарушенной структурой $\sigma_н$ с той же плотностью и влажностью называется коэффициентом структурной прочности $K_{с.п} = \frac{\sigma_е}{\sigma_н}$ (по Гольдштейну) или чувствительностью (по Скемптону). По степени чувствительности породы подразделяются на три

группы (по Ю. Г. Трофименкову): малочувствительные $K_{с.п} = 1—4$; чувствительные $K_{с.п} = 4—8$; сверхчувствительные $K_{с.п} > 8$.

Более жесткие количественные критерии прочности структурных связей дает величина, обратная чувствительности, — показатель структурной прочности $L = \frac{\sigma_н}{\sigma_е}$. По величине показателя структурной прочности Г. К. Бондарик разделяет глинистые породы на следующие группы:

Значение показателя структурной прочности L	Прочность структурных связей
> 1	Отсутствует
1—0,5	Низкая
0,5—0,2	Средняя
0,2—0	Высокая

По прочности на одноосное сжатие (по Терцаги и Пеку) выделяются следующие типы консистенции глинистых пород:

Консистенция	Прочность, кгс/см²
Очень мягкая . . .	$< 0,25$
Мягкая	0,25—0,5
Среднежесткая . . .	0,5—1,0
Жесткая	1,0—2,0
Очень жесткая . . .	2,0—4,0
Чрезвычайно жесткая	$> 4,0$

Такая оценка консистенции содержит характеристики, которыми можно пользоваться лишь с учетом геолого-генетических особенностей исследуемых пород. В ряде случаев величина прочности на одноосное сжатие используется для непосредственной оценки предельной несущей способности пород. При этом предельная несущая способность на единицу площади (g_d, g_{dr}, g_{do}) определяется соотношениями: для ленточного фундамента $g_d = 2,85\sigma_p$; для круглого или квадратного фундамента $g_{dr} = 3,7\sigma_p$; для прямоугольного или удлиненного фундамента, имеющего ширину B и длину L $g_{do} = 2,85\sigma_p \left(1 + 0,3\frac{B}{L}\right)$, где σ_p — временное сопротивление сжатию, кгс/см² (прочность на одноосное сжатие).

Метод одноосного сжатия для глинистых пород может применяться в следующих целях: 1) для классификационной оценки пород по прочности и деформационному поведению при инженерно-геологических съемках; 2) для инженерно-геологического расчленения разрезов и, в частности, для определения положения поверхности оползня (ослабленных зон в теле оползня); 3) для определения структурной прочности пород; 4) в качестве предварительного испытания для назначения диапазона нагрузок при сдвиговых и трехосных испытаниях. С помощью метода одноосного сжатия могут быть получены данные для выделения отдельных разностей пород и отбора типичных образцов для более углубленного исследования. Применяя метод одноосного сжатия, в минимально короткие сроки можно получить прогноз поведения пород, используемых при строительстве с нарушением естественной структуры, например, в качестве материала сооружений.

Разработка специальных приборов для одноосного сжатия глинистых пород началась в нашей стране сравнительно недавно. Следует отметить лабораторный пресс одноосного сжатия П-12М. Он относится к классу приборов с управляемой нагрузкой. Изготовление его малыми сериями осуществляют учебно-производственные мастерские Механического института в г. Ленинграде. Максимальное усилие, развиваемое прессом, равно 120 кгс. Работа на прессе полностью автоматизирована. Первым серийным прибором является прибор одноосного сжатия ИГП-10. Выпуск его освоен опытным заводом геологоразведочной аппаратуры и средств автоматизации СКБ МГ СССР. Прибор

представляет собой настольный пресс. Работа на приборе полностью автоматизирована; процесс сжатия образца породы вплоть до его разрушения регистрируется самописцем в координатах нагрузка—деформация. Максимальное давление, развиваемое на приборе ИГП-10, составляет 1840 кгс. Прибор рассчитан на испытание цилиндрических образцов с площадью поперечного сечения до 40 см² и высотой до 120 мм. Он работает как от электрического привода, так и вручную и относится к приборам с управляемой деформацией.

Еще более простым в употреблении является прибор одноосного сжатия ОСВ-1, опытные образцы которого разработаны, изготовлены и испытаны ВСЕГИНГЕО. Это ручной портативный малогабаритный пресс со сменными пружинами в качестве силоизмерителя. Запись процесса деформации образца при сжатии в координатах нагрузка — вертикальная деформация также автоматизирована. Изготовление прибора ОСВ-1 возможно в любой механической мастерской. Прибор предназначен для массового определения механических свойств глинистых пород при инженерно-геологических изысканиях.

Трехосное сжатие. Под трехосным сжатием в лабораторной практике понимают такое напряженное состояние, при котором из трех сжимающих напряжений два, создаваемые обычно гидравлическим путем, равны друг другу ($\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$). Цилиндрический образец, помещенный в тонкую резиновую оболочку (0,15—0,20 мм), подвергают всестороннему (боковому) обжатию жидкостью ($\sigma_2 = \sigma_3$). Вертикальное сжимающее усилие передается на верхний торец образца при помощи штока. Приборы, осуществляющие такое напряженное состояние, называются стабилометрами. Основным преимуществом трехосных испытаний перед другими методами является возможность более правильного воспроизведения природного напряженного состояния и условий работы породы под сооружениями. При трехосном сжатии боковые нагрузки действуют на образец независимо от вертикальной. Весьма существенной является возможность измерения порового давления, которое возникает в процессе нагружения и изменяется во времени.

Стабилометры позволяют испытывать образец по закрытой системе, т. е. без оттока воды в процессе опыта, а также с определением объема поступающей или отжимаемой из образца воды. Это позволяет моделировать различное напряженное состояние, исследовать соотношения между сопротивлением сдвигу и эффективными нормальными напряжениями, а также получать прогноз величины порового давления для наиболее критических этапов состояния сооружения в процессе строительства и эксплуатации.

Предельную кривую Мора находят как огибающую кругов Мора, отвечающих разрушению. Для построения круга Мора на оси абсцисс откладывают максимальное и минимальное главные напряжения σ_1 и σ_3 и на их разности, как на диаметре, строят окружность. Если σ_3 — боковое давление на образец, равное давлению в камере, то вертикальное давление

$$\sigma_1 = \frac{F}{S} + \sigma_3,$$

где F — вертикальное усилие, кгс;

S — площадь поперечного сечения образца, см².

Если для каждого круга Мора будет определено поровое давление, то можно построить предельную огибающую в эффективных напряжениях.

Для трехосных испытаний более удобно представлять условие разрушения в виде соотношения, связывающего непосредственно главные напряжения, существующие в момент разрушения. Для породы с прямолинейной огибающей $\tau = C_0 + \sigma \operatorname{tg} \varphi$ условие разрушения в главных напряжениях имеет вид

$$\sigma_1 = A\sigma_3 + \sigma_0.$$

Величины σ_0 (теоретический предел прочности при одноосном сжатии и A (тангенс угла наклона прямой) определяются в результате построения

(рис. 10). Эти величины связаны с показателями прочности C_0 и φ следующими соотношениями:

$$\sigma_0 = \frac{2\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \cdot C_0; \quad A = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{A-1}{2\sqrt{A}}; \quad C_0 = \frac{\sigma_0}{2\sqrt{A}}.$$

По принципу работы приборы трехосного сжатия разделяют на два типа: сдвиговой и компрессионный. Стабилометры сдвигового типа (рис. 11) предназначены только для определения показателей прочности в результате разрушения образцов. Стабилометры компрессионного типа (рис. 12) помимо разрушения образцов позволяют проводить их сжатие в условиях невозможности бокового расширения. С помощью таких стабилометров определяют комплекс механических свойств — как прочностные, так и деформационные характеристики пород. Основное конструктивное отличие стабилометров этих типов заключается в различном соотношении диаметров штоков, передающих вертикальную нагрузку на образец, с диаметрами образцов. В стабилометрах сдвигового типа диаметр штока меньше диаметра образца. В таких приборах боковое давление на образец является и всесторонним. В стабилометрах компрессионного типа диаметр штока равен диаметру образца, в результате чего давление, создаваемое в камере прибора, является только боковым. Стабилометры, как правило, оборудуются устройствами для измерения порового давления.

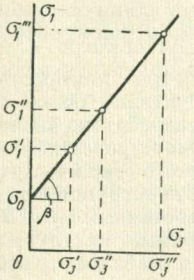


Рис. 10. Построение условия разрушения по данным трехосных испытаний ($\operatorname{tg}\beta = A$)

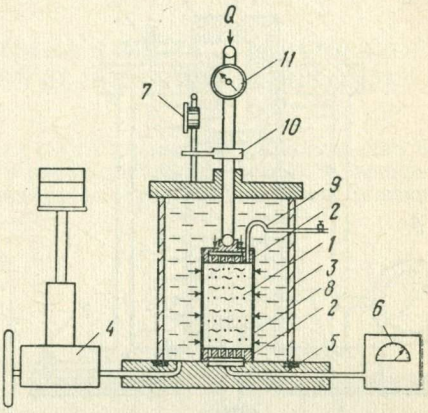


Рис. 11. Схема стабилометра сдвигового типа

1 — образец породы; *2* — пористые поршни; *3* — резиновая оболочка; *4* — устройство для создания и поддержания бокового (всестороннего) давления в камере; *5* — трубопроводы; *6* — устройство для измерения порового давления; *7* — индикатор для измерения вертикальной деформации образца; *8* — стенка камеры; *9* — вода; *10* — шток для передачи вертикальной нагрузки; *11* — динамометр

Наиболее широко распространены стабилометры сдвигового типа. Известны разнообразные конструкции подобных приборов: ЛИИЖТа, ДИИТа, стабилометр С-1, разработанный СКБИМ г. Армавира по техническому заданию ВСЕГИНГЕО, и др. Стабилометры ЛИИЖТа, ДИИТа относятся к классу приборов с управляемой нагрузкой, стабилометр С-1 — к классу приборов с управляемой деформацией. Вся работа стабилометра С-1 автоматизирована, за исключением предварительных операций — наполнения камеры давления водой (самотеком) и укладки грузов на плавающий поршень. Стабилометр С-1 предназначен для массовых лабораторных испытаний прочности песчано-глинистых пород. Прибор имеет три сменных камеры давления для испытания образцов различного диаметра и высоты. Для измерения поперечных деформаций

применяется эластичное измерительное кольцо, обеспечивающее точность отсчета 0,1 мм. Деформирование образца вплоть до его разрушения происходит при постоянной, автоматически регулируемой скорости вертикальных деформаций в пределах от 0,001 до 10 мм/мин. Вертикальная нагрузка на образец измеряется с помощью двух динамометрических колец: большой динамометр имеет пределы измерения от 0 до 1250 кгс, малый — от 0 до 125 кгс. Применение образцов различных размеров и двух динамометров позволяет с достаточной степенью надежности исследовать образцы различной прочности и однородности.

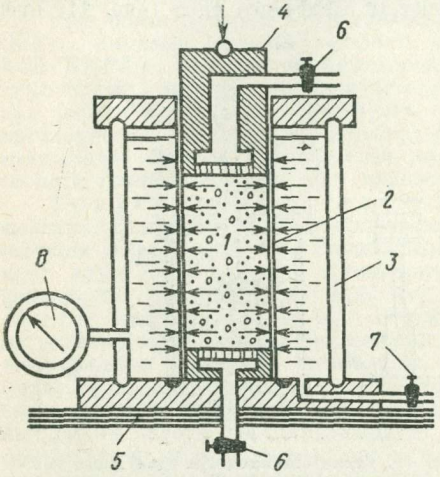


Рис. 12. Схема стабилометра компрессионного типа

1 — образец; *2* — резиновая оболочка; *3* — камера; *4* — подвижной поршень; *5* — неподвижный поршень; *6*, *7* — краны; *8* — манометр

Приборы ДИИТа, ЛИИЖТа весьма просты по конструкции; работа на них осуществляется вручную. Мастерские этих институтов изготавливают единичные образцы и малые опытные серии приборов трехосного сжатия.

Стабилометры компрессионного типа конструктивно более сложны. Моделей их разработано значительно меньше. Большую известность из стабилометров этого типа получил стабилометр М-2 конструкции Е. И. Медкова, разработанный в МИИТе. Многие дорожные институты пользуются этими стабилометрами, изготавливаемыми единичными образцами мастерскими МИИТа.

Известны различные схемы испытаний в приборах трехосного сжатия. Поскольку наиболее применимы стабилометры сдвигового типа, приведем принципиальные схемы испытаний в приборах этого типа.

Трехосное испытание состоит из двух этапов: 1-й этап — приложение всестороннего давления, 2-й этап — приложение вертикальной нагрузки. В зависимости от условий водооттока в каждом из этих этапов выделяют схемы испытаний. Наибольшее распространение получили закрытая и открытая схемы испытаний. При закрытой схеме (неконсолидированно-недренированные, недренированные испытания) водоотток отсутствует во время обоих этапов: как при приложении всестороннего давления, так и при приложении вертикальной нагрузки. При открытой схеме (консолидированно-дренированные, дренированные испытания) в течение обоих этапов происходит свободный водоотток.

З а к р ы т а я с х е м а моделирует работу массива при быстром росте нагрузки и затрудненной фильтрации, т. е. в наиболее тяжелых условиях. Поровое давление имеет значительную величину. Измерение его возможно в течение всего опыта. Такие условия соответствуют условиям нейтрального сдвига. Определения по закрытой схеме дают самое низкое расположение предельной огибающей Мора, т. е. наименьшие значения характеристик прочности. При проектировании по этим характеристикам обеспечивается устойчивость сооружения в самых опасных условиях нагружения. Производственное испытание по закрытой схеме длится, как правило, не более 10 мин.

О т к р ы т а я с х е м а воспроизводит условия работы породы при хорошем дренировании и медленном росте нагрузки. В этих условиях возникающее поровое давление сравнительно быстро рассеивается и вся нагрузка воспринимается практически скелетом грунта. Испытания по открытой схеме дают

наиболее высокие показатели прочности. В этом смысле испытания по закрытой и открытой схемам определяют соответственно нижнюю и верхнюю границы области возможных положений предельной огибающей. Проведение испытаний по открытой схеме вследствие длительности процесса консолидации требует значительно больше затрат времени, чем испытания по закрытой схеме. Время проведения таких испытаний определяется в основном водопроницаемостью исследуемых пород; обычно оно составляет 0,5—3 суток.

II. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОРОД. ОБОБЩЕННЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Генеральной совокупностью называется бесконечно большое число определений, однородных в каком-нибудь определенном отношении, но различающихся по величине интересующего нас признака или признаков.

Выборочной совокупностью (или выборкой) называется ограниченное число определений, произвольно отобранных из генеральной совокупности. Отдельное значение признака называется *вариантом*.

Частостью (W_i) называется доля каждого варианта во всей совокупности:

$$w_i = \frac{k_i}{\sum k_i} \text{ или } w_i = \frac{k_i}{n},$$

где n — число вариант.

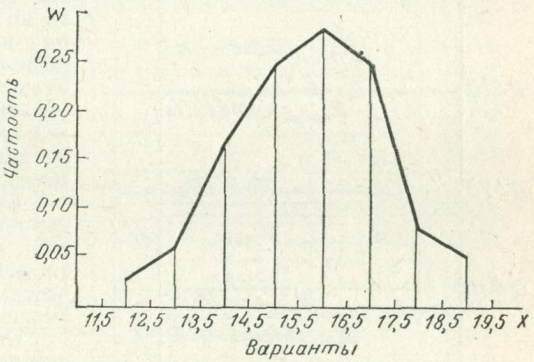


Рис. 13. Полигон частостей

В вариационном ряду* каждому значению признака соответствует своя частость. Если по абсциссе отложить значения вариант, а по ординате — отвечающие им значения частостей, то получим графическое изображение вариации признака (рис. 13).

При увеличении числа вариант частость все более и более приближается к значению вероятности. Соотношение между возможными значениями вариант и отвечающими этим значениям вероятностями называется законом распределения.

Известно несколько законов распределения: нормальное, биномиальное, редких явлений (Пуассона), симметричное (Коши) и др.

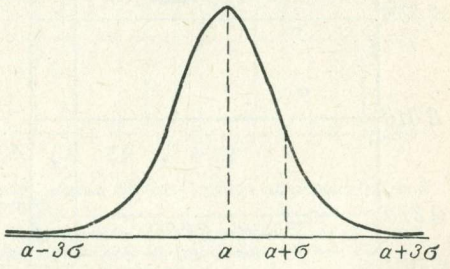


Рис. 14. Кривая нормального распределения

Распределение значений показателей физико-механических свойств пород ближе всего к нормальному закону. На рис. 14 приведена кривая нормального распределения:

* Ограниченное число определений, расположенное в порядке возрастания или убывания значения признака, называется вариационным рядом.

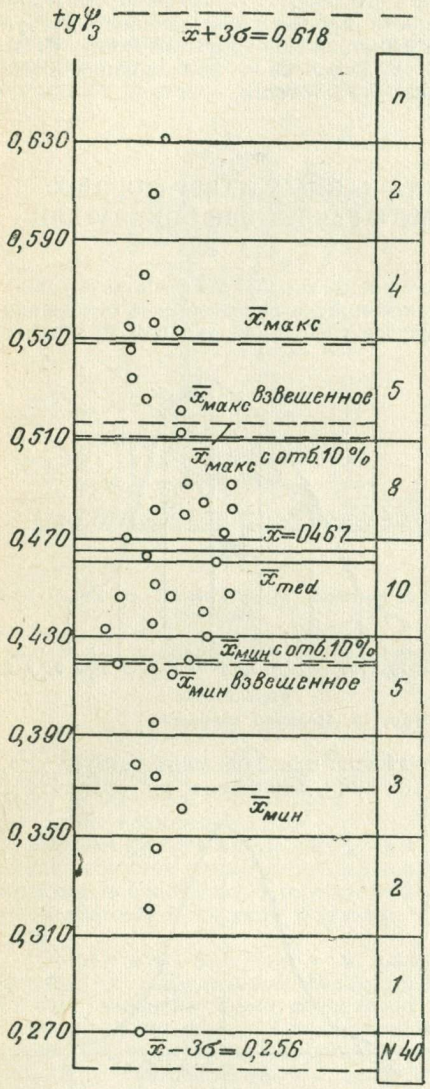


Рис. 15. График рассеяния значений коэффициента сдвига при нормальном давлении 3 кгс/см²: X *med* — медиана, значение, делящее вариационный ряд пополам

$$\varphi(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$$

при $x=a$, $y=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$,

где a — среднее значение признака;
σ — среднее квадратическое отклонение величины x от среднего.

Вычисление обобщенных показателей. Статистической обработке подвергаются данные экспериментальных работ, полученные при испытании горных пород, относящихся к единому геологическому телу категории вида (разновидности породы) или к одному инженерно-геологическому элементу, устанавливаемому при инженерно-геологической разведке. Показатели свойств пород должны быть случайными, т. е. они не должны зависеть от координат точки, для которой они определены.

Среднее значение показателя данного физико-механического свойства, полученное на основании статистической обработки нескольких частных значений показателей, называется обобщенным показателем.

Статистическую обработку целесообразно вести только в том случае, если имеется не менее пяти определений (малая выборка). Для малой выборки (от 5 до 15 определений) порядок расчета оценки среднего значения $\bar{x}$, среднего квадратического отклонения σ и коэффициента изменчивости V приведен в табл. 35.

При расчете статистических характеристик для большой выборки (число определений более 30) используют график рассеяния (рис. 15).

Основные формулы расчета статистик по методам сумм и произведений приведены в табл. 36.

Вычисление статистических показателей по приведенным формулам ведут при нормальном распределении. Распределение считают нормальным при соблюдении неравенств:

$$\frac{A}{M_A}\leqslant 3 \text{ и } \frac{E}{M_E}\leqslant 3.$$

Закон распределения удобно оценивать с помощью вероятностной бумаги, имеющей специальную разграфку: по оси ординат — преобразованную шкалу накопленной частости для нормального распределения, а по абсциссе — значения показателя (рис. 16). Для последовательно возрастающих значений

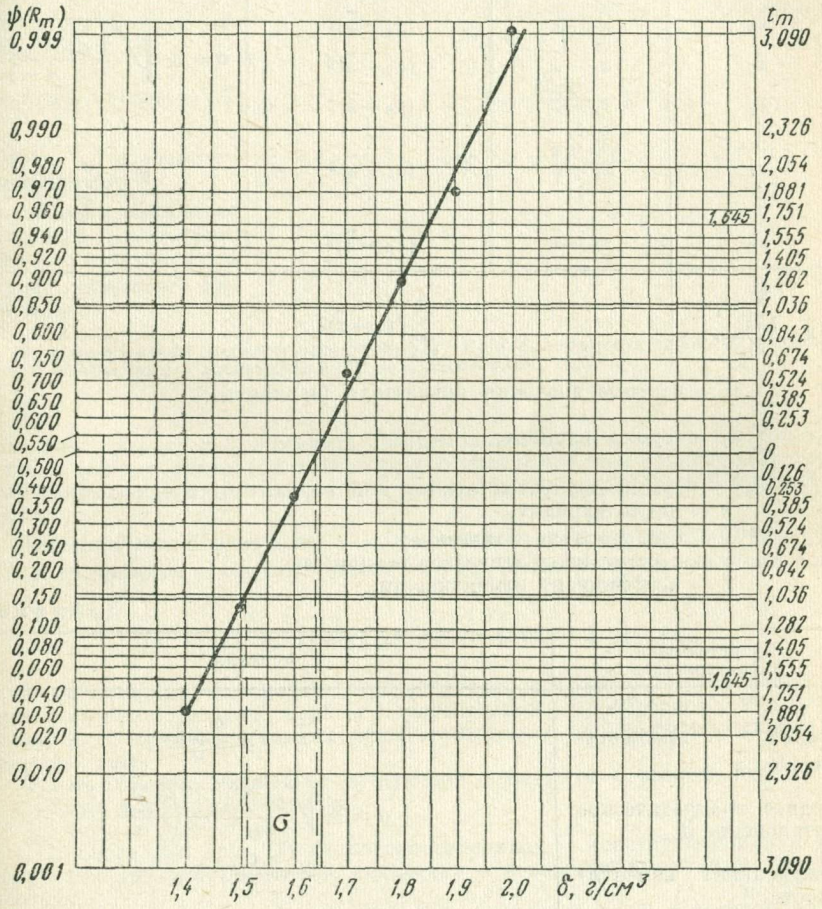


Рис. 16. Распределение значений объемной массы скелета грунта на вероятностной бумаге.

Оценки статистических характеристик, полученные по графику: $\overline{\sigma} = 1{,}7$ г/см³, $\sigma = 1{,}7 - 1{,}56 = 0{,}14$ г/см³, расчетом по формулам: $\overline{\sigma} = 1{,}69$ г/см³, $\sigma = 0{,}132$ г/см³

показателя вычисляют накопленные частости. Значения накопленных частостей и соответствующие значения показателя наносят на вероятностную бумагу, получая точки графика. Если точки располагаются примерно на прямой линии внутри интервала накопленных частостей 0,150—0,850, то это свидетельствует о непротиворечивости нормальному закону распределения. Возможные отклонения от прямой на краях (за пределами границ интервала) во внимание не принимают.

Таблица 35

Основные расчетные формулы

x_i	$x_i-\bar{x}$	$(x_i-\bar{x})^2$	Формула
x_1	$x_1-\bar{x}$	$(x_1-\bar{x})^2$	$\sigma=\pm\sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$
x_2	$x_2-\bar{x}$	$(x_2-\bar{x})^2$	
x_3	$x_3-\bar{x}$	$(x_3-\bar{x})^2$	
⋮	⋮	⋮	
x_i	$x_i-\bar{x}$	$(x_i-\bar{x})^2$	$V=\frac{\sigma}{\bar{x}}100\%$
⋮	⋮	⋮	
x_n	$x_n-\bar{x}$	$(x_n-\bar{x})^2$	
$\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n}$		$\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2$	

x_i — частные значения показателя (варианты);

$\sum_{i=1}^{n}x_i$ — сумма вариант;

$\Sigma(x_i-\bar{x})^2$ — сумма квадратов отклонений вариант от среднего значения;

n — число вариант;

$\bar{x}$ — среднее арифметическое;

σ — среднее квадратическое отклонение;

V — коэффициент изменчивости.

Таблица 36

Статистическая характеристика	Формула *
Среднее арифметическое $\bar{x}$	$\bar{x}=a\pm\frac{b\sum_1}{n}$
Среднее квадратическое отклонение σ	$\sigma=\pm\sqrt{\frac{b^2\sum_2}{n}-\left(\frac{b\sum_1}{n}\right)^2}$
Коэффициент изменчивости V	$V=\frac{\sigma}{\bar{x}}100\%$
Центральный момент III степени M_3	$M_3=\frac{\sum_3}{n}-\frac{3\sum_2\cdot\sum_1}{n\cdot n}+2\left(\frac{\sum_1}{n}\right)^3$
Момент IV степени M_4	$M_4=\frac{\sum_4}{n}-\frac{4\sum_3\cdot\sum_1}{n\cdot n}+6\frac{\sum_2}{n}\left(\frac{\sum_1}{n}\right)^2-3\left(\frac{\sum_1}{n}\right)^4$
Показатель асимметрии A	$A=\frac{M_3b^3}{\sigma^3}$

* Порядок расчета $\sum_1$, $\sum_2$, $\sum_3$ и $\sum_4$ содержат таблицы, иллюстрирующие методы сумм и произведений (табл. 38, 39).

Продолжение табл. 36

Статистическая характеристика	Формула
Ошибка показателя асимметрии M_A	$M_A = \pm\sqrt{\frac{b}{n}}$
Показатель эксцесса E	$E = \frac{M_4 b^4}{\sigma^4} - 3$
Ошибка показателя эксцесса M_E	$M_E = \pm\sqrt{\frac{24}{n}}$
Произвольно выбранное значение показателя, близкое к среднему, a	
Ширина классового интервала b	

Примечание. Порядок расчета Σ_1, Σ_2, Σ_3 и Σ_4 содержат таблицы, иллюстрирующие методы сумм и произведений (Н. В. Коломенский, 1956 г.).

По такому графику легко оценить среднее значение показателя. Оно отвечает абсциссе точки с ординатой 0,500, среднее квадратическое отклонение определяют как разность значений абсцисс точек с ординатами 0,500 и 0,850 или 0,500 и 0,150.

Значения показателей более $\overline{x} + 3\sigma$ и менее $\overline{x} - 3\sigma$ считают грубыми ошибками и из расчетов исключают, после чего высчитывают новые значения $\overline{x}$ и σ.

III. ВОДА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОДАХ

Вода в песчано-глинистых породах может находиться в различном фазовом состоянии: твердом, жидком и газообразном (парообразном). Между породами и содержащейся в них водой существует тесное физико-химическое взаимодействие.

Таким образом, различают следующие виды воды в рыхлой породе:

I. Вода в твердом состоянии.

II. Вода в виде пара.

III. Связанная вода: 1) химически связанная — конституционная и кристаллизационная; 2) физически связанная — адсорбированная или гигроскопическая.

IV. Свободная вода: 1) пленочная; 2) капиллярная; 3) гравитационная.

Вода в твердом состоянии встречается в виде линз, прослоек и кристаллов льда в мерзлых грунтах. Вода в твердом состоянии (лед) может передвигаться в одних случаях при условии предварительного перехода в жидкое или парообразное состояние, в других (при соответствующем напряженном состоянии и деформациях породы) как пластичное тело, без перехода в иное фазовое состояние.

Вода в виде пара занимает все поры, свободные от жидкой воды, и является составной частью грунтовой атмосферы. Пар образуется из всех видов воды в грунте путем испарения и вновь переходит в эти виды воды путем конденсации. Содержание пара в породе невелико и обычно не превышает 0,001 от веса пробы грунта. Парообразная вода передвигается в грунте под влиянием

разности упругости паров — из мест с большей упругостью пара в места, где эта упругость меньше.

Газообразная фаза в грунте, как правило, полностью насыщена водяными парами; относительная влажность воздуха в породе, следовательно, обычно равна 100%. Если пары воды находятся в состоянии насыщения, т. е. имеют максимальную упругость при данной температуре, то их передвижение обусловливается только температурой и направлено от мест с более высокой температурой к местам с меньшей температурой. Пары воды могут передвигаться и при одинаковой температуре в зависимости от формы поверхности грунтовых частиц. Принято считать, что насыщенные пары у вогнутой поверхности твердой частицы имеют меньшую упругость, чем у плоской, а у плоской — меньшую, чем у выпуклой (эффект Томсона), таким образом, пары воды передвигаются от выпуклых поверхностей к вогнутым и плоским.

Химически связанная вода подразделяется на конституционную и кристаллизационную.

Она принимает участие в строении кристаллических решеток различных минералов.

Конституционная вода прочно связана с кристаллической решеткой минерала и выделяется скачкообразно лишь при очень высоких (450—500° и выше) температурах, вполне определенных для каждого минерала. Конституционная вода входит в состав таких минералов, как мусковит, диаспор и многие другие, в гидраты типа гидроокисей $Ca(OH)_2$ и др. В решетках минералов конституционная вода находится не в виде целых молекул, а в виде ионов H^+ и OH^-.

Кристаллизационная вода менее прочно связана с кристаллической решеткой минерала, она выделяется также скачкообразно, но при более низких (ниже 400°) температурах, чем конституционная, также вполне определенных для каждого минерала. Кристаллизационная вода входит, например, в состав многих минералов: гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), где на каждую молекулу сернокислого кальция приходятся две молекулы, или 20,9% воды; мирабилита ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), где на одну молекулу сернокислого натрия приходится десять молекул, или 55,9% воды; лимонит ($2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$), содержащего 25,2% воды, и т. п. Кристаллизационная вода участвуя в построении кристаллической решетки минералов, сохраняет свою молекулярную форму. Выделение из минерала конституционной и кристаллизационной воды вызывает его разрушение и образование новых минеральных видов с новыми свойствами.

В инженерной геологии большой практический интерес представляет лишь та часть воды, находящейся в составе минералов, которая выделяется при температурах ниже 105°. При выделении такой кристаллизационной воды, например из гипса, могут быть получены существенно завышенные значения естественной влажности, так как известно, что при длительном нагревании уже при 82° гипс теряет 15% воды, а естественную влажность принято определять путем нагревания образца грунта до постоянного веса при температуре 105—107°. Низко-температурную воду в составе минералов трудно отделить от физически связанной воды, адсорбированной на поверхности грунтовых частиц.

Физически связанная вода, или как ее еще называют — прочносвязанная, адсорбированная, гигроскопическая, удерживается на поверхности частиц породы молекулярными силами с заметной энергией связи, определяемой как теплота смачивания (сорбция). Энергетическая ненасыщенность поверхностных молекул грунтовых частиц обусловливает интенсивное притяжение молекул воды, сопровождающееся значительным энергетическим эффектом — выделением теплоты смачивания.

Как указывают П. А. Ребиндер и Ф. Д. Овчаренко, связанная вода образует на поверхности глинистых частиц мономолекулярный слой, обусловленный прочной водородной связью между кислородными атомами активных центров глинистых частиц и гидроксильными группами молекул воды. Мономолекулярный слой благоприятствует образованию полислоев воды. Вода мономолекулярного слоя удерживается особенно прочно и имеет свойства, отличные от свойств

свободной воды. Вода полимолекулярных слоев мало отличается от свободной воды.

Связанная вода удерживается на поверхности грунтовых частиц давлением, превосходящим 10 000 кгс/см². Находясь под таким давлением, она качественно резко отличается от обычной жидкой или свободной воды.

Одной из важных характеристик связанной воды является ее пониженная растворяющая способность (а иногда полная потеря способности растворения) таких веществ, как соли и сахар, вследствие чего связанная вода представляет собой «нерастворяющий объем» воды в породе.

При образовании связанной воды происходит выделение теплоты смачивания вследствие перехода молекул воды из свободного состояния в связанное. Связанная вода не обладает электропроводностью, плотность ее выше единицы (1,7), что обусловлено ориентированным расположением и как бы уплотнением дипольных молекул воды на поверхности твердой фазы; теплоемкость ее — 0,7 (по Андрианову), температура замерзания минус 78°, диэлектрическая постоянная 2,2; передвигаться связанная вода может лишь путем перехода в парообразное состояние.

Количество связанной воды в грунтах определяется различными методами, из них наиболее распространены следующие: 1) метод, основанный на определении теплоты смачивания при переходе воды из свободного состояния в связанное (определение производят в калориметрах различного типа); 2) метод дилатометра, основанный на том, что связанная вода замерзает при температуре минус 78°; 3) индикаторный или интерферометрический метод, основанный на том, что связанная вода не растворяет соли и сахар; 4) метод, основанный на определении гигроскопической влажности грунта при относительной влажности воздуха 55% и $t = 20°$.

Из перечисленных методов наиболее точным является метод определения количества связанной воды по теплоте смачивания, но он очень трудоемок и сложен. Наиболее простым и доступным является метод определения связанной воды по гигроскопической влажности. Как показали многочисленные исследования по определению связанной воды в почвах, глинах и глинистых породах, количество связанной воды, определенное по теплоте смачивания и индикаторным методом, близко к значению гигроскопической влажности воздушно-сухого грунта.

До настоящего времени нередко количество связанной воды в грунте отождествляют с влажностью, соответствующей максимальной гигроскопичности. Известно, что влажность, соответствующая максимальной гигроскопичности, отвечает суммарному количеству адсорбированной и капиллярно-конденсационной воды, поэтому содержание воды, соответствующее максимальной гигроскопичности, может в несколько раз (3—4) превышать содержание связанной воды.

Отношение теплоты смачивания к величине максимальной гигроскопичности не является постоянной величиной, поэтому нельзя вычислять теплоту смачивания любого грунта по максимальной гигроскопичности или, наоборот, определить величину максимальной гигроскопичности по теплоте смачивания, пользуясь коэффициентом пропорциональности, равным 0,517, как предложил П. И. Андрианов.

Содержание связанной воды в породе зависит от состава обменных катионов. Грунты, насыщенные Ca^{2+}, при прочих равных условиях содержат больше связанной воды, чем те же грунты, насыщенные Na^{+}; Са-бентонит содержит 20% связанной воды, а Na-бентонит лишь 14%.

Содержание связанной воды в грунтах, насыщенных различными катионами, изменяется по следующему ряду:

$$Ca^{2+} = Mg^{2+} \geqslant H^{+} \geqslant Na^{+} \geqslant K^{+}.$$

Количество связанной воды определяет гидрофильность породы, т. е. способность поверхности грунтовых частиц связывать воду молекуляр-

ными силами; оно может являться классификационным признаком породы.

Свободная вода. Вся вода, за исключением связанной, заполняющая поровое пространство в грунтах, относится к свободной. Таким образом, к свободной воде следует относить также пленочную (по Лебедеву) или, как ее еще называют, рыхлосвязанную, или осмотическую, воду.

Вокруг слоя связанной воды образуется полимолекулярный слой ориентированных дипольных молекул воды, который удерживается силами, значительно меньшими, чем связанная вода. Образование пленочной воды в грунте начинается с момента образования слоя связанной воды, т. е. с того момента, когда влажность грунта становится выше его гигроскопичности. При образовании пленочной воды теплота смачивания не выделяется. Пленочная вода по своим свойствам не отличается от обычной воды, она также растворяет соли. Передвигается пленочная вода в породе не сплошной массой, а от частицы породы с более толстой пленкой к частице с менее толстой пленкой, не подчиняясь силе тяжести.

Количественное содержание пленочной воды в породе может резко меняться при процессах коагуляции и пептизации, а также в зависимости от наличия в поровом растворе грунта легкорастворимых солей; в засоленных грунтах она может отсутствовать вовсе. Методов определения содержания пленочной воды в грунтах нет, так как отделить пленочную воду от капиллярной невозможно.

Предложенные А. Ф. Лебедевым методы определения пленочной воды в грунтах (методы высоких колонн, центрифуги, пленочного равновесия) являются условными. Дальнейшие исследования показали, что на величину содержания пленочной воды в грунте, выражающуюся величиной максимальной молекулярной влагоемкости, влияют величина нагрузки и продолжительность ее воздействия на грунт.

Работы П. А. Крюкова показали, что при отжатии воды из грунта под воздействием давления от нескольких до 10 000 кгс/см^2 влажность грунта убывает постепенно, зависимость между влажностью грунта и логарифмом давления близка к линейной. Это свидетельствует об условности выделения такой влаги, как максимальная молекулярная влагоемкость, якобы отличной от свободной воды. Принимая условность значения этого показателя, можно его использовать лишь для классификационной характеристики грунтов.

Вода, содержащаяся в капиллярах породы, может находиться в состоянии капиллярно разобщенной (вода углов пор), если она занимает суженные части пор и ограничена менисками, либо в состоянии собственно капиллярной, если поры грунта нацело заполнены водой. Вода углов пор, ограниченная поверхностями грунтовых частиц или менисковыми поверхностями, не может передвигаться и, как правило, занимает незначительное пространство по отношению ко всему объему пор.

Различают воду капиллярно поднятую и капиллярно подвешенную. Влажность грунта, у которого все капиллярные поры заполнены водой, называют капиллярной влагоемкостью. В природных условиях капиллярно поднятая вода находится непосредственно выше уровня грунтовых вод, она передвигается под действием сил, развиваемых менисками в направлении, противоположном силе тяжести. Капиллярно поднятая вода непрерывно связана с зоной насыщения. При понижении уровня зоны насыщения, например в периоды засухи или под влиянием искусственного осушения, соответственно понижается и уровень капиллярной зоны.

Высоту капиллярной зоны следует учитывать при строительстве дорог и заложении фундаментов зданий, поскольку вода этой зоны вызывает увлажнение полотна дороги или сырость в подвальных помещениях. В песках высота капиллярной зоны очень мала, значительно меньше 1 м; в глинистых породах она обычно достигает 3—5 м. Капиллярно подвешенная вода в природных условиях образуется в зоне аэрации, как правило, в нижней части мелкозер-

нистых пород, подстилаемых более крупнозернистыми. При испарении уровень ее постепенно понижается, иногда до полного исчезновения зоны капиллярно подвешенной воды.

Гравитационная вода не связана с поверхностью частиц и не удерживается мениковыми силами, она способна перемещаться под влиянием силы тяжести, т. е. под влиянием разности напоров.

Растворяющая способность воды зависит от ее химического состава. Вода обладающая растворяющей способностью по отношению к данной породе в данных условиях, называется агрессивной. Агрессивное действие воды зависит кроме состава от скорости ее передвижения в порах и трещинах породы.

Передача гидростатического давления воды при известных условиях может вызвать деформацию грунтов, особенно глинистых. При наличии под водонепроницаемым глинистым слоем, вскрытым котлованом, напорного водоносного горизонта наблюдается выпирающее действие гидростатического давления. Отмечается также влияние гидростатического давления на уменьшение сопротивления сдвигу несцементированных пород.

Механическое воздействие движущейся воды на частицы породы может проявляться в механической суффозии, т. е. в выносе движущейся водой мелких частиц рыхлой породы. Этот процесс вызывает увеличение пористости породы, общее ее разрыхление, увеличение водопроницаемости и понижение прочности.

IV. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Отбор и подготовка проб скальных пород для физико-механических испытаний. Эффективность физико-механических испытаний скальных пород в значительной степени зависит от того, где и как были отобраны пробы. При отборе проб необходимо ясно представлять, для каких видов испытаний предназначается проба, и обеспечить представительность взятой пробы для конкретных геологических условий.

Для определения основных прочностных и упругих показателей требуются: керн диаметром более 42 мм суммарной длиной не менее 120 см с длиной отдельных кусков не менее 10—12 см; монолит размером не менее 25 × 25 × × 40 см либо проба в виде 3—4 кусков размером 20 × 20 × 25 см, отобранных в одном месте.

Для неполной характеристики физико-механических свойств породы, определений только прочности на одноосное сжатие, твердости и пористости или для испытаний по ускоренным методикам объем пробы может быть сокращен в 3—4 раза. Определения объемной массы, пористости, твердости, проницаемости пород и некоторых других видов несложных испытаний могут быть проведены на образцах размером 10 × 10 × 10 см. Значительный объем отбираемых проб скальных пород вызывается необходимостью изготовления достаточного количества образцов для различных видов физико-механических испытаний.

Наименьшее число образцов, требуемое для получения надежных результатов испытаний (например, прочности на сжатие), определяется следующим расчетом:

$$A = \frac{R_{\text{макс}}}{R_{\text{мин}}} \leqslant 1{,}5.$$

При этом следует учитывать, что

$$A = \frac{100 + \frac{2V}{n}}{100 - \frac{2V}{n}}; \quad V = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{R}} \cdot 100; \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i (R_i - \bar{R})^2}{-1}},$$

где R — прочность на сжатие;
n — количество образцов;
V — коэффициент вариации прочности;
σ — квадратическое отклонение.

В зависимости от величины V минимальное число проб, отбираемых для испытаний, соответственно должно быть следующим:

Значения V	Значения n
30	9
25	6
20	4
15	3

Аналогично следует определять количество проб, необходимых и для других видов испытаний.

Отбор проб — монолитов желательно проводить без применения взрывных работ, которые допускаются лишь в случае крайней необходимости и только для отделения крупных (0,5—1,0 м³) глыб для последующего выкалывания монолитов требуемого размера.

При отборе керна необходимо стремиться к максимальному уменьшению опробуемого интервала, так как физико-механические свойства пород могут заметно изменяться в пределах отдельных слоев.

На пробах необходимо отмечать ориентировку. В ответственных случаях, особенно из пород, обладающих анизотропией механических свойств, желательно отбирать пробы удвоенного объема, позволяющие провести механические испытания в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

На каждую пробу целесообразно завести специальную карточку, в которой следует указывать: место взятия пробы; краткое геологическое описание места отбора; название породы, ее внешний вид, стратиграфическое положение, ориентировку образца, наличие в породе трещин, следов выветривания и другие характерные особенности. В карточку следует заносить также результаты физико-механических и петрографических исследований. Применение таких карточек значительно облегчает анализ и обработку результатов испытаний.

Изготовление образцов для физико-механических испытаний. Широкое внедрение алмазного инструмента коренным образом улучшает технологию изготовления образцов правильной геометрической формы из твердых горных пород. При обработке проб небольшого размера наиболее эффективно использование тонкостенных (1—2 мм) трубок, армированных алмазными наконечниками. Бурение такими трубками можно проводить на обычных сверлильных станках, обеспечив промывку через шпиндель. Тонкостенные алмазные трубки (типа АИС) изготавливаются диаметром 8—120 мм и более и их применение, наряду с резким увеличением скорости бурения и улучшением условий труда, позволяет получать заготовки правильной цилиндрической формы с высокой чистотой поверхности.

Применение в лабораторных условиях алмазных коронок, выпускаемых для колонкового бурения, не всегда возможно, так как при этом требуется подача большого давления на образец с помощью достаточно тяжелых буровых или сверлильных станков, применение которых часто приводит к раскалыванию проб.

Изготовление образцов цилиндрической формы состоит из следующих операций: выбуривания керна, обработки торцов керна, пришлифовки торцов, промывки и маркировки готовых образцов. Торцы керна обычно обрабатывают мокрым способом, с охлаждением режущих дисков водой, керосином, веретенным или вазелиновым маслом, либо 4—5%-ными растворами эмульсолов Э-1, Э-2 или Э-3 (ГОСТ 1975-53); последние наиболее безопасны в работе.

Параллельность торцов образцов (допускается непараллельность не более 2°) достигается при последовательном разрезании достаточно длинного керна. Недостаточная параллельность торцов при испытании образцов на одноосное сжатие или на срез, а также при определении упругих показателей приводит к значительному искажению получаемых результатов. Испытание образцов с несколько выпуклой средней частью, что обычно возникает при шлифовании, приводит к резкому снижению показателей прочности, особенно при испытании твердых пород.

Для резания пород средней твердости можно использовать диски: тонкие (4—10 мм) абразивные, стальные (1,8—2,5 мм) с подсыпкой абразивной крошки или алмазные отрезные круги марки «АОК» диаметром 200 и 320 мм (соответственно 4 и 11 карат в каждом) с зернистостью А-25 и А-16. Прочные высокоабразивные песчаники, гранатовые скарны, пироксениты и лавобрекчии целесообразно резать отрезными кругами со 100%-ной концентрацией алмазов; граниты, габбро, доломиты — с 50%-ной концентрацией; мрамор, известняки, стекло, фарфор и т. п. — с 25%-ной концентрацией алмазов.

Доводку торцов проводят на вращающихся (скорость вращения 150—250 об/мин) чугунных дисках диаметром от 260 до 400 мм с последовательной подсыпкой абразивных порошков карбида кремния средней зернистости, выпускаемых в следующем ассортименте: № 46, 80, 100, 120, 150, 180. Замена абразивных порошков алмазными планшайбами различной зернистости значительно повышает производительность труда при шлифовании, особенно при массовом производстве. Это же относится и к применению алмазных паст, выпускаемых в широком ассортименте. Чистота поверхности образцов горных пород после механической обработки зависит от их состава, структурно-текстурных особенностей, применяемого инструмента и технологии работ. Ориентировочно для равномернозернистых горных пород чистота поверхности после различных видов обработки соответствует: после дробового бурения 1—2 классам чистоты, после алмазного бурения 2—5 классам, после обработки абразивными кругами 3—6 классам, после резания алмазными отрезными кругами 3—5 классам, после обработки шлифовальными порошками различной зернистости 4—8 классам, после полировки микропорошками более 6—8 классам.

После буровых, камнерезных и шлифовальных операций готовые образцы промывают струей горячей воды и протирают металлической щеткой. Размеры образцов только частично регламентируются в ГОСТах.

С учетом принятых диаметров колонкового бурения, а также учитывая влияние масштабного эффекта, для различных видов физико-механических испытаний рекомендуется применение следующих размеров образцов: для определения прочностных и деформативных свойств — цилиндры с наружным диаметром 42 ± 2, 59 ± 2 и 73 ± 2 мм, при этом для определения прочностных свойств высота принимается равной диаметру с отклонением не более 5%, для определения модуля упругости, коэффициента Пуассона высота должна быть в 1,5—2,0 раза больше диаметра.

Основные факторы, определяющие физико-механические свойства скальных пород. Физико-механические свойства скальных пород зависят от свойств породообразующих минералов, структурно-текстурных особенностей и степени изменения породы (табл. 37). Влияние свойств породообразующих минералов наиболее заметно проявляется при сравнении различных типов изверженных пород.

Определенная ориентировка минералов во многих случаях вызывает резкое усиление анизотропии физико-механических свойств пород, что особенно заметно проявляется у метаморфических пород.

Проводящиеся в настоящее время исследования показывают, что, зная упругие свойства породообразующих минералов и определив количество этих минералов в породе, можно ориентировочно рассчитать упругость горной породы. Точность такого расчета упругих показателей для многих типов горных пород часто достаточно близка к точности непосредственных определений. Такой

Таблица 37

Влияние серпентинизации на упругие свойства оливиновых пород
(по Б. П. Беликову)

Номер пробы	Порода и место отбора	Серпентинизация, %	Объемная масса, г/см³	Пористость эффективная, %	Модуль упругости, $\cdot 10^5$ кгс/см²	Скорость распространения упругих волн, м/с
6013	Оливинит, Кольский полуостров . .	0	3,386	0,54	17,51	8110
6014	Оливинит, Монча-Тундра	5	3,207	1,07	12,15	7000
5577	Дунит, Алдан	25	2,932	0,82	9,65	6470
5556	Дунит, Полярный Урал	50	2,760	1,17	6,68	5810
6672	Дунит, Кимперсай	60	2,689	0,66	6,66	5590
6669	Дунит, там же	80	2,550	1,02	5,27	5260
7198	Серпентинит, Армения	96	2,546	1,87	5,15	5430

метод рекомендуется применять при расчете упругих свойств пород мономинерального состава при малой пористости (табл. 37).

На прочность скальных пород оказывает заметное влияние размер зерен, слагающих породу. При равных условиях уменьшение размеров зерен, слагающих породу, способствует увеличению прочности и других показателей. В снижении прочности пород большое значение имеют включения минералов, малоустойчивых по отношению к выветриванию.

Таким образом, при инженерно-геологическом изучении скальных пород всегда необходим учет их петрографических особенностей, во многих случаях количественный, без чего распространение получаемых результатов физико-механических испытаний на массив требует или значительного (в несколько раз) увеличения количества изучаемых проб, или резкого снижения достоверности проводимых прогнозных оценок.

Серийно выпускаемые приборы МИУИ-1 и АМА-1 (контраст) позволяют значительно облегчить и ускорить проведение количественных подсчетов в петрографических шлифах.

Методы определения физических свойств. Физические свойства скальных пород определяются во многом теми же методами, что и связных грунтов, в связи с чем ниже дается лишь перечень рекомендуемых методов испытаний и более подробно рассматриваются только некоторые специфические методы.

Плотность. Определение плотности скальных пород проводится на порошках, просеянных через сито 0,25 мм. Практически используются два метода определения.

Пикнометрический — определение объема воды, соответствующего объему взятых частиц (ГОСТ 5181-49, 6427-52). Такой метод рекомендуется для массовых определений, не требующих большой точности (точность метода $\pm 0{,}02$; навеска 15—20 г).

Гидростатическое взвешивание — определение потери массы тела в жидкости (спирт, четыреххлористый углерод и др.). Метод гидростатического взвешивания более трудоемкий и применяется для определения плотности с большой точностью ($+0{,}001$ г/см³); определение проводится с навеской 3—4 г.

Объемная масса определяется следующими методами:

1. *Метод сухого взвешивания.* Объемная масса сухой породы, т. е. масса единицы объема породы, определяется как отношение массы сухого образца к его объему, он зависит от минерального состава и пористости породы.

2. *Метод обмера.* Применяется для образцов правильной геометрической формы и заключается в измерении линейных размеров образца, расчете его объема и взвешивании.

3. *Метод гидростатического взвешивания* рекомендуется для определения объемной массы плотных, не размокающих пород. Объем образца, предварительно насыщенного жидкостью, определяется по объему вытесняемой им жидкости. Образец, обычно насыщенный керосином, погружают в керосин, разность отсчетов объема по уровню жидкости до погружения образца и после его погружения показывает объем образца.

4. *Метод гидростатического взвешивания с предварительным парафинированием* используется для размокающих, крошащихся и пористых пород. Метод основан на определении объема образца гидростатическим взвешиванием после его покрытия тонким слоем парафина.

5. *Волюменометрический метод* — измерение объема образца волюмометром А. Г. Крохиной, ртутным волюмометром Гиршвальда и др.

6. *Пикнометрический метод с предварительным парафинированием* (метод Кульбека).

П о р и с т о с т ь. В скальных породах обычно определяют пористость общую, открытую, эффективную и дифференцированную и выражают ее в процентах.

Пористость общая (П), нередко называемая абсолютной, истинной, физической, характеризуется общим объемом всех пор, независимо от их формы, величины и взаимного расположения. Определяется расчетным путем.

Пористость открытая (*насыщения*) ($П_{откр}$) определяется объемом жидкости (воды, керосина), вошедшей в поровое пространство образца. Расчет ведется по формуле

$$П_{откр} = \frac{P_н - P}{P_н - P^ж_н} \cdot 100\%,$$

где $P_н$ — масса образца, насыщенного жидкостью;
P — масса сухого образца;
$P^ж_н$ — масса насыщенного образца в жидкости.

Пористость эффективная ($П_{эф}$) определяется аналогично открытой пористости путем принудительного водонасыщения с предварительным вакуумированием.

Пористость дифференцированная ($П_д$) отвечает суммарному объему пор различного размера (диаметром менее 0,0001; 0,0001—0,001 мм и др.). Определяется методами: вдавливания ртути, рентгеновским, малопроницаемых мембран, микроскопическим и адсорбционным. При этом определяется эффективный радиус пор.

В л а ж н о с т ь выражается в процентах к массе абсолютно сухой твердой части образца. Определяется по ГОСТ 5179-49.

В о д о н а с ы щ е н и е может быть свободным и принудительным. Величину *свободного водонасыщения* определяют после замачивания образцов. Испытания проводят двумя методами:

1) при капельном насыщении вода подается к образцу по каплям так, чтобы образец покрылся водой за 4 ч, применяется для пород с малой (менее 5—8%) пористостью;

2) при постепенном погружении образца вода подается с такой скоростью, чтобы образец погрузился сразу на $^1/_3$ своей высоты, затем через 2 ч еще на 1/3 высоты и еще через 2 ч — полностью.

Опыты по определению свободного водонасыщения продолжаются 1, 3, 5, 10, 20, 30 и 45 сут в зависимости от задачи исследования. Взвешивание производится после каждого требуемого срока. Резкое возрастание водонасыщения обычно заканчивается в первые 3—5 сут, в связи с чем более длительное насыщение пород производится редко.

Полное, или принудительное, водонасыщение определяется несколькими методами: 1) насыщение водой в течение одних суток под вакуумом; 2) насыщение водой в течение одних суток под давлением 150—250 кгс/см² после предварительного вакуумирования; 3) кипячение образцов, которое дает приближенные результаты, так как при этом могут выщелачиваться отдельные компоненты. Расчет производится так же, как при определении влажности и свободного водопоглощения.

Степень заполнения пор, или степень водонасыщения, т. е. объем пор, заполненных водой, по отношению к общей пористости (в %) определяется по формуле

$$K_в = \frac{П_{эф}}{П} \cdot 100\%.$$

Величина $K_в$ является важным показателем при оценке морозостойкости и водостойкости пород.

Водопроницаемость — способность пород пропускать воду, характеризуется коэффициентом фильтрации $K_ф$ (м/сут или см/с). Вода в скальных породах передвигается преимущественно по трещинам и в значительно меньшей мере по порам. В лабораторных условиях обычно определяется проницаемость.

Проницаемость $K_{пр}$ — способность породы пропускать жидкость или газ при наличии перепада давления. В скальных породах проницаемость измеряется обычно тысячными долями дарси — миллидарси (мд).

В лабораторных условиях $K_{пр}$ определяется обычно на цилиндрических образцах (диаметр 40—42 мм и высота 20—25 мм). Расчет ведется по формуле

$$K_{пр} = \frac{Q \cdot l \cdot \mu 1000}{F \cdot t \cdot (P_1 - P_2)} \text{ мд},$$

где Q — расход жидкости, профильтровавшейся через образец, см³;
t — время фильтрации, с;
l — длина (высота) образца, см;
μ — вязкость жидкости, спз;
F — площадь поперечного сечения образца, см²;
P_1 — давление перед образцом, кгс/см²;
P_2 — давление после образца, кгс/см².

Принято считать породу проницаемой при коэффициенте проницаемости $K_{пр}$ более 10 мд, полупроницаемой при $K_{пр}$ = 10—0,1 мд и практически непроницаемой при $K_{пр}$ менее 0,1 мп. Ориентировочно пористость для указанных групп пород равна соответственно: более 20, 20—6, менее 6%.

Методы определения прочностных характеристик скальных горных пород. Определение прочности пород на сжатие. Прочность пород при одноосном сжатии определяется как частное от деления значения максимальной разрушающей силы (P_{max}) на начальную площадь поперечного сечения (F_o) образца:

$$R = \frac{P_{max}}{F_o}.$$

Согласно международному стандарту, рекомендуется испытывать на одноосное сжатие образцы цилиндрической формы с высотой и диаметром, равными 42 мм (с точностью до 5%).

Испытание производится на любой установке, имеющей одну шарнирную поверхность. Плиты, передающие нагрузку, должны быть отполированы, нагрузка на образец подается со скоростью от 5 до 10 кгс/см² · сек. Прочность на сжатие определяется по максимальной разрушающей нагрузке. Для решения многих практических вопросов рекомендуется пользоваться приближенной классификацией (табл. 38).

Таблица 38

Классификация горных пород по величине прочности на сжатие для инженерно-геологических целей
(по С. В. Николаеву)

Группы и подгруппы	Интервалы по прочности на одноосное сжатие, кгс/см²	Группы и подгруппы	Интервалы по прочности на одноосное сжатие, кгс/см²
I. Весьма слабые		III. Средней прочности	
А	Менее 40	А	350—520
Б	40—60	Б	520—800
В	60—100	В	800—1200
II. Слабые		IV. Прочные	
А	100—150	А	1200—1800
Б	150—230	Б	1800—2700
В	230—350	V. Весьма прочные	Более 2700

Непосредственное испытание пород на разрыв производится крайне редко. Образцы для этого изготавливаются в форме восьмерок или катушек. Зажимы разрывных машин, на которых проводятся испытания, должны быть снабжены шарнирными устройствами.

Малейший перекос при приложении к образцам растягивающих усилий (до ±0,02 мм) приводит к концентрации напряжений в местах захвата и резкому занижению полученных результатов.

Серьезным недостатком таких методов является также сложность изготовления из твердых горных пород фигурных образцов. Этот недостаток частично можно устранить путем приклеивания торцов образца (цилиндра, призмы) к специальным зажимам, но и в этом случае подготовка образцов для проведения испытаний является весьма трудоемкой операцией.

Определение прочности пород на разрыв наиболее удобно производить в специальной камере, конструкция которой разработана и апробирована Б. В. Матвеевым (ВНИМИ).

Метод определения прочности (ВНИМИ) на одноосное растяжение строго центрированной нагрузкой. Испытания производятся на образцах диаметром 30—40 мм и с высотой, равной 3—4 диаметрам.

Образцы с помощью сплава Вуда (температура плавления 60°) закрепляют с двух концов на 1/3 высоты в строго центрированных обоймах, которые могут свободно перемещаться в цилиндре вдоль направляющих устройств. Усилие, вызывающее перемещение обойм и разрыв закрепленного в них образца, создается гидравлической системой. При испытаниях исключается возможность перекашивания образцов или их поворота, параллельные поперечные сечения образца при деформации остаются параллельными друг другу, что обеспечивает

однородность напряженного состояния образца в его средней части. Разрыв образцов происходит обычно в среднем сечении.

Испытания пород на одноосное растяжение, проведенные таким способом, дают наиболее точные и надежные результаты и могут использоваться в качестве контрольных.

Метод определения прочности на разрыв путем раздавливания цилиндрических образцов по образующей. Цилиндрический образец с высотой, равной диаметру, помещается между плитами пресса так, чтобы сжимающие усилия были направлены параллельно боковым поверхностям цилиндра. Торцовые поверхности цилиндра должны быть гладкими и плотно соприкасаться с плитами пресса. Расчет ведется по формуле

$$R_{раз} = \frac{P}{F},$$

где $R_{раз}$ — прочность на разрыв, кгс/см²;

P — нагрузка, кгс;

F — площадь образца по поверхности раскола, см².

Разброс получаемых значений прочности пород на разрыв этим методом, как правило, значительно ниже, чем при испытании любым другим способом (коэффициент вариации для отдельных проб обычно не превышает 6—10%).

Определение прочности пород на срез. Прочность пород на срез определяется отношением величины разрушающей тангенциально направленной силы к площади среза. Испытание на срез проводят тремя способами: кручением, простым срезом и срезом со сжатием.

Кручение. Образец призматической или цилиндрической формы подвергается скручиванию в крутильной машине. В средней части образца, ослабленной фигурным вырезом, напряжения распределяются неравномерно, и разрушение происходит от растягивающих напряжений. Недостатком метода является сложность проведения эксперимента и необходимостью изготовления фигурных образцов.

Простой срез производится несколькими способами.

При одиночном срезе призматических образцов — одним или двумя ножами (рис. 17). Преимуществом этого метода является возможность повторения экспериментов и их простота, недостатком — возникновение под лезвием ножа концентраций напряжений и разрывающих напряжений от изгиба, искажающих результаты испытаний.

При цилиндрическом срезе пластинчатого образца срез производится вдавливанием цилиндрического пуансона. В этом случае концентрации напряжений несколько снижаются.

Срез зигзагообразных образцов применяется редко вследствие трудности изготовления образцов, сложности проведения эксперимента и возможности возникновения нормальных напряжений в плоскости среза.

Срез со сжатием. Наиболее удобен метод одиночного среза со сжатием: испытание проводится в наклонных матрицах (рис. 18) на образцах цилиндрической и призматической формы, могут быть испытаны также образцы неправильной формы, которые заливают быстротвердеющим цементом в специальные обоймы. Вертикальная нагрузка, создаваемая прессом, раскладывается на две составляющие — одну нормальную к плоскости среза и вторую, расположенную в плоскости среза. Специальный набор клиньев дает возможность производить срез под углами от 25 до 65° с интервалом в 5°. Этот способ позволяет получить исходные данные для расчета коэффициента сцепления C и угла внутреннего трения φ пород. Обычно опыты проводятся при углах приложения нагрузки α, равных 30; 45 и 60°, при упрощенных испытаниях — только при углах 30 и 60°.

Испытания рекомендуется проводить на образцах цилиндрической формы, имеющих следующие размеры (мм); диаметр цилиндра $42 \pm 0{,}1$; высота цилиндра $42 \pm 2{,}5$; конусность и бочковидность образца $\pm 0{,}05$.

Значение прочности на срез вычисляется как среднеарифметическое по нескольким (от 3 до 9) образцам, испытанным под одним и тем же углом. Количество образцов для испытаний определяется неоднородностью свойств породы. Для построения паспорта прочности и определения коэффициента сцепления

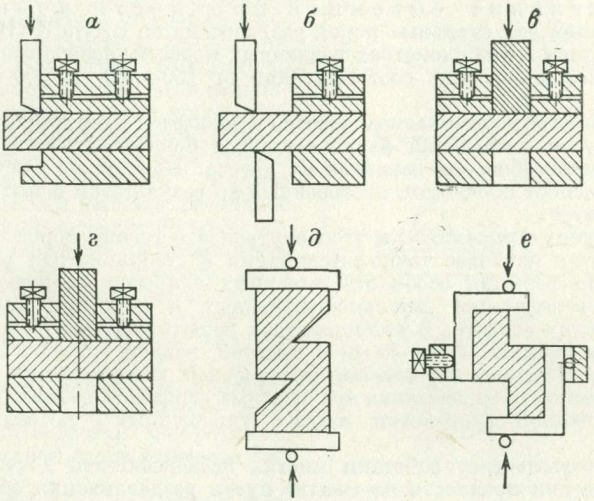


Рис. 17. Схемы испытаний на простой срез (по М. М. Протодьяконову)

а — одиночный срез; *б* — срез двумя ножами; *в* — двойной срез; *г* — цилиндрический срез; *д* и *е* — срез зигзагообразного образца

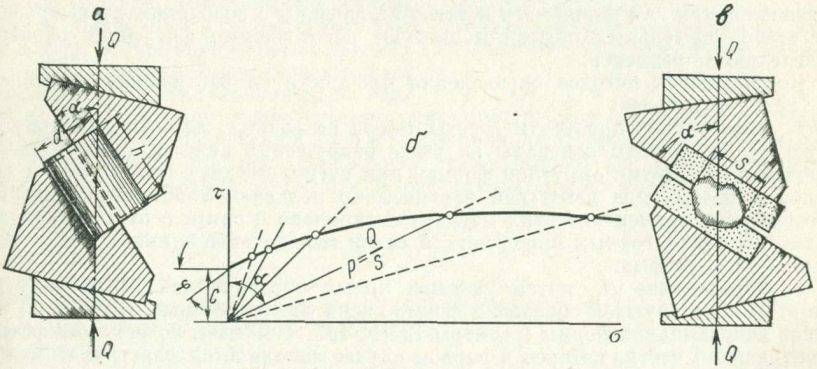


Рис. 18. Схема среза в наклонных матрицах и построение паспорта прочности (по Б. В. Матвееву, 1961)

а — срез цилиндрических образцов; *б* — паспорт прочности; *в* — срез образцов неправильной формы; Q — предельная нагрузка, кгс; σ, τ — *нормальное и касательное напряжения*, кгс/см²; α — угол наклона плоскости среза к направлению внешних усилий, град; S — площадь среза, см²; C — величина сцепления, кгс/см²; φ — угол внутреннего трения, град

и угла внутреннего трения требуется испытать от 9 до 27 образцов из одной пробы.

Большая трудоемкость проведения опытов и необходимость отбора проб большого объема, а также ряд других недостатков ограничивают область применения этого метода. Однако он удобен для испытания пород, из которых невозможно изготовить образцы правильной геометрической формы, а также при определении угла внутреннего трения и коэффициента сцепления по ослабленным поверхностям, по трещинам, прослоям слабых пород и т. д.

Определение объемной прочности пород. Методика таких испытаний для скальных пород разработана во ВНИМИ (1964 г.). Испытания проводятся в стабилометрах различных моделей, позволяющих создавать боковое и осевое давление соответственно от 150—400 до 500—2500 кгс/см² и более.

В стабилометре испытываемый образец помещается в герметическую камеру, в которой путем нагнетания масла создается боковое давление на образец, плунжер передает боковое давление от пресса. На том же рисунке показан примерный паспорт прочности, построенный по результатам испытания образца на стабилометре.

Коэффициент сцепления C и угол внутреннего трения пород определяются в стабилометрах наиболее точно. Испытания в стабилометрах рекомендуется проводить для решения особо ответственных вопросов на представительных пробах, петрографически детально изученных и имеющих характеристику водно-физических свойств. В стабилометрах испытываются образцы цилиндрической формы диаметром 30—36 мм и высотой, равной 1,5—2,0 диаметра.

Ускоренные методы определения прочностных характеристик пород. Сложность и трудоемкость определения прочностных свойств скальных пород явились основной причиной разработки многих упрощенных — косвенных методов испытаний.

Экспериментальными работами многих исследователей доказана возможность определения прочности на сжатие путем раздавливания образцов полуправильной и даже неправильной формы (приближенные определения $R_р$ экспресс-методами). При этом точность определения, достаточная для решения многих практических задач, достигается за счет увеличения (до 7—12) количества образцов, испытываемых для каждой пробы. Особенно большое количество косвенных методов разработано для определения прочности пород на растяжение, так как именно эти испытания связаны с необходимостью проведения особо тщательных опытов и требуют изготовления фигурных образцов значительных размеров.

Среди многих методов определения прочности на растяжение выделяется три группы методов:

1. Определение прочности горных пород на разрыв, из опытов испытаний на изгиб. Эти методы основаны на учете разрушения нижней части образцов (балочек или пластин округлой формы) при изгибе на двух опорах или в специальной обойме под действием вертикально подаваемой нагрузки (рис. 19). Практическое применение этих методов ограничено в связи с отсутствием для различных типов горных пород четкой связи между значениями прочности на изгиб и на разрыв.

2. Определение $R_р$ путем разрыва полых образцов давлением изнутри. При этом используются образцы в форме диска (метод соосных пуансонов) или блоков неправильной формы (размеры 125 × 125 × 40 мм и более) с отверстием в центральной части, которое в первом случае заполняется пластичной массой или резиновой пробкой, а во втором — в отверстие помещается гидропатрон, заполненный маслом (рис. 20). Оба метода апробированы и находят широкое применение в практике.

3. Определение $R_р$ из опытов на раскалывание. Этот метод является дальнейшим развитием метода раскалывания цилиндров по образующей. Испытания заключаются в раскалывании под прессом соосно расположенными клиньями

пластин высотой 10—25 мм с двумя параллельными поверхностями (рис. 21). Многочисленными опытами доказана достаточно высокая точность определения $R_р$ этим методом, что наряду с простотой изготовления образцов и проведением эксперимента делает этот метод весьма перспективным для массовых испытаний.

Определение модуля упругости и коэффициента Пуассона. Модуль упругости (модель Юнга) для твердых горных пород определяется преимущественно при испытании на одноосное сжатие. Давление на образец передается с помощью пресса несколькими последовательными ступенями (величина ступени 25—100 кгс/см²) и доводится до 30—70% от разрушающей величины, характерной для испытываемой породы. Для испытания нужны образцы горных пород прямоугольной или цилиндрической формы, высота их должна в 2—4 раза превышать поперечные размеры. Ширина граней призмы или диаметр цилиндров принимается в пределах от 35 до 70 мм. Поверхности образцов, воспринимающие осевую нагрузку, должны быть отшлифованы и строго параллельны, расстояние между плоскостями не должно различаться более чем на ±0,2 мм.

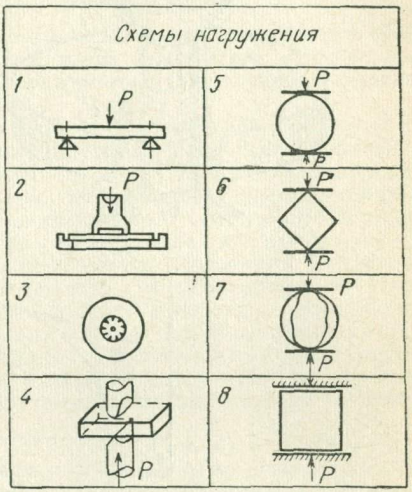


Рис. 19. Схемы косвенных методов определения прочности горных пород на растяжение R, разрыв (по М. Ф. Кунтышу, 1968). Определение R, разрыв при испытаниях на изгиб образцов в форме балочек (1) или дисков (2); путем разрыва полых образцов изнутри (3); из опытов на раскалывание плиток (4); цилиндров (5); призм (6); образцов округлой формы (7); кубиков (8)

Статические методы определения модуля упругости различаются главным образом по способам измерения деформаций. Главные из этих методов следующие.

Измерение деформаций образца зеркальными тензометрами Мартенса. Зеркальный тензометр площадью 1 см² жестко закрепляют на подвижной ромбической призме, упирающейся острым углом в поверхность испытуемого образца. При деформации образца призма, а с ней и зеркальце поворачиваются на некоторый угол. Направленный на зеркальце луч при этом соответственно отклоняется, что отмечается по шкале, установленной на расстоянии 2—3 м от зеркальца. Деформация, таким образом, определяется по двум зеркальцам, укрепленным на противоположных гранях призмы. Модуль упругости E рассчитывается по формуле

$$E=\frac{Pl}{S\,\Delta l},$$

где P — нагрузка, кгс;
l — длина, на которой замеряется деформация, см;
Δl — абсолютная величина деформации, см.
При этом

$$\Delta l=\frac{\Delta l_{пр}+\Delta l_{лев}}{2},$$

где $\Delta l_{пр}$, $\Delta l_{лев}$ — среднее значение деформаций по правому и левому зеркальцу
S — площадь поперечного сечения образца, см².

Определить модуль упругости тензометром Мартенса можно с точностью до 1%. Измерять этим способом поперечные деформации для расчета коэффициента Пуассона неудобно. Испытания могут применяться в качестве контрольных.

Измерение деформации образца проволочными датчиками сопротивления позволяет одновременно определять

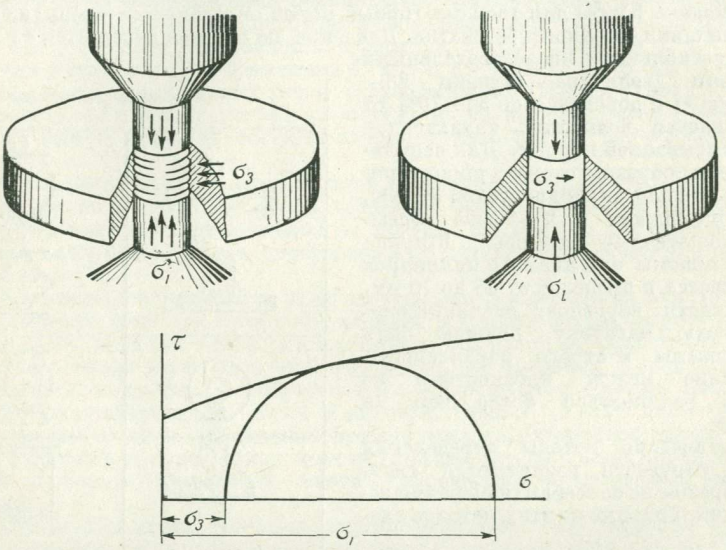
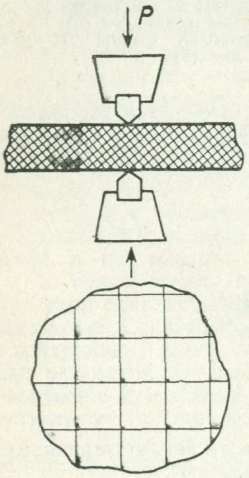


Рис. 20. Схема прибора для измерения объемной прочности образцов методом соосных пуансонов и пример кривой прочности (по Б. В. Матвееву, 1961)

продольные и поперечные деформации, поскольку датчики можно наклеивать на поверхности образца в любом направлении. Датчик-электротензометр — это тонкая проволока сечением 0,02 мм², наклеенная в виде зигзагов на полоску бумаги, которая служит изоляцией между проволокой и образцом. Наклеенный датчик точно отображает деформацию образца, т. е. вместе с ним растягивается или сжимается. При изменении длины проволоки датчика соответственно изменяется сопротивление, фиксируемое чувствительными электроизмерительными приборами.



При определении модуля упругости датчики наклеивают по одному вдоль образца, с его противоположных сторон. При измерении поперечных деформаций для расчета коэффициента Пуассона датчики укрепляют поперек образца. Расчет производят по формулам:

$$E = \frac{P}{S\mu} = \frac{P\gamma R}{R\,\Delta R}; \quad \mu = \frac{\xi_1}{\xi_2},$$

Рис. 21. Схема определения прочности горных пород на растяжение путем раскалывания пластины двумя соосно расположенными клиньями (по М. И. Койфману)

где E — модуль Юнга, кгс/см²;
μ — коэффициент Пуассона;
P — нагрузка на образец, кгс;
S — сечение образца, см²;
R — сопротивление датчиков, см;
ΔR — абсолютное изменение сопротивления датчика от давления, см;
γ — чувствительность датчика;
ε_1 — относительная деформация продольного сжатия;
ε_2 — относительная деформация поперечного расширения.

Определение упругих характеристик с помощью электротензометров обеспечивает точность определения до 1%. Этот метод значительно удобнее, чем метод определения с помощью зеркальных тензометров; для точного определения коэффициента Пуассона он незаменим.

Измерение деформации образцов при помощи индикаторов часового типа производится при сжатии образцов цилиндрической формы диаметром 40—90 мм и с высотой, в 2—4 раза превосходящей диаметр. С помощью индикаторов измеряют деформацию между двумя кольцами, жестко закрепленными в средней части образца на расстоянии 30—40 мм одно от другого. Схема установки индикаторов может быть различной. Деформация рассчитывается как среднеарифметическое значение из показаний двух индикаторов, установленных с противоположных сторон образца. Деформация образца рассчитывается по отношению к расстоянию между кольцами. Измерять поперечные деформации с помощью индикаторов неудобно, поскольку образцы могут разрушиться при испытании; точность метода 1—2%. Однако при инженерно-геологических исследованиях рекомендуется производить измерение деформаций на образцах при помощи электрических датчиков сопротивления или индикаторов часового типа.

Динамические методы определения упругих свойств пород. Модуль упругости пород можно определить динамическим методом по скорости распространения упругих колебаний. Существует несколько способов определения динамического модуля упругости (импульсные и резонансные методы). Теоретические основы этих определений и соответствующие методики подробно излагаются в курсах геофизики.

Расчет значений модуля упругости E и коэффициента Пуассона по скорости продольных V_p и поперечных V_s волн удобно производить для практических целей с помощью соответствующих номограмм (Кнопова и Никитина).

Между величинами модуля упругости, определенного статическими и динамическими методами, установлена определенная коррелятивная связь. Для определенных петрографических типов пород разница в значениях модуля упругости, определенных статическим и динамическим методами, обычно не превышает 10%.

Большим преимуществом динамических методов определения модуля упругости являются возможность определения упругих показателей в массиве и на образцах полуправильной формы, а также простота и скорость проведения эксперимента.

Твердость и пластичность пород. Твердостью называют сопротивление горной породы проникновению в нее инструмента или какого-либо твердого тела. Различают твердость отдельных минеральных зерен породы (микротвердость) и твердость агрегатную, характеризующую горную породу в целом. При статическом воздействии на внедряемый в горную породу инструмент определяется статическая твердость, при динамическом воздействии—динамическая.

Существует довольно много методов количественного определения твердости. Одним из наиболее простых является определение твердости минералов по сравнению со шкалой Мооса, составленной из десяти минералов — эталонов.

В практике инженерно-геологических исследований наиболее широкое применение могут найти методы определения статической твердости, разработанные

М. М. Хрущевым и Л. А. Шрейнером, а также некоторые методы определения динамической твердости.

Методы определения статической твердости пород. Метод определения микротвердости по величине нагрузки, отнесенной к поверхности отпечатка, полученного в результате вдавливания в образец четырехгранной пирамиды, наиболее известен и прост. В серийно выпускаемом приборе ПМТ-3 для определения микротвердости служат маленькие алмазные призмы, которые вдавливаются под нагрузкой от 2 до 200 гс/см². Этот метод, разработанный М. М. Хрущевым и Е. С. Берковичем, может быть успешно применен при определении микротвердости горных пород, особенно в целях приближенной оценки степени выветрелости или гидротермальной переработки М. М. Хрущев детализировал шкалу Мооса, выделив 15 классов твердости.

Возможности сравнительной оценки пород по твердости значительно расширились благодаря работам А. С. Поваренных, предложившего метод активного определения твердости с помощью игл-эталонов. При этом к 15-балльной шкале твердости добавляются определенные количественные показатели.

Метод вдавливания штампа в пришлифованную поверхность образца был разработан Л. А. Шрейнером применительно к изучению процессов разрушения пород при бурении. В дальнейшем этот метод нашел широкое применение при сравнительной оценке различных типов пород по целому ряду механических характеристик, в том числе по пластичности.

Определение твердости (и пластичности) производится путем измерения нагрузки и деформации при вдавливании штампа в пришлифованную поверхность образца. Определения производятся на приборе УМГП-3. Образцы пород для испытаний должны иметь две плоскопараллельные пришлифованные поверхности и высоту 40—50 мм, остальные размеры могут быть различными, но не менее 30 мм.

В поверхность образца вдавливают штамп с плоским основанием, продолжая опыт до момента разрушения породы и образования под штампом лунки. В зависимости от зернистости и твердости породы для испытаний используются как цилиндрические, так и конические штампы площадью от 1 до 5 мм², изготовленные из стали или твердых сплавов.

В процессе испытаний величина нагрузки на штамп и деформация образца автоматически записываются на график.

По графику можно рассчитать следующие характеристики пород:

1. Твердость по штампу $P_{ш}$ (по Л. А. Шрейнеру), равную отношению нагрузки (до момента разрушения) к площади штампа:

$$P_{ш} = \frac{P_{разр}}{S_{ш}},$$

где $P_{разр}$ — нагрузка в момент разрушения;
$S_{ш}$ — площадь штампа.

2. Условный предел текучести P_1 (кгс/мм²), равный отношению нагрузки в точке пересечения линий (характеризующих упругую и пластическую деформации) к площади штампа:

$$P_1 = \frac{P_0}{S_{ш}},$$

где P_0 — нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности.

3. Коэффициент пластичности $K_{ш}$ (по Л. А. Шрейнеру), равный отношению количества общей работы, затраченной на разрушение, к работе приведенных упругих деформаций:

$$K_{ш} = \frac{A_{общ}}{A_{упр}},$$

где $A_{общ}$ — общая работа до разрушения;
$A_{упр}$ — работа упругой деформации.

Определяется также и ряд других показателей.

Сравнение твердости, определенной по штампу, с прочностью породы на одноосное сжатие показывает, что связь этих показателей сложная. Значение твердости по штампу обычно больше прочности на одноосное сжатие для хрупких пород в 15—18 раз, для пластичных — в 10—13 раз, для малопрочных — в 5—7 раз.

Прибор УМПГ-3 можно использовать также в качестве пресса высокой чувствительности, производящего автоматическую запись деформации. В частности, его можно применить для определения модуля Юнга (E) путем передачи нагрузки на цилиндрические или призматические образцы, зажатые между двумя плоскими пластинами.

Метод вдавливания штампа в неровную поверхность образцов разработан Л. И. Бароном и другими специалистами в Институте горного дела им. А. А. Скочинского. По этому методу цилиндрический штамп с плоским основанием вдавливается в необработанную, неровную поверхность образца. Высота образца для испытаний должна быть не менее 10—12 см, а параллельность граней порядка 5—10°.

Показатель, определяемый аналогично твердости по Л. А. Шрейнеру, называется в этом случае контактной прочностью. С величиной твердости ($P_ш$) конктактная прочность ($P_к$) связана линейной зависимостью

$$P_к = KP_ш,$$

где K — коэффициент, зависящий от петрографических особенностей пород и в среднем равный 0,62.

Методы определения динамической твердости пород. Относительную динамическую твердость горных пород чаще всего определяют по методу Шора, который сводится к замеру высоты отскока алмазного бойка от пришлифованной поверхности образца (пришлифовываются две параллельные поверхности).

Динамическая твердость определяется на приборе ШРС-1. Высота подъема алмазного бойка у этого прибора строго ограничена, высота отскока бойка фиксируется на специальной шкале. В зависимости от однородности пород, их минерального состава и структурных особенностей (прежде всего — по размеру зерен) на каждом образце производится от 15 до 50 ударов.

Относительная твердость образца оценивается по среднеарифметическим показателям величины отскока бойка. Повторные удары бойка в одну точку на поверхности образца при испытаниях не допускаются.

Твердость по Шору может служить косвенной характеристикой упругих свойств пород. Во многих случаях выявляется довольно тесная коррелятивная связь твердости по Шору с модулем Юнга.

Определение твердости склероскопом Тархова основано на том же принципе, только вместо алмазного бойка используется стальной шарик. Испытания проводятся на образцах массы не менее 100 г, имеющих две пришлифованные поверхности. Степень пришлифовки разных образцов должна быть одинакова, перед проведением эксперимента поверхности должны быть высушены. Стальные шарики сбрасываются на образец с определенной высоты через стеклянную трубку, высоту отскока шарика замечают на шкале, нанесенной на трубке.

Методы определения крепости, абразивности и буримости пород. Определение крепости. Крепость пород характеризуется коэффициентом крепости — условной величиной, приближенно показывающей сопротивляемость пород разрушению при их добыче. Этот коэффициент широко используется в практике геологоразведочных и горных работ. Величина его определяется различными способами:

1. По результатам определения временного сопротивления породы одноосному сжатию по формуле

$$f = \frac{R_{сж}}{100},$$

где $R_{сж}$ — временное сопротивление одноосному сжатию.

2. По результатам определения временного сопротивления породы раздавливанию — для образцов неправильной формы по формуле

$$f = \frac{R_{сж}}{19}.$$

3. По величине работы, затрачиваемой на дробление.

4. По сопротивляемости бурению.

5. Методом толчения, т. е. путем определения количества мелочи (в виде щебня), образующейся при толчении пробы в специальном трубном копре. Метод заключается в том, что на образец породы сбрасывается гиря массой 2,4 кг, количество мелочи, образовавшейся при каждом ударе, определяется по высоте столбика пыли в объемометре; число ударов n фиксируется. Коэффициент крепости рассчитывают по формуле

$$f = \frac{20n}{h},$$

где n — число ударов гири;

h — высота столбика пыли в объемометре.

Определение абразивности. Абразивностью называют способность горных пород изнашивать при трении контактирующие материалы. Наиболее простой метод определения абразивности предложен Л. И. Бароном и А. В. Кузнецовым, он заключается в оценке относительного истирания стальных цилиндрических стержней при вращательном движении о необработанную поверхность образца горной породы при следующих условиях испытания:

диаметр стержней	8 мм
осевая нагрузка на стержень	15 кгс
скорость вращения шпинделя	400 об/мин
продолжительность испытания	10 мин

Материалом для стержней служит сталь серебрянка (ГОСТ 2588-44). Установка для испытаний монтируется на базе настольного сверлильного станка изменение веса каждого стержня оценивается путем взвешивания до и после испытаний с точностью до 0,1 м.

Показатель абразивности «a» рассчитывается по формуле

$$a = \frac{\sum_1^{n_h} g_i}{2_{пр}},$$

где g_i — потеря в массе стержня за каждый парный опыт (истирание сначала одного, затем другого торца стержня), мг;

пр — число парных опытов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов Б. П. Упругие и прочностные свойства горных пород. — «Тр. Ин-та ИГЕМ», 1961, вып 43, 276 с.

2. Бишоп А., Хенкель Д. Определение свойств грунтов в трехосных испытаниях. Пер. с англ. М., Госстройиздат, 1961, 231 с.

3. Горькова И. М. Структурные и деформационные особенности осадочных пород. М., «Наука», 1965, 114 с.

4. Лабораторные методы оценки инженерно-геологических свойств рыхлых пород для целей мелиорации. М., 1970, 81 с. (ВСЕГИНГЕО).
5. Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов. М., Госгеолиздат, 1952, 234 с.
6. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М., «Высшая школа», 1968, 457 с.
7. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Под ред. Е. М. Сергеева. Изд-во МГУ, 1968, т. I, 347 с.; т. II, 369 с.
8. Николаев С. В., Свешников В. П. Методические рекомендации по изготовлению образцов из скальных пород для физико-механических испытаний. М., 1970, 104 с. (ВСЕГИНГЕО).
9. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М., «Наука», 1970, 115 с.
10. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. Авт.: А. И. Савич, В. И. Коптев, В. Н. Никитин, З. Г. Ященко. М., «Наука», 1969, 251 с.
11. Сергеев Е. М. и др. Грунтоведение. Изд-во МГУ, 1971, 595 с.
12. Сипидин В. П., Сидоров Н. Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Госстройиздат, 1963, 91 с.
13. Современные методы изучения физико-механических свойств горных пород. М., 1970, 149 с. (ВСЕГИНГЕО).
14. Троицкая М. Н. Пособие к лабораторным работам по механике грунтов. М., Изд-во МГУ, 1961, 304 с.
15. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М., «Недра», 1966, 303 с.

Глава третья

МЕХАНИКА ГРУНТОВ

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Механика грунтов — прикладной раздел механики, изучающий явления, происходящие в рыхлых (дисперсных) горных породах (грунтах) при различных силовых воздействиях.

В механике грунтов принята система условных обозначений, приведенная в табл. 39.

Расчетные методы механики грунтов основаны на теоретических положениях механики твердого тела, теории упругости, теории пластичности, реологии и некоторых других специальных наук. Поскольку свойства реальных грунтов сложны и многообразны, эти методы разработаны применительно к некоторым идеализированным моделям, которые могут быть распространены на большие группы грунтов одного типа. В используемых моделях сохраняются только такие свойства реальных грунтов, которые определяют механику исследуемых явлений и представляют интерес для решения задач определенного класса.

Механические модели описываются с помощью математических уравнений (математических моделей). В механике грунтов используются главным образом детерминированные (функциональные) математические модели, предполагающие наличие однозначного соответствия между исследуемыми переменными. Модели стохастического характера в механике грунтов до настоящего времени значительного развития не получили. Показатели свойств пород играют в составляемых уравнениях роль числовых параметров и во многом определяют степень надежности и точности выполняемых расчетов.

Наиболее общей моделью, используемой в механике грунтов, является модель сплошной среды, предполагающая, что деформации материала происходят без нарушения сплошности и могут быть описаны непрерывными функциями. Сплошная среда рассматривается в большинстве случаев как квазиоднородная и квазиизотропная. Квазиоднородной называется такая дисперсная среда, в которой размеры диспергированных элементов много меньше, чем размеры самого малого элемента объема, деформации которого являются предметом исследований. Это представление может быть распространено на любые горные породы—от глины до крупноглыбовых отложений, но в последнем случае свойства массива должны изучаться на очень больших объемах породы, измеряемых десятками кубометров.

Квазиизотропной считается такая дисперсная среда, в которой самый маленький элемент объема содержит анизотропные диспергированные элементы всевозможных ориентаций. В квазиизотропной среде изменение свойств по любым направлениям может рассматриваться как одинаковое.

В настоящее время получено некоторое число решений и для случаев неоднородной и анизотропной среды, например для массивов грунта с различными механическими характеристиками по отдельным осям или для случая, когда механические свойства грунта непрерывно изменяются по мощности слоя.

Система условных обозначений

Параметр	Принятое обозначение	Размерность
Линейные величины		
Координаты пространства (расстояния от начала координат вдоль соответствующих осей)	x, y, z	см; м
Размеры фундаментов:		
полуширина	b_1	»
полная ширина	b	»
полудлина	l_1	»
длина	l	»
Мощность слоя	h_c	»
Глубина заложения фундамента	h	»
Высота подпорной стенки	H	»
Радиус-вектор	R, r	»
Свойства грунтов		
Объемная масса грунта	γ	г/см³; т/м³
Объемная масса грунта, взвешенного в воде	$\gamma_{взв}$	То же
Плотность грунта	$\gamma_у$	»
Коэффициент пористости	ε	—
Начальный коэффициент пористости	ε_o	—
Естественная весовая влажность	W	%
Коэффициент сжимаемости	a	см²/кгс; м²/тс
Приведенный коэффициент сжимаемости	$a_o = \frac{a}{1+\varepsilon_o}$	То же
Модуль общей деформации	E_o	кгс/см²; тс/м²
Модуль упругости	E	То же
Коэффициент бокового расширения (коэффициент Пуассона)	μ_o	—
Коэффициент бокового давления	ξ	—
Коэффициент фильтрации	$K_ф$	м/сут
Угол внутреннего трения	φ	градусы
Коэффициент внутреннего трения	$f = \operatorname{tg}\varphi$	—
Сцепление	C	кгс/см²; тс/м²
Коэффициент вязкости	η	сек · кгс/см²
Сдвигающее усилие	τ	кгс/см²; тс/м²
Силы, напряжения, деформации		
Сосредоточенная сила	P	кгс; тс
Удельное давление, интенсивность равномерно распределенной нагрузки, нормальное напряжение	p, σ	кгс/см²; тс/м²
Составляющие напряжения по осям x, y, z	σ_x, σ_y, σ_z	То же
Тангенциальные (касательные) напряжения	τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yz}	»
Первая критическая нагрузка	$P_{кр_1}$	»
Вторая критическая, или предельная, нагрузка	$P_{кр_2}$, $P_п$	»
Напряжение, действующее по задней грани подпорной стенки	σ_a	»
Равнодействующая активного давления грунта на заднюю грань подпорной стенки	E_a	кгс; тс

Продолжение табл. 39

Параметр	Принятое обозначение	Размерность
То же, пассивного давления	$E_{пас}$	кгс ; тс
Линейная деформация, в том числе упругая, вязкая	s, sH, sN	см; м
Конечная осадка	s	см
Осадка ко времени t	s_t	»
Скорость деформэции	s	см/с; м/с
Прочие обозначения		
Время	t, τ	с, ч, год
Угол видимости	β	градусы

Примечание. Некоторые другие применяемые обозначения пояснены в тексте.

Модель сплошной среды подразделяется в свою очередь на три самостоятельные модели: твердого тела Гука, пластического тела Сен-Венана и вязкой жидкости Ньютона, которые отвечают трем фундаментальным свойствам грунтов: упругости, пластичности и вязкости.

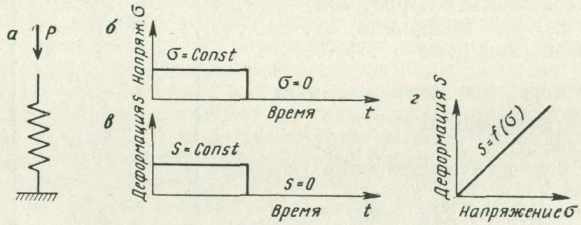


Рис. 22. Модель упругого тела Гука (Н):

а — символическое изображение модели; *б*— зависимость удельного давления σ от времени *t*; *в* — зависимость деформации *s* от времени *t*; *г* — зависимость деформации *s* от удельного давления σ

Модель Гука (символ *Н*) называется также моделью упругого тела. Свойство упругости обычно изображают в виде пружины (рис. 22), заделанной одним концом, ко второму концу пружины приложена сила *P*.

Основным уравнением, описывающим упругое тело, является закон Гука:

$$\sigma = E \cdot s, \tag{1}$$

т. е. напряжения, возникающие в упругом теле, прямо пропорциональны его деформации (E — модуль Юнга).

Для упругого тела характерны также следующие свойства: а) распространение деформаций происходит со скоростью звука и б) остаточные деформации равны нулю. В грунтах из всех этих свойств (в интервале малых напряжений) сохраняется только одна: линейная зависимость между напряжениями и деформациями. Однако этого достаточно для того, чтобы иметь право использовать при описании механических явлений в грунтах методы математической теории упругости.

Такая модификация модели упругого тела получила название модели линейно деформируемой среды или линейно деформируемого пространства. В формуле (1) модуль Юнга E заменяется в этом случае модулем общей деформации E_0.

Пластическое тело Сен-Венана (символ StV) схематически изображается в виде ползуна (рис. 23). Между ползуном и поверхностью действует сухое трение, остающееся постоянным при неизменном нормальном давлении. Пластическое тело не испытывает никаких деформаций (является абсолютно жестким) до тех пор, пока напряжения не превзойдут предела пластичности.

Поэтому основное уравнение пластического тела записывается в виде предельного соотношения

$$\tau = \tau_{пл}, \tag{2}$$

где τ — касательное напряжение;

$\tau_{пл}$ — предел пластичности.

При пластической деформации изменяется только форма тела, объем остается неизменным.

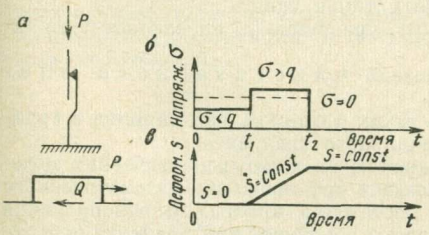


Рис. 23. Модель пластического тела Сен-Венана (*StV*)

а и *б* — символические изображения модели; *в* — зависимость удельного давления σ от времени *t*; *г* — зависимость деформации *s* от времени *t*

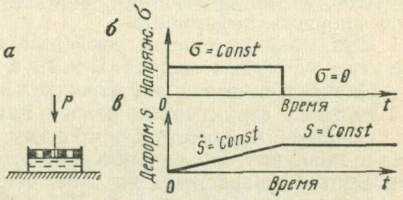


Рис. 24. Модель вязкой жидкости Ньютона (*N*)

а — символическое изображение модели; *б* — зависимость удельного давления σ от времени *t*; *в* — зависимость деформации *s* от времени *t*

Модель вязкой жидкости Ньютона (символ N) схематически изображается в виде цилиндра, заполненного вязкой жидкостью (рис. 24), в котором движется поршень с небольшими отверстиями. Основное уравнение записывается в виде

$$\sigma = \eta \cdot \dot{s}^*, \tag{3}$$

т. е. напряжения в вязкой жидкости пропорциональны скорости деформации (η — коэффициент вязкости).

В механике грунтов используются и более сложные модели, представляющие собой различные комбинации охарактеризованных выше простых моделей, играющих роль составных элементов. При этом они могут соединяться между собой параллельно или последовательно. При параллельном соединении полная нагрузка на тело складывается из нагрузок, передаваемых отдельными элементами, а скорости деформации элементов одинаковы. При последовательном соединении полная скорость деформации равна сумме скоростей деформаций составляющих элементов, причем каждый из них передает полную нагрузку.

Если соединить вязкий элемент с упругим параллельно, то получим модель вязко-упругого тела Фойгта. Оно описывается зависимостью

$$\sigma = E \cdot s + \eta \cdot \dot{s}, \tag{4}$$

которую обычно называют законом деформирования простого нерелаксирующего тела.

* Здесь и далее точкой указывается производная по времени.

Если соединить вязкий и упругий элементы последовательно, получим модель упруго-вязкого тела Максвелла, которая описывается уравнением

$$\sigma + n\dot{\sigma} = \eta \cdot \dot{s}, \tag{5}$$

где $n = \frac{\mu}{E}$ — постоянная, называемая временем релаксации.

При постоянной во времени деформации ($s = \text{const}$) напряжения будут изменяться по закону

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{n}}. \tag{6}$$

Эта зависимость описывает релаксацию напряжений, которая происходит по затухающему показательному закону, причем σ стремится к нулю. Наиболее близко такая модель отвечает поведению под нагрузкой льда, льдонасыщенных мерзлых грунтов и некоторых типов глин.

При постоянном напряжении ($\sigma = \text{const}$) уравнение (5) определяет постоянную скорость деформации.

При дополнительном введении в модель пластического элемента получим модель Бингама.

Пластический элемент отражает роль таких факторов, как наличие в грунтах жестких структурных связей или начального градиента.

Основное препятствие широкому внедрению сложных реологических моделей в практику инженерных расчетов создает трудность их математического описания и разработки на этой основе достаточно простых и одновременно надежных расчетных методов. По этой причине в современной практике используются главным образом методы, основанные на модели Гука; они вошли и в различные руководства, пособия, инструктивные и нормативные документы.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМОЙ СРЕДЫ

Силы, действующие на массив грунтов, обычно подразделяются на объемные, распределенные по всему объему грунта (гравитационные, фильтрационные, сейсмические и др.), и поверхностные — приложенные к поверхности (нагрузки от строящихся сооружений). Предел силы, действующей на площадь сечения грунтового массива, когда она стремится к нулю, называется напряжением.

Полное напряжение состоит из двух компонент: эффективного напряжения, действующего на скелет грунта и вызывающего изменение его объема, и нейтрального, действующего на поровый раствор и являющегося гидростатическим. Напряжения могут быть сжимающими, растягивающими и сдвигающими.

Напряженное состояние в любой точке массива грунта (рис. 25) в ортогональной системе координат определяется девятью составляющими, которые могут быть записаны в форме матрицы, носящей название тензора напряжений

$$\begin{Vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{Vmatrix}. \tag{7}$$

Поскольку тангенциальные напряжения, действующие на взаимно перпендикулярных плоскостях, попарно равны ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$; $\tau_{xz} = \tau_{zx}$; $\tau_{yz} = \tau_{zy}$), тензор напряжений является симметричным

$$\begin{Vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ & \sigma_y & \tau_{zy} \\ & & \sigma_z \end{Vmatrix}, \tag{8}$$

а для описания напряженного состояния достаточно знать шесть составляющих: σ_x, σ_y, σ_z, τ_{yx}, τ_{zx}, τ_{zy},

III. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГРУНТА

Для вычисления напряжений в массиве грунта применяются уравнения теории упругости (линейно деформируемого тела). Уравнения справедливы для всех случаев, когда; а) напряжения не вызывают появления в грунтах областей пластических деформаций; б) достигнута стабилизация напряжений и вызванных ими деформаций.

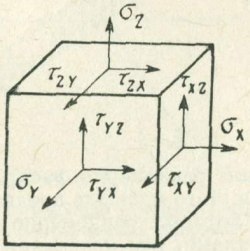


Рис. 25. Составляющие напряжений, действующих на элементарный объем грунта

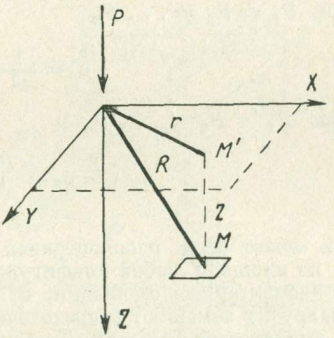


Рис. 26. Расчетная схема к формуле Бусинеска (9)

В механике грунтов рассматриваются два случая распределения напряжений: 1) от нагрузок, передаваемых через гибкие фундаменты и насыпи; 2) от нагрузок, передаваемых через жесткие фундаменты.

Нагрузки, передаваемые через гибкие фундаменты и насыпи. В этом случае нагрузка следует деформациям поверхности массива и сжимающие напряжения на поверхности массива равны интенсивности нагрузки.

Сосредоточенная сила, нормальная к поверхности полупространства. Вертикальное сжимающее напряжение в точке M вычисляется по формуле Буссинеска

$$\sigma_z = \frac{3Pr^3}{2\pi R^5} = \frac{3P}{2\pi z^2} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}} = K_1 \frac{P}{z^2}. \tag{9}$$

Обозначения указаны на рис. 26, значения коэффициента K_1 приведены в табл. 40.

Таблица 40

Значения коэффициента K_1 в формуле (9)

$\frac{r}{z}$	K_1	$\frac{r}{z}$	K_1	$\frac{r}{z}$	K_1	$\frac{r}{z}$	K_1	$\frac{r}{z}$	K_1
0,0	0,478	0,80	0,139	1,70	0,0160	2,60	0,0029	3,50	0,0007
0,05	0,475	0,90	0,108	1,80	0,0129	2,70	0,0024	3,60	0,0007
0,1	0,466	1,00	0,084	1,90	0,0105	2,80	0,0021	3,70	0,0006
0,2	0,433	1,10	0,0658	2,00	0,0085	2,90	0,0017	3,80	0,0005
0,3	0,385	1,20	0,0513	2,10	0,0070	3,00	0,0015	3,90	0,0005
0,4	0,329	1,30	0,0402	2,20	0,0058	3,10	0,0013	4,00	0,0004
0,5	0,273	1,40	0,0317	2,30	0,0048	3,20	0,0011	4,50	0,0002
0,6	0,221	1,50	0,0251	2,40	0,0040	3,30	0,0010	5,00	0,0001
0,7	0,176	1,60	0,0200	2,50	0,0034	3,40	0,0009	6,00	0,0001

При нескольких сосредоточенных нагрузках может быть применен принцип суперпозиции:

а) при $P_1 \neq P_2 \neq \ldots P_n$

$$\sigma_z = \frac{1}{z^2} \sum_{i=1}^{n} K_i P_i, \tag{10}$$

б) при $P_1 = P_2 = \ldots P_n$

$$\sigma_z = \frac{P}{z^2} \sum_{i=1}^{n} K_i. \tag{11}$$

Метод может быть распространен на случай равномерно распределенной нагрузки по площади любой конфигурации. Для этого площадь предварительно делят на элементарные площадки, в пределах которых равномерно распределенную нагрузку заменяют сосредоточенными силами. Это позволяет использовать для вычислений формулу (9). Сжимающее напряжение в точке M вычисляют по формуле

$$\sigma_z = \frac{1}{z^2} \sum_{i=1}^{n} K_i P_i, \tag{12}$$

где n — число элементов, на которые разделена загруженная площадь.

Линейная (погонная) равномерно распределенная нагрузка, нормальная к поверхности. Вертикальное сжимающее напряжение в точке M вычисляется по формуле

$$\sigma_z = \frac{2P}{\pi} \cdot \frac{z^3}{R^4} = \frac{2P}{\pi z} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{z}\right)^2\right]^2} = K_2 \frac{P}{z}. \tag{13}$$

Обозначения указаны на рис. 27, значения коэффициента приведены в табл. 41.

Нагрузка, равномерно распределенная по гибкой полосе. Вертикальное сжимающее напряжение в точке M вычисляется по формуле

$$\sigma_z = -\frac{P}{\pi}\left[\beta_1 - (\pm\beta_2) + \frac{1}{2}\sin 2\beta_1 - \frac{1}{2}\sin(\pm\beta_2)\right]. \tag{14}$$

Таблица 41

Значения коэффициента K_2 в формуле (13)

$\frac{x}{z}$	K_2	$\frac{x}{z}$	K_2	$\frac{x}{z}$	K_2	$\frac{x}{z}$	K_2	$\frac{x}{z}$	K_2
0,0	0,636	0,8	0,236	1,7	0,0423	2,6	0,0106	3,5	0,0048
0,05	0,633	0,9	0,194	1,8	0,0354	2,7	0,0093	3,6	0,0045
0,1	0,624	1,0	0,159	1,9	0,0299	2,8	0,0081	3,7	0,0043
0,2	0,600	1,1	0,130	2,0	0,0255	2,9	0,0072	3,8	0,0041
0,3	0,535	1,2	0,107	2,1	0,0218	3,0	0,0064	3,9	0,0039
0,4	0,472	1,3	0,088	2,2	0,0186	3,1	0,0060	4,0	0,0037
0,5	0,407	1,4	0,073	2,3	0,0161	3,2	0,0057	4,5	0,0030
0,6	0,344	1,5	0,0602	2,4	0,0140	3,3	0,0054	5,0	0,0024
0,7	0,280	1,6	0,0502	2,5	0,0121	3,4	0,0051	6,0	0,0017

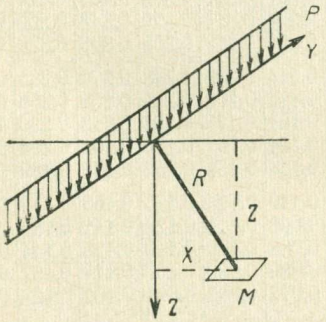


Рис. 27. Расчетная схема к формуле (13) (линейная нагрузка)

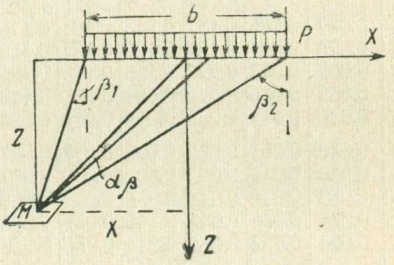


Рис. 28. Расчетная схема к формуле (14) (полосовая нагрузка)

Обозначения к формуле (14) указаны на рис. 28. Значение угла β_2 принимается со знаком плюс для всех точек M, лежащих вне пределов границ загруженной полосы, и со знаком минус для точек M, лежащих в этих границам. Для точек, расположенных в осевой плоскости загруженной полосы, где $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, формула принимает вид

$$\sigma_z = -\frac{P}{\pi}(2\beta + \sin 2\beta). \qquad (15)$$

Распределение напряжений σ_z в горизонтальных плоскостях на различной глубине z от действия полосовой равномерно распределенной нагрузки показано на рис. 29.

Нагрузка, равномерно распределенная по гибкой прямоугольной площадке. Сжимающее напряжение σ_z^{yr} в любой точке, лежащей под углом загруженного гибкого прямоугольника со сторонами l и b, вычисляется по формуле

$$\sigma_z^{yr} = \frac{P}{2\pi}\left[\frac{mn}{\sqrt{1+m^2+n^2}} \cdot \frac{1+m^2+2n^2}{(1+n^2)(m^2+n^2)} + \arcsin\frac{m}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{1+n^2}}\right] = K_3 P. \qquad (16)$$

где $n = \frac{l}{b}$, $m = \frac{z}{b}$,

. Таблица 42

Значения коэффициента K_4 в формуле (17)

m	Для круглых фундаментов	Для прямоугольных фундаментов с отношением сторон n:											Для ленточных фундаментов при $n \geq 10$
		1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,4	2,8	3,2	4	5	
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,949	0,960	0,968	0,972	0,974	0,975	0,976	0,976	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977
0,8	0,756	0,800	0,830	0,848	0,859	0,866	0,870	0,875	0,878	0,879	0,880	0,881	0,881
1,2	0,547	0,606	0,652	0,682	0,703	0,717	0,727	0,740	0,746	0,749	0,753	0 754	0,755
1,6	0,390	0,449	0,496	0,532	0,558	0,578	0,593	0,612	0,623	0,630	0,636	0,639	0,642
2,0	0,285	0,336	0,379	0,414	0,441	0,463	0,481	0,505	0,520	0,529	0,540	0,545	0,559
2,4	0,214	0,257	0,294	0,325	0,352	0,374	0,392	0,419	0,437	0,449	0,462	0,470	0,477
2,8	0,165	0,201	0,232	0,260	0,284	0,304	0,321	0,350	0,369	0,383	0,400	0,410	0,420
3,2	0,130	0,160	0,187	0,210	0,232	0,251	0,267	0,294	0,314	0,329	0,348	0,360	0,374
3,6	0,106	0,130	0,153	0,173	0,192	0,209	0,224	0,250	0,270	0,285	0,305	0,320	0,337
4,0	0,087	0,108	0,127	0,145	0,161	0,176	0,190	0,214	0,233	0,248	0,270	0,285	0,306
4,4	0,073	0,091	0,107	0,122	0,137	0,150	0,163	0,185	0,203	0,218	0,239	0,256	0,280
4,8	0,062	0,077	0,092	0,105	0,118	0,130	0,141	0,161	0,178	0,192	0,213	0,230	0,258
5,2	0,053	0,066	0,079	0,091	0,102	0,112	0,123	0,141	0,157	0,170	0,191	0,208	0,239
5,6	0,046	0,058	0,069	0,079	0,089	0,099	0,108	0,124	0,139	0,152	0,172	0,189	0,223
6,0	0,040	0,051	0,060	0,070	0,078	0,087	0,095	0,110	0,124	0,136	0,155	0,172	0,208
6,4	0,036	0,045	0,053	0,062	0,070	0,077	0,085	0,098	0,111	0,122	0,141	0,158	0,196
6 8	0.032	0,040	0.048	0,055	0,062	0,069	0,076	0,088	0,100	0,110	0,128	0,144	0,184
7,2	0,028	0,036	0,042	0,049	0,056	0,062	0,068	0,080	0,090	0,100	0,117	0,133	0,175
7,6	0,024	0,032	0,038	0,044	0,050	0,056	0,062	0,072	0,082	0,091	0,107	0,123	0,166
8,0	0,022	0,029	0,035	0,040	0,046	0,051	0,056	0,066	0,075	0,084	0,098	0,113	0,158
8,4	0,021	0,026	0,032	0,037	0,042	0,046	0,051	0,060	0,069	0,077	0,091	0,105	0,150
8,8	0,019	0,024	0,029	0,034	0,038	0,042	0,047	0,055	0,063	0,070	0,084	0,098	0,144
9,2	0,018	0,022	0,026	0,031	0,035	0,039	0,043	0,051	0,058	0,065	0,078	0,091	0,137
9,6	0,016	0,020	0,024	0,028	0,032	0,036	0,040	0,047	0,054	0,060	0,072	0,085	0,132
10	0,015	0,019	0,022	0,026	0,030	0,033	0,037	0,044	0,050	0,056	0,067	0,079	0,126
11	0,011	0,017	0,020	0,023	0,027	0,029	0,033	0,040	0,044	0,050	0,060	0,071	0,114
12	0,009	0,015	0,018	0,020	0,024	0,026	0,028	0,034	0,038	0,044	0,051	0,060	0,104

Примечание. Для промежуточных значений n и m величина коэффициента K_4 определяется интерполяцией.

Используя принцип суперпозиции, формулу (16) можно применить для определения напряжения под центральной точкой, которая в этом случае рассматривается как четырежды угловая,

$$\sigma_z = 4K_3 p = K_4 P. \qquad (17)$$

Значения параметров m, n в этом случае равны: $n = \frac{l}{b}$, $m = \frac{2z}{b}$. Значения коэффициента K_4 (в СНиП) обозначаются α (табл. 42). При вычислении угловых напряжений значения K_4 нужно предварительно разделить на 4.

Принцип суперпозиции может быть использован также для вычисления напряжений в любой точке под гибкой прямоугольной площадкой, загруженной равномерно распределенной нагрузкой — метод угловых точек (рис. 30):

а) проекция точки находится в контуре прямоугольника (рис. 30, *а*):

$$\sigma_z = \sigma_z^{(1)} + \sigma_z^{(2)} + \sigma_z^{(3)} + \sigma_z^{(4)} =$$
$$= p\,(K_s^{(1)} + K_s^{(2)} + K_s^{(3)} + K_s^{(4)});$$

б) точка расположена за контуром прямоугольника (рис. 30, б).

$$\sigma_z = \sigma_z^{(HBEM^1)} - \sigma_z^{(AHFM^1)} -$$
$$-\sigma_z^{(CEM^1G)} + \sigma_z^{(GDFM^1)}.$$

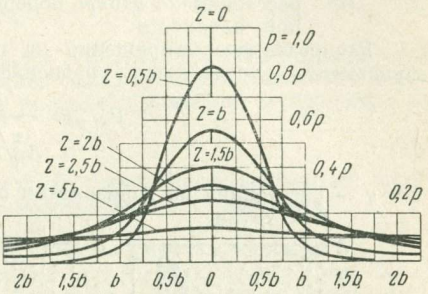


Рис. 29. Распространение напряжений σ_z в горизонтальных плоскостях на различной глубине z в зависимости от нагрузки, распределенной по гибкой полосе

Нагрузки, передаваемые через жесткие фундаменты. Распределение напряжений по подошве жесткого фундамента существенно иное, чем под гибкими площадками (рис. 31), что объясняется перераспределением действующих напряжений

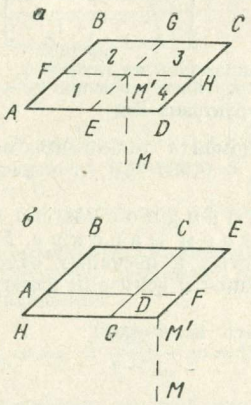


Рис. 30. Различные случаи применения метода угловых точек:

а — проекция точки *M* находится в контуре загруженного прямоугольника; *б* — проекция точки *M* находится за пределами контура загруженного прямоугольника

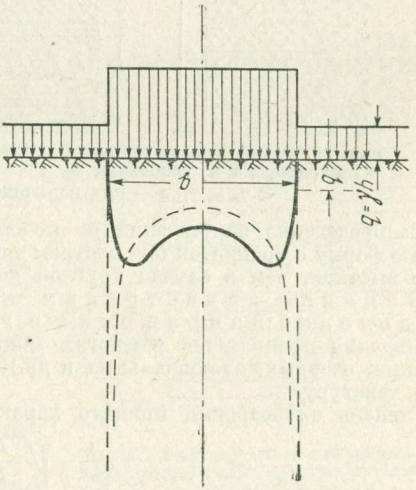


Рис. 31. Теоретическая и практическая эпюры распределения контактных напряжений по подошве фундамента при осевой нагрузке

с отклонением от равномерного. При круглой форме жестких фундаментов распределение напряжений вычисляется по формуле

$$P_{x,\,y} = \frac{P_{\text{ср}}}{2\sqrt{1 - \frac{\rho^2}{r^2}}}, \qquad (18)$$

где $P_{ср}$ — среднее удельное давление, передаваемое на фундамент;
r — радиус подошвы жесткого фундамента круглой формы;
ρ — расстояние от центра подошвы фундамента до любой точки на граничной плоскости.

Распределение напряжений на подошве абсолютно жесткого ленточного фундамента определяется уравнением

$$P_{x,\,y}=\frac{2P_{ср}}{\pi\sqrt{1-\left(\frac{y}{b_1}\right)^2}}, \qquad (19)$$

где y — расстояние по горизонтали от середины фундамента до рассматриваемой точки.

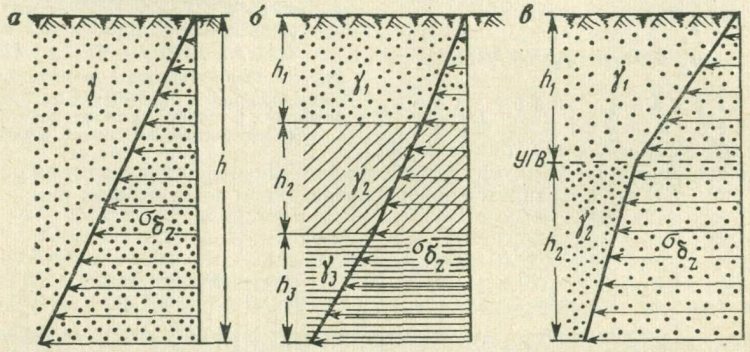


Рис. 32. Распределение природных (бытовых) напряжений по глубине z
а — при однородном основании $\sigma_{б\,z}$; *б* — при многослойном основании $\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_3$; *в* — при наличии уровня грунтовых вод

Распределение напряжений по подошве фундамента также имеет седловидную форму с ординатой под центром тяжести $\rho_0 = 0{,}637\,P_{ср}$, т. е. несколько более высокой, чем в случае круглой подошвы.

Влияние анизотропии и неоднородности на распределение напряжений в грунтовом массиве. *Влияние анизотропии* проявляется у многих типов глинистых и песчаных отложений (морских, озерных, аллювиальных и др.), в особенности если они имеют слоистую текстуру.

Степень анизотропии принято характеризовать величиной

$$K_a=\sqrt{\frac{E_r}{E_z}}, \qquad (20)$$

где E_r и E_z — модули общей деформации, вычисленные по вертикальному (E_z) и горизонтальному (E_r) направлениям.

Нормальные напряжения (σ_z) в анизотропном массиве могут быть вычислены с достаточным приближением по формуле

$$\sigma_z'=\frac{\sigma_z}{K_a}. \qquad (21)$$

Так, например, при $K_a=\sqrt{\frac{100}{200}}=0{,}71$ нормальное напряжение составит:

$$\sigma_z'=\frac{\sigma_z}{K_a}=\frac{\sigma_z}{0{,}71}=1{,}41\sigma_z. \qquad (22)$$

Влияние неоднородности проявляется в той или иной степени во всех грунтах. Наиболее обычным случаем является увеличение плотности грунта, а сле-

довательно, уменьшение его сжимаемости с глубиной в соответствии со степенным законом:

$$E_z = E_z^{\nu}, \tag{23}$$

где ν — показатель неоднородности.

Распределение напряжений от собственного веса грунта. Давление от собственного веса грунта называется *бытовым* или *природным*. При однородном грунте природное давление вычисляется по формуле

$$\sigma_{бz} = \gamma z. \tag{24}$$

Если объемный вес измеряется в гс/см³ или тс/м³, а напряжение желательно получить в кгс/см², то вводится пересчетный коэффициент 0,1, например:

$$\sigma_{бz} = 0{,}1\gamma z. \tag{25}$$

Эпюра распределения напряжений $\sigma_{б\,z}$ имеет треугольную форму (рис. 32, *а*) с началом отсчета от поверхности земли, а не от нижней грани фундамента. При наличии фильтрационного градиента I расчет производится по формуле

$$\sigma_{бx} = \gamma z - \gamma_в I, \tag{26}$$

где I — среднее значение вертикальной составляющей фильтрационного градиента (при направлении фильтрации вверх принимается со знаком плюс, вниз — со знаком минус).

Таблица 43

Значения параметров в формуле (27)

Порода	ζ	μ_0
Глина	0,75	0,73
Рыхлый песок с $\varepsilon = 0{,}9$	0,64	0,39
Песок средней плотности с $\varepsilon = 0{,}7$	0,52	0,34
Песок плотный с $\varepsilon = 0{,}6$	0,49	0,33

Нормальные напряжения $\sigma_{бx} = \sigma_{бy}$ при бытовом давлении определяются по уравнению

$$I_{бx} = I_{бy} = \frac{\mu_0}{1-\mu_0}\gamma z = \zeta\gamma z. \tag{27}$$

Значения μ_0 и ζ для некоторых разностей грунтов приведены в табл. 43.

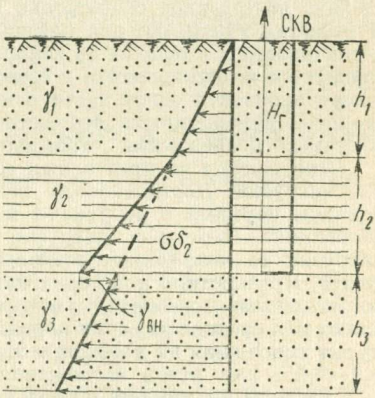


Рис. 33. Распределение природных (бытовых) напряжений $\sigma_{б\,z}$ по глубине z при наличии напорных вод

При многослойном основании напряжение $\sigma_{б\,z}$ равно сумме напряжений, возникающих от веса вышележащих слоев (рис. 32, *б*):

$$\sigma_{бz} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \ldots + \gamma_n h_n = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i. \tag{28}$$

В водоносных грунтах вычисление объемного веса производится с учетом взвешивающей силы воды (рис. 32, *в*):

$$\gamma_{взв} = \frac{\gamma_у - 1}{1+\varepsilon}. \tag{29}$$

В глинах, где вся вода находится в связанном состоянии, взвешивание можно не учитывать.

При наличии напорного горизонта (рис. 33) увеличивается величина избыточного напора на подошву водоупорного слоя, перекрывающего горизонт:

$$\sigma_{б_z} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 - H\gamma_в + \gamma_3 h_3. \quad (30)$$

Изменение положения уровня грунтовых вод или величины напора приводит к увеличению (или уменьшению) площади эпюры дополнительной нагрузки (разгрузки) нижележащих толщ и перемещениям поверхности земли вверх или вниз.

При заложении котлованов, карьеров, разрезов, глубоких выемок происходит *разгрузка массива грунта*. Изменения напряжения рассматриваются как отрицательные приращения, вызванные отрицательной нагрузкой. Расчеты производят по формулам для равномерно распределенной или треугольной нагрузки (при учете влияния откосов).

IV. РАСЧЕТЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ

Общие положения. Предельная нагрузка, которую можно передать на естественное основание сооружения, определяется переходом основания и возведенного на нем сооружения в *предельные* состояния. Предельным называется такое состояние массива грунта, когда малейшее увеличение нагрузки может сделать возведенное сооружение непригодным для дальнейшей эксплуатации. В расчетах учитывают два предельных состояния: первое — по прочности или устойчивости и второе — по деформациям. Первое предельное состояние характеризуется возникновением в основании поверхностей скольжения, по которым может произойти сдвиг части основания вместе с фундаментами сооружения, второе — деформациями основания таких размеров, которые вызывают недопустимые повреждения строительных конструкций.

При расчете по предельным состояниям различают *нормативные* и *расчетные* нагрузки. *Нормативными* называют наибольшие нагрузки, которые установлены нормами и допускают нормальную эксплуатацию конструкций и их оснований. *Расчетные* нагрузки получают путем умножения нормативных нагрузок на коэффициенты перегрузки, величина которых колеблется от 1,1 до 1,4. Прочностные и деформативные свойства грунтов также характеризуются нормативными и расчетными показателями. *Нормативные* характеристики вычисляют как средние из серии параллельных испытаний (не менее 7), *расчетные* — путем умножения на коэффициент однородности (обычно принимают в пределах 0,8—0,95) или путем вычисления с помощью статистических методов.

Расчеты по второму предельному состоянию (осадкам). Осадками принято называть вертикальные перемещения основания вместе с возведенными на нем сооружениями под воздействием нагрузок от их веса. Различают *конечные осадки*, т. е. осадки, достигшие своего максимального развития при завершении уплотнения грунта, и осадки, наблюдающиеся в процессе уплотнения для любого промежуточного значения времени t. Расчет по второму предельному состоянию основан на соблюдении неравенства

$$s \leqslant s_{пр}, \quad (31)$$

где s — конечная осадка, вычисляемая по одной из рассматриваемых ниже формул;

$s_{пр}$ — предельная величина осадки для данного типа и конструкции сооружения, устанавливаемая по таблицам (СНиП II-Б.1-62).

Расчет по второму предельному состоянию выполняется для всех зданий и сооружений, возведенных на нескальном основании.

Расчет конечных осадок фундаментов мелкого заложения (в условиях линейности). Применяется модель однородного,

изотропного линейно-деформируемого пространства. В зависимости от условий работы основания используются формулы, выведенные из условий одномерного и многомерного сжатия.

Формулы для случая одномерного сжатия находят применение при большой площади загрузки, в два и более раз превышающей мощность слоя сжимаемого грунта. Боковое расширение не учитывается. Предполагается, что величина нормальных напряжений остается постоянной по всей мощности сжимаемой толщи. При однослойном строении толщи расчет производится по формуле

$$s = hP\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1-\varepsilon_0} = ha_0P, \tag{32}$$

при многослойном — по формуле

$$s = \sum_{i=1}^{n} h_i P \frac{\varepsilon_{0i} - \varepsilon_{1i}}{1-\varepsilon_{0i}} = \sum_{i=1}^{n} h_i a_{0i} P. \tag{33}$$

Значения коэффициента пористости ε_0 и ε_1 и приведенного коэффициента сжимаемости a_0 устанавливаются в лаборатории для точек, отвечающих половине мощности отдельных слоев.

Формулы многомерного сжатия учитывают не только сжатие грунта по оси Z, но и перемещения его в стороны. Расчеты производятся по нескольким формулам:

1. По *формуле Шлейхера*, выведенной для случая однослойного однородного основания:

$$s = \frac{Pb\omega}{E_0}(1-\mu_0), \tag{34}$$

где ω — коэффициент, зависящий от формы фундамента и глубины залегания несжимаемого слоя.

Для расчета средней осадки гибкого фундамента значения ω можно получить из табл. 44.

Таблица 44

Значения коэффициента ω в формуле (34)

Формы подошвы фундамента	Глубина залегания «скалы»				
	$1b$	$2b$	$5b$	$10\ b$	$>10\ b$
Круг	0,58	0,70	0,78	0,81	0,85
Прямоугольник при отношении сторон, равном:					
1	0,62	0,77	0,87	0,91	0,95
2	0,70	0,96	1,16	1,23	1,30
3	0,73	1,04	1,31	1,42	1,53
10	0,77	1,15	1,62	1,90	2,25
Полосы шириной b	0,79	1,20	1,77	2,19	3,69

2. Для расчета средней осадки слоистого основания применяется *формула К. Е. Егорова*:

$$s = bP\sum_{i=1}^{n}\frac{K_i - K_{i-1}}{C_i}, \tag{35}$$

где $C_i = \frac{E_{0\,i}}{1-\mu_{0\,i}^2}$ — коэффициент линейно деформируемого полупространства;

K_i — безразмерная функция, устанавливаемая по табл. 45 в зависимости от отношения сторон фундамента $n = \frac{l}{b}$ и относительной глубины заложения $m = \frac{2z}{b}$.

Таблица 45

Значение безразмерной функции K_i в формуле (43) К. Е. Егорова для фундаментов различной формы

$\frac{2z}{b}$	Круг	Прямоугольник					Лента $n=\infty$
		$n=1$	$n=1{,}5$	$n=2$	$n=3$	$n=5$	
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2	0,045	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,052
0,4	0,090	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,104
0,6	0,135	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,156
0,8	0,179	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,208
1,0	0,233	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,260
1,2	0,266	0,299	0,300	0,300	0,300	0,300	0,311
1,4	0,308	0,342	0,349	0,349	0,349	0,349	0,362
1,6	0,348	0,381	0,395	0,397	0,397	0,397	0,412
1,8	0,382	0,415	0,437	0,442	0,442	0,442	0,462
2,0	0,411	0,446	0,476	0,484	0,484	0,484	0,511
2,2	0,437	0,474	0,511	0,524	0,525	0,525	0,560
2,4	0,461	0,499	0,543	0,561	0,566	0,566	0,605
2,6	0,482	0,522	0,573	0,595	0,604	0,604	0,648
2,8	0,501	0,542	0,601	0,626	0,640	0,640	0,687
3,0	0,517	0,560	0,625	0,655	0,674	0,674	0,726
3,2	0,532	0,577	0,647	0,682	0,706	0,708	0,763
3,4	0,546	0,592	0,668	0,707	0,736	0,741	0,798
3,6	0,558	0,606	0,688	0,730	0,764	0,772	0,831
3,8	0,569	0,618	0,706	0,752	0,791	0,808	0,862
4,0	0,579	0,630	0,722	0 773	0,816	0,830	0,892
4,2	0,588	0,641	0,737	0,791	0,839	0,853	0,921
4,4	0,596	0,651	0,751	0,809	0,861	0,885	0,949
4,6	0,604	0,660	0,764	0,824	0,888	0,908	0,976
4,8	0,611	0,668	0,776	0,841	0,902	0,932	1,001
5,0	0,618	0,676	0,787	0,855	0,921	0,955	1,026
5,2	0,624	0,683	0,798	0,868	0,939	0,977	1,050
5,4	0,630	0,690	0,808	0,881	0,955	0,998	1,073
5,6	0,635	0,697	0,818	0,893	0,971	1,018	1,095
5,8	0,640	0,703	0,827	0,904	0,989	1,038	1,117
6,0	0,645	0,709	0,836	0,913	1,000	1,057	1,138

Н. А. Цытович отмечает, что при пользовании значениями коэффициентов, взятыми из таблиц К. Е. Егорова, результаты расчета всегда оказываются заниженными по сравнению с точными решениями.

3. *Метод эквивалентного слоя* предложен Н. А. Цытовичем. Идея метода сводится к вычислению осадки слоя грунта такой мощности (эквивалентный

слой), которая в условиях одномерного сжатия численно равна величине осадки грунта под фундаментом заданного размера в условиях многомерного сжатия:

$$S = hs \cdot a_o \cdot P, \tag{36}$$

где h_s — мощность эквивалентного слоя, равная

$$hs = A \cdot \omega \cdot b. \tag{37}$$

Здесь A — коэффициент, зависящий от бокового расширения грунта:

$$A = \frac{(1-\mu_o)^2}{1-2\mu_o};$$

ω — коэффициент, зависящий от формы и жесткости фундамента.

Значения произведения $A \cdot \omega$, получившего название коэффициента *эквивалентного слоя*, можно взять из табл. 46.

Таблица 46

Значение коэффициента эквивалентного слоя для жестких фундаментов

Коэффициент Пуассона μ_o	Соотношение сторон подошвы фундамента $\frac{l}{b}$					
	1	1,5	2	3	5	10
0,10	0,89	1,09	1,23	1,46	1,74	2,15
0,20	0,94	1,15	1,30	1,54	1,84	2,26
0,25	0,99	1,21	1,37	1,62	1,94	2,38
0,30	1,08	1,32	1,49	1,76	2,11	2,60
0,35	1,24	1,52	1,72	2,01	2,42	2,98
0,40	1,58	1,94	2,20	2,59	3,10	3,82

Метод послойного суммирования, рекомендуемый СНиП II-Б.1-62, основан на суммировании величин осадки элементарных слоев, на которые разбивается сжимаемая толща согласно формуле

$$s = \sum_{i=1}^{n} h_i \frac{\beta \sigma_{z_i}}{E_{o_i}}, \tag{38}$$

где h_i — толщина i-го слоя (см), принимаемая равной 0,2 b;

σ_{z_i} — полусумма вертикальных нормальных напряжений, возникающих на верхней и нижней границах i-го слоя грунта от давления, передаваемого фундаментам;

β — безразмерный коэффициент, корректирующий упрощенную схему расчета, принимаемый равным 0,8 для всех видов грунтов.

Напряжения вычисляются по формуле (24), но с учетом уменьшения давления на основание за счет веса вынутого из котлована грунта. Поэтому формула записывается в следующем виде:

$$\sigma_z = K_4 (P - \sigma_{б_h}) = K_4 (P - \gamma_o h), \tag{39}$$

где $\sigma_{б_h}$ — природное (бытовое) давление на отметке подошвы фундамента.

Следует отметить, что принятое значение коэффициента $\beta = 0{,}8$ превышает значения, получаемые теоретическим расчетом:

$$\beta = \frac{1-2\mu_0^2}{1-\mu_0}.$$

Для глин и суглинков это превышение достигает 1,4—1,7.

При учете влияния соседних фундаментов используется метод угловых точек.

Мощность сжимаемой толщи устанавливается по правилам, изложенным ниже.

Установление мощности сжимаемой толщи. В методе послойного суммирования (СНиП II-Б.1-62) границу сжимаемой толщи, которая получила название *активной зоны*, предлагается ограничивать таким значением глубины z (считая от подошвы фундамента), где удовлетворяется условие:

$$\sigma_z = 0{,}2\sigma_{б\,z}. \qquad (40)$$

Положение границы рекомендуется устанавливать с точностью, отвечающей 0,05 кгс/см². Этот условный критерий выработан на основании обобщения результатов многочисленных сопоставлений величин расчетной и фактической осадок и в большинстве случаев удовлетворяет требованиям практики. Однако иногда наблюдаются случаи, когда мощность активной зоны нужно принимать и больше, и меньше указанной. Согласно В. Г. Березанцеву, большей получается толща в тех случаях, когда до глубины, где $\sigma_z = 0{,}2\,\sigma_{б\,z}$, залегает сильносжимаемый слой. В этих случаях В. Г. Березанцев рекомендует использовать условие $\sigma_z = 0{,}1\,\sigma_{б\,z}$. Меньшей получается толща в тех случаях, когда сжимаемость грунта значительно уменьшается с глубиной. Наиболее часто такая картина наблюдается при значительной мощности сжимаемой толщи, т. е. при большой ширине фундаментов ($b > 10$ м). Нормы на проектирование гидротехнических сооружений (СНиП II-Б. 3-62) с большими опорными площадями предлагают применять для определения мощности активной зоны критерий $\sigma_z = 0{,}5\,\sigma_{б\,z}$.

В методе Н. А. Цытовича мощность сжимаемой толщи ограничивают удвоенной мощностью эквивалентного слоя ($2\,hs$). В ряде случаев мощность сжимаемой толщи можно определить экспериментально, исходя из поведения грунта под нагрузкой. Так, А. А. Нечипорович рекомендует производить испытания образцов грунта на компрессию после их набухания при закрытом аретирном ходе компрессионного прибора. Горизонтальный отрезок компрессионной кривой покажет величину напряжений, при которой сжатия грунта не происходит.

Расчет конечных осадок фундаментов глубокого заложения в фазе сдвигов (с учетом нелинейности). При возведении сооружений с фундаментами глубокого заложения опасность выпора грунта уменьшается, и создается возможность значительно повысить передаваемые на грунт давления. Здесь расчет осадок нужно вести уже с учетом нарушения линейной зависимости, так как в противном случае возможно значительное занижение реальных величин конечных осадок (по данным В. Г. Березанцева до 70%).

Поскольку точные решения задачи теории нелинейно деформируемой среды еще не получены, для расчета используются приближенные приемы, основанные: а) на замене криволинейной части графика осадки ломаной линией и б) на приближенном учете влияния областей предельного напряженного состояния на величину осадки. Первый прием удобно использовать при расчете песчаных оснований. В этом случае кривая $s = f\sigma$ на участке $\sigma_{кр1}—\sigma_{кр2}$ спрямляется,

и применяется формула (41) с разными E_{o_i} и μ_{o_i} для двух участков полученной ломаной линии:

$$S=\frac{\omega\left(\sigma_{кр_1}-\gamma h\right)\sqrt{F\left(1-\mu_{o_1}^2\right)}}{E_{o_1}}+\frac{\omega\left(\sigma-\sigma_{кр_1}\right)\sqrt{F\left(1-\mu_{o_2}^2\right)}}{E_{o_2}}, \qquad (41)$$

где E_{o1}, E_{o2}, μ_{o1} и μ_{o2} — модули общей деформации и коэффициента Пуассона для фазы уплотнения и для фазы сдвигов, получаемые испытаниями на стабилометрах.

Применение расчета по второму предельному состоянию к свайным фундаментам. Осадка свайного фундамента определяется в основном сжимаемостью грунтов, залегающих ниже концов свай. Следовательно, этот расчет может иметь практическое значение только для фундаментов из висячих свай. При расчете на осадку свайный фундамент рассматривается условно как массивный фундамент с подошвой, расположенной на уровне концов свай, и боковыми гранями, приведенными под углом $\varphi_{ср}/4$ к вертикали (рис. 34). При многослойном строении основания $\varphi_{ср}$ вычисляется как средняя величина, взвешенная по мощности слоев:

$$\varphi_{ср}=\frac{\varphi_1 h_1+\varphi_2 h_2+\ldots+\varphi_n h_n}{h_1+h_2+\ldots+h_n}. \qquad (42)$$

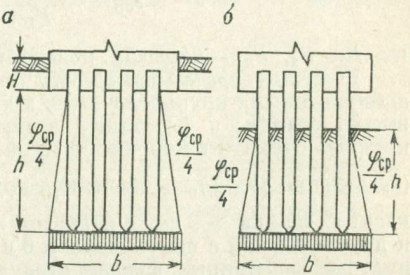


Рис. 34. Расчетные схемы свайного фундамента при определении величины конечной осадки

Полное напряжение под подошвой такого фиктивного фундамента при низком ростверке вычисляется по формуле

$$P=\frac{P^H+G_{св}}{F_y}-\gamma^H H, \qquad (43)$$

где P^H — нормативная нагрузка на уровне подошвы ростверка;
$G_{св}$ — масса свай;
H — глубина заложения ростверка;
F_y — условная площадь подошвы фундамента, равная $l_y \cdot b_y$, где l_y и b_y — условные длина и ширина фундамента.

Для высокого ростверка второй член в формуле (44) будет равен нулю. Дальнейшая последовательность расчета свайного фундамента такая же, как и обычного фундамента. Можно, в частности, использовать рекомендуемый СНиПом метод послойного суммирования, рассмотренный нами ранее. В этом случае над центром подошвы свайного основания (ниже острия свай) строятся эпюры дополнительных и природных напряжений, определяется граница активной зоны и используется формула (38).

При необходимости повысить точность расчета следует учитывать образование под концом свай уплотненной зоны, мощность которой обычно принимают равной утроенному диаметру свай. В этом случае можно использовать формулу Бартоломея:

$$s=\frac{\beta\left(\sigma_o+\sigma_1\right)}{E_y+E_o}h_y+(1+K)\sum_{i=1}^{n}\frac{\beta}{E_i}\sigma_i h_i, \qquad (45)$$

где E_y — модуль общей деформации для уплотненной зоны;
E_o — то же на границе уплотненной зоны;

h_y — ее мощность;

σ_0 и σ_1 — дополнительные напряжения на кровле и подошве уплотненной зоны;

K — коэффициент, учитывающий влияние соседних свай и изменяющийся от 0 (при $r \geqslant 14\ d_{св}$) до 3,5—3,8 (при $r = 2\ d_{св}$), остальные обозначения прежние.

Предельные величины деформации естественных оснований. Конечные осадки не должны превышать установленных предельных величин. Если основание состоит из горизонтально залегающих слоев, а их сжимаемость с глубиной не увеличивается, то ограничиваются определением *средней осадки фундаментов* проектируемых зданий и сооружений по формуле

$$s_{ср} = \frac{s_1F_1 + s_2F_2 + \ldots + s_nF_n}{F_1 + F_2 + \ldots + F_n}, \tag{46}$$

где F_1, F_2, F_n — площади подошвы фундаментов.

Величину *предельной средней осадки* принимают равной: для зданий с неармированными крупноблочными и кирпичными стенами при $h/l > 2{,}5$ (где h — высота здания, а l — длина стены) 8 см, при $h/l < 2{,}5$ — 10 см; для крупноблочных и кирпичных зданий, армированных железобетонными поясами (независимо от $\frac{h}{l}$), — 15 см; для крупнопанельных и крупноблочных бескаркасных зданий — 8 см, с каркасом — 10 см; для одноэтажных промышленных и других зданий с шагом колонн 6 и 12 м соответственно 8 и 12 см; для сплошных железобетонных фундаментов доменных печей, дымовых труб и других сооружений — 30 см.

При сложном строении основания учитываются также предельные разности осадок фундаментов, значения которых приведены в табл. 10 СНиП II-Б. 1-62.

Следует учитывать, что разность осадок определяется без учета жесткости фундаментов, которая приводит к некоторому выравниванию неравномерностей осадок. Этот резерв идет в запас прочности.

Развитие осадок во времени носит название консолидации грунта. Консолидация связана с отжимом воды из пор грунта (фильтрационная консолидация) и явлениями ползучести скелета (компрессионная консолидация).

В настоящее время удовлетворительно разработана теория фильтрационной консолидации, основанная на ряде допущений (минеральные частицы и поровая жидкость несжимаемы и не взаимодействуют между собой, связи между частицами отсутствуют, грунт уплотняется по мере отжатия поровой воды . Дифференциальное уравнение теории фильтрационной консолидации Терцаги-Герсеванова для одномерного сжатия имеет вид

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial z^2}, \tag{47}$$

где

$$C_v = \frac{K_ф (1 + \varepsilon_{ср})}{a_{ср} \cdot \gamma_в} = \frac{K_ф}{a_{0ср} \cdot \gamma_в},\ см^2/год \tag{48}$$

и носит название коэффициента консолидации.

Для плоской задачи уравнение принимает вид

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial t} = \frac{1}{2\gamma_в} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} + C_v' \cdot \nabla^2 \cdot \sigma_z, \tag{49}$$

где

$$C_v' = \frac{K_ф (1 + \xi_0)}{2\gamma_в a_{0ср}}\ см^2/год, \tag{50}$$

и для пространственной

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial t} = \frac{1}{3\gamma_в} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} + C_v'' \nabla^2 \sigma_z, \tag{51}$$

где $C_v'' = \dfrac{K_ф (1+2\xi_0)}{3\gamma_в a_{0_{ср}}}$, (52)

$\xi_0 = \dfrac{\mu_0}{1-\mu_0}$ — коэффициент бокового давления,

θ — сумма главных напряжений в рассматриваемой точке от действия внешней нагрузки,

$\nabla^2 \sigma_z = \dfrac{\partial^2 \sigma_z}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 \sigma_z}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 \sigma_z}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа.

На основании приведенных формул и установления граничных условий можно получить уравнение для определения осадки за время t для различных случаев распределения напряжений. Так, для случая равномерного распределения напряжений в слое грунта мощностью h с водопроницаемой кровлей и подошвой уравнение имеет вид

$$s_t = h a_{0_{ср}} P \left[1 - \frac{8}{\pi^2}\left(e^{-N} + \frac{1}{9} e^{-9N} + \frac{1}{25} e^{-25N} \ldots\right)\right]. \tag{53}$$

Множитель перед прямой скобкой представляет собой выражение для определения конечной осадки при одномерном сжатии (32), а функция в скобках играет роль фактора времени, зависящего от N, которое равно:

$$N = \frac{\pi^2 \cdot C_v \cdot t}{h^2}. \tag{54}$$

Обозначив функцию в скобках через U, получим:

$$s_t = sU. \tag{55}$$

Значения U можно найти из табл. 47, где они даны для случая возрастания уплотняющего давления с глубиной.

Таблица 47

Значения U и коэффициента N

U	N	U	N
0,1	0,02	0,6	0,71
0,2	0,08	0,7	1,00
0,3	0,17	0,8	1,40
0,4	0,31	0,9	2,09
0,5	0,49	1,0	∞

Расчет развития осадки во времени выполняют в следующей последовательности: а) определяют величину конечной осадки s; б) вычисляют безразмерное число N для разных t по значениям приведенного коэффициента уплотнения (a_0) и коэффициента фильтрации ($K_ф$), установленным лабораторным путем для заданного интервала нагрузок; в) находят величину U по табл. 47 для разных значений N и по формуле (55) вычисляют s_t; г) строят график зависимости $s_t = f(t)$.

В дальнейшем с этого графика можно снять значение s_t для любого t_i.

Формулу (54) можно использовать также для установления времени, необходимого для уплотнения слоя глины до заданной степени плотности под заданной нагрузкой:

$$t = \frac{h^2}{\pi^2 C_v} N. \tag{56}$$

Из выражения (56) следует, что время уплотнения двух слоев глин с одинаковыми свойствами обратно пропорционально квадрату их мощностей:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{h_2^2}{h_1^2}. \tag{57}$$

Этим объясняется то, что толщи глин, переслаивающиеся с песками, уплотняются много быстрее, чем толщи однородных глин.

Выведенные формулы применимы для расчета осадки фундаментов по методу эквивалентного слоя при условии замены фактической эпюры сжимающих напряжений эквивалентной треугольной эпюрой с высотой $H = 2\,h_s$. При этом в формулах (53) и (54) h следует заменить на h_s.

Результаты вычислений по формулам фильтрационной консолидации дают хорошую сходимость с натурными наблюдениями при исследовании оснований, сложенных связными грунтами пластичной консистенции, с большим содержанием свободной воды.

Для связных грунтов, тугопластичных и в особенности твердой консистенции, содержащих только связанную воду, теория фильтрационной консолидации неприменима. Здесь основную роль играет *ползучесть скелета грунта*. Осадка, связанная с ползучестью, может в таких грунтах значительно превышать величину осадок, связанных с отжатием поровой воды.

Для описания ползучести могут использоваться модели с упругими и вязкими элементами, о которых упоминалось выше. Дифференциальную зависимость деформаций от напряжений, получаемую из рассмотрения различных упруго-вязких моделей, можно выразить в следующей общей интегральной форме:

$$s(t) = \frac{1}{E_0}\left[\sigma(t) + \int_{-\infty}^{t} \sigma(\tau)\,\overline{K}(t-\tau)\,\partial\tau\right], \tag{58}$$

где τ — время;

а $\overline{K}(t-\tau)$ — так называемое ядро затухающей ползучести, которое хорошо описывается выражением

$$\overline{K}(t-\tau) = \delta e^{-\delta_1 (t-t_0)}, \tag{59}$$

где δ и δ_1 — параметры, определяемые на основании длительных лабораторных испытаний.

Для расчета компрессионной консолидации используются также различные эмпирические формулы, выведенные на основании обобщения результатов наблюдений за поведением однотипных грунтов под нагрузкой.

V. УСЛОВИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ И НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ГРУНТОВ

Устойчивостью в механике грунтов называют состояние устойчивого равновесия грунтовых масс при воздействии внешних нагрузок. Теория предельного равновесия рассматривает следующие практические задачи механики грунтов: определение несущей способности естественных оснований, расчет давления грунтовых масс на ограждающие конструкции, расчет устойчивости откосов и оползневых склонов.

Понятие о фазах напряженного состояния грунта. Рассмотрим диаграмму зависимости деформаций грунтового основания от напряжений при действии местной нагрузки, передаваемой на грунт посредством жесткого штампа. При изменении напряжения от нуля до некоторого значения $\sigma_{пр}$ мы наблюдаем пропорциональное практически линейное приращение деформаций S.

В пределах нагрузок, вызывающих пропорциональное изменение деформаций от соответствующих напряжений, отмечается фаза уплотнения грунтов. В этой фазе напряженного состояния грунта соотношения между деформациями и напряжениями подчиняются закономерностям теории линейно деформируемых сред. Процесс деформаций грунта в первой фазе напряженного состояния происходит в основном за счет изменения пористости. При этом, как показали исследования М. И. Горбунова-Посадова и В. Г. Березанцева, в фазе уплотнения под штампом образуется уплотненное ядро.

Вторая фаза напряженного состояния характеризуется криволинейным характером изменения деформаций при увеличении напряжений. Вторая фаза напряженного состояния — это фаза потери устойчивости основания и разрушения грунта.

Форма и направление поверхностей скольжения частиц грунта при его разрушении, которое проявляется в виде выпирания грунта на поверхность или его выдавливании в стороны, зависит от физико-механических свойств грунтов, а также от боковой пригрузки и глубины заложения штампа-фундамента.

Промежуточной фазой напряженного состояния является переход от фазы уплотнения грунта под действием напряжений к его разрушению. В промежуточной фазе заканчиваются деформации уплотнения, завершается процесс формирования уплотненного ядра под штампом и начинают преобладать деформации сдвига частиц под действием бокового отжатия грунта уплотненным ядром.

Промежуточная фаза характеризует предел несущей способности грунта, т. е. границу, после которой при увеличении напряжений начинается процесс его разрушения.

Участок кривой напряжения — деформации ab может иметь различную кривизну и протяженность в проекциях к координатным осям в зависимости от типа и состояния грунта, а также условий и скорости загружения штампа.

Круг предельных напряжений Мора. Из характера фаз напряженного состояния грунта при действии на него нагрузки, а также из характера деформаций, соответствующих данному напряженному состоянию, видно, что деформации сдвига начинаются при определенных соотношениях составляющих напряжений в рассматриваемой точке грунтового массива.

Главными напряжениями называются наибольшие и наименьшие нормальные напряжения по плоскостям, где касательные напряжения равны нулю. Плоскости, в которых действуют главные напряжения, называются плоскостями главных напряжений. В общем случае через любую точку грунтового массива, находящегося в напряженном состоянии, можно провести три взаимно перпендикулярных плоскости, в которых действуют главные напряжения.

В условиях плоской деформации грунтового массива, т. е. в тех случаях, когда в сечениях, перпендикулярных одной из плоскостей главных направлений, действуют одинаковые напряжения, для выражения напряженного состояния в любой точке массива удобно пользоваться кругом напряжений Мора, предложенным им в 1871 г.

Круг Мора — это графический способ изображения напряженного состояния грунтового массива в данной точке. Для построения круга предельных напряжений Мора воспользуемся результатами испытания образцов грунта в приборе трехосного сжатия. В случае, когда $c = 0$ (сыпучий грунт), на оси ординат графика $\tau = f(\sigma)$ (рис. 35) откладываем величины главных напряжений; σ_1; σ_3 — наибольшее и наименьшее главные напряжения, которые соответствуют срезу или разрушению образца.

Радиусом, равным $R = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, проводим окружность из центра A, находящегося на расстоянии $OA = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ от начала координат. Далее из начала

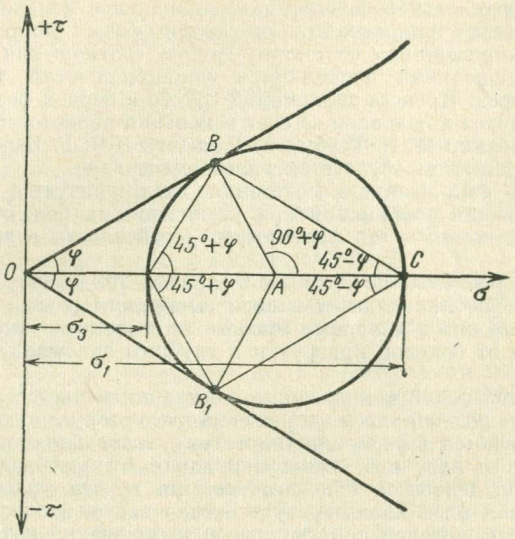


Рис. 35. Круг напряжений Мора для сыпучих грунтов

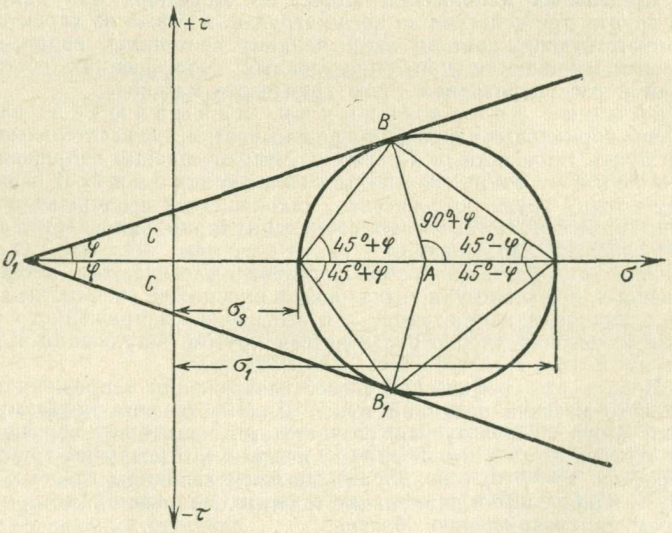


Рис. 36. Круг напряжений Мора для связных грунтов

координат проводим касательные к окружности в точках B и B_1. Касательные OB и OB_1 называются линиями разрушения. Они выражают предельное сопротивление грунта сдвигу, описываемое уравнением Кулона. Угол наклона касательной к оси абсцисс будет равен углу внутреннего трения φ.

Для связных грунтов, у которых $c \neq 0$, можно построить круг предельных напряжений Мора, если известны величины главных напряжений σ_1 и σ_3, а также величина удельной силы сцепления c. Последнюю находят по данным испытаний на срез или на разрушение не менее чем двух образцов. Такое построение показано на рис. 36.

Линии разрушения O_1B и O_1B_1 пересекают ось ординат в точках, соответствующих значению удельной силы сцепления, и касаются круга предельных напряжений в точках B и B_1. Угол наклона линий разрушения к оси абсцисс будет равен углу внутреннего трения связного грунта.

Координаты любой точки окружности круга Мора определяют величины нормальных и касательных напряжений в плоскостях, образующих с направлением главного напряжения угол $\alpha < 90°$ — для верхней полуокружности и угол $\alpha > 90°$ — для нижней полуокружности.

Разрушение грунта происходит одновременно по двум плоскостям, которые пересекают плоскость главного напряжения под углом $\alpha = 45 + \frac{\varphi}{2}$. При этом направление плоскости скольжения не зависит от удельной силы сцепления.

Круг напряжений Мора кроме оценки напряженного состояния в заданной точке грунтового массива позволяет оценить значение одного из главных напряжений, когда направление и величина другого напряжения известны.

Из геометрических построений находим условия предельного равновесия или начало разрушения для сыпучих грунтов, выраженные через главные напряжения:

$$\sin\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}.$$

Для связных грунтов аналогично получаем:

$$\sin\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} - \frac{2c\cos\varphi}{\sigma_1 + \sigma_3}.$$

Условия предельного равновесия или начало разрушения сыпучих грунтов для двух любых произвольных взаимно перпендикулярных пересекающихся в данной точке плоскостей, выраженное через составляющие напряжения σ_x, σ_z и τ_{xz} в координатных осях x, z, будут равны:

$$\sin^2\varphi = \frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2}{(\sigma_x + \sigma_z)^2}. \qquad (60)$$

Из рис. 36 для связных грунтов имеем:

$$\sin^2\varphi = \frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2}{(\sigma_x + \sigma_z + 2c\operatorname{ctg}\varphi)^2}. \qquad (61)$$

Необходимо отметить, что построение кругов предельных напряжений Мора справедливо при следующих допущениях: а) значения параметров c и φ одинаковы и постоянны для любого сечения, проходящего через заданную точку; б) деформации уплотнения и сдвигов не влияют на значения параметров c и φ во всех фазах напряженного состояния грунтового массива.

Угол наибольшего отклонения. Через заданную точку грунтового массива, находящегося в напряженном состоянии, проведем площадку $I—I$ (рис. 37) под некоторым углом α к горизонтальной плоскости, на которую действуют нормальное σ_α и касательное τ_α напряжения. Угол θ, составленный суммарным напряжением σ и нормалью к рассматриваемой площадке $I—I$, называется углом отклонения полного напряжения.

В зависимости от соотношения главных напряжений σ_1 и σ_3 угол отклонения θ может приобретать различные максимальные значения при изменении угла наклона α рассматриваемой площадки $I—I$ к горизонтальной плоскости. Чем больше возможный максимальный угол отклонения, тем меньше будет сопротивление грунта сдвигу в рассматриваемой точке.

Максимальный угол отклонения имеет предельное значение в том случае, когда грунтовый массив находится в условиях предельного равновесия:

$$\operatorname{tg}\theta_{max}=\left|\frac{\tau_\alpha}{\sigma_\alpha}\right|_{max}.$$

Если отношение $\left|\frac{\tau_\alpha}{\sigma_\alpha}\right|$ выражает прямолинейную функцию напряженного состояния, то

$$\operatorname{tg}\theta_{max}=\operatorname{tg}\varphi, \tag{62}$$

где φ — угол внутреннего трения грунта.

Практическая оценка устойчивости естественных оснований при решении различных инженерных задач на основе теории предельного равновесия производится по двум критериям начальной критической и предельной критической нагрузок.

Начальная критическая нагрузка, или краевое критическое давление, — это нагрузка такой интенсивности, при которой заканчивается процесс уплотнения грунта, начинается формирование упругого ядра и появляются площадки сдвига в зоне, смежной с упругим ядром. При начальной критической нагрузке касательные и нормальные напряжения для появляющихся площадок сдвига связаны условием предельного равновесия.

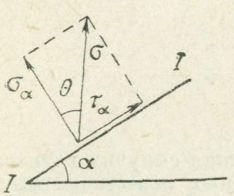


Рис. 37. Угол наибольшего отклонения полного напряжения

Формулу для определения начальной критической нагрузки, выведенную из условия полного отсутствия зон предельного равновесия, впервые получил Н. П. Пузыревский в 1923 г.

$$P_{н.к.}=\frac{\pi\left(\gamma_0 h+\dfrac{c}{\operatorname{tg}\varphi}\right)}{\operatorname{ctg}\varphi+\varphi+\dfrac{\pi}{2}}+\gamma_0 h, \tag{63}$$

где $\gamma_0 h$ — пригрузка от слоя грунта с объемным весом и высотой h, расположенного выше плоскости приложения нагрузки.

При таком состоянии грунт еще имеет некоторый потенциальный запас несущей способности.

В существующих нормативных документах (например, СНиП II-Б. 1-62) при расчете несущей способности естественных оснований допускается развитие зон пластических деформаций на некоторую безопасную глубину z. Для определения начальной критической нагрузки используется формула Пузыревского

$$P_{н.к.}=\frac{\pi\left(\gamma_0 h+\gamma_0 z+\dfrac{c}{\operatorname{tg}\varphi}\right)}{\operatorname{ctg}\varphi+\varphi-\dfrac{\pi}{2}}+\gamma_0 h, \tag{64}$$

где z — допускаемая глубина развития зон пластических деформаций.

Для полосообразной нагрузки, приложенной без эксцентриситета, допускается развитие зон пластических деформаций на глубину, равную четверти

ширины полосы нагрузки b. В этом случае формула Пузыревского принимает вид

$$P_{1/4}=\frac{\pi\left(0{,}25b\gamma_0+\gamma_0 h+\frac{c}{\operatorname{tg}\varphi}\right)}{\operatorname{ctg}\varphi+\varphi-\frac{\pi}{2}}+\gamma_0 h=(Ab+Bh)\,\gamma_0+Dc, \qquad (65)$$

где A, A_1, B и D — коэффициенты, значения которых приведены в табл. 48.

Таблица 48

Значения коэффициентов A, A_1; B и D

φ	A	A_1	B	D	φ	A	A_1	B	D	φ	A	A_1	B	D
0	0	0	1	3	16	0,4	0,5	2,4	5,0	32	1,4	1,8	6,3	8,5
2	0	0	1,1	3,3	18	0,4	0,6	2,7	5,3	34	1,6	2,1	7,2	9,2
4	0	0,1	1,2	3,5	20	0,5	0,7	3,1	5,6	36	1,8	2,4	8,2	10,0
5	0,1	0,1	1,4	3,7	22	0,6	0,8	3,4	6,0	38	2,1	2,8	9,4	10,8
8	0,1	0,2	1,6	3,9	24	0,7	1,0	3,9	6,5	40	2,5	3,3	10,8	11,8
10	0,2	0,2	1,7	4,2	26	0,8	1,1	4,4	6,9	42	2,9	3,8	12,7	12,8
12	0,2	0,3	1,9	4,4	28	1,0	1,3	4,9	7,4	44	3,4	4,5	14,5	14,0
14	0,3	0,4	2,2	4,7	30	1,2	1,5	5,6	8,0	45	3,7	4,9	15,6	14,6

Для внецентренной нагрузки допускается развитие зон пластических деформаций на безопасную глубину z, равную $^1/_3 b$; при этом формула имеет вид:

$$P_{1/3}=\frac{\pi\left(0{,}33b\gamma_0+\gamma_0 h+\frac{c}{\operatorname{tg}\varphi}\right)}{\operatorname{ctg}\varphi+\varphi-\frac{\pi}{2}}+\gamma_0 h=(Ab+Bh)\,\gamma_0+Dc. \qquad (66)$$

Для идеальных связных грунтов (практически при $\varphi\leqslant 5°$) начальная критическая нагрузка при недопущении развития зон пластических деформаций ($z=0$) будет равна:

$$P_{\text{н.к.}}=\pi c+\gamma_0 h. \qquad (67)$$

Предельная критическая нагрузка характеризуется таким состоянием грунтов основания, при котором полностью заканчивается развитие областей предельного равновесия, сопровождающееся сдвигами в этих зонах. Сопротивление сдвигу и несущая способность грунта в зонах предельного равновесия достигают при этом предельного значения.

При предельной критической нагрузке в массиве можно выделить следующие три области предельного напряженного состояния.

Область I, расположенная непосредственно под площадью загружения грунтового массива, представляет собой упругий клин, который образуется в фазе уплотнения грунта под нагрузкой.

По данным К. Терцаги, отрезки *acubc*, образующие упругий клин, наклонены к горизонтальной плоскости под углом $\psi=45°+\varphi/2$, если в плоскости *ab* между грузовой площадкой и грунтом отсутствуют трение и сцепление. Если трение и сцепление в сечении *ab* не равны нулю, то угол ψ равен углу внутреннего трения φ. По исследованиям М. И. Горбунова-Посадова, упругое ядро имеет копьевидно-треугольную форму с несколько вогнутыми гранями.

Области II лежат между образующими упругого клина *ac* и *bc* и лучами *ad* и *bd*, выходящими из точек *a* и *b* под углом 45°—φ/2 к горизонтальной плоскости. Криволинейные участки *cd* и *cd'* могут быть приняты по дуге логарифмической спирали вида

$$r = r_a e^{\beta \operatorname{tg} \varphi}, \tag{68}$$

где r — текущий радиус спирали;

r_a — начальный радиус, равный образующей *bc* или *ac*;

β — центральный угол между радиусами r и r_a, выраженный в радианах.

Области II являются областями сдвигов, развивающихся по радиальным поверхностям скольжения, распространяющимся от краев нагруженной площадки (рис. 38).

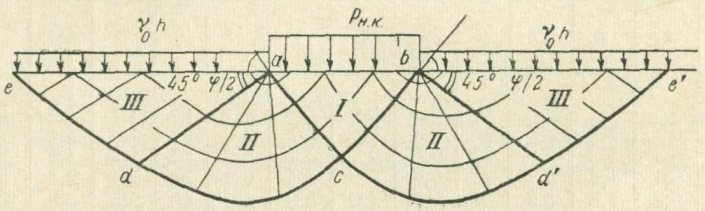


Рис. 38. Развитие областей предельного напряженного состояния при действии предельной критической нагрузки

Области III ограничены образующими *ad*, *bd'* и прямолинейными отрезками $ed_1e'd'$, пересекающими горизонтальную плоскость в точках e_1e' под углом 45° — φ/2.

Эти области пассивного отпора относятся к той части грунта, которая при превышении предельной критической нагрузки выпирается на поверхность грунтового массива. В ряде случаев, когда пригрузка $\gamma_0 h$ достаточно велика, а плотность сложения грунта мала, выпирания грунта может не произойти.

При этом массив грунта может потерять устойчивость за счет так называемых местных сдвигов в областях II, деформация которых вызывает деформации уплотнения грунта в областях III.

На основе решений плоской задачи теории предельного равновесия В. В. Соколовский получил следующие выражения для предельной критической нагрузки.

1. Для полосообразной нагрузки при связном грунте основания и при отсутствии пригрузки:

$$P_{п.к} = \bar{\sigma}_z \cdot c \text{ при } x = \bar{x} \frac{c}{\gamma_0}. \tag{69}$$

2. Для полосообразной нагрузки при связном грунте основания и небольшой пригрузке ($h/b \leqslant 0{,}5$):

$$P_{п.к} = \bar{\sigma}_z (c + q \operatorname{tg} \varphi) + q \text{ при } x = \bar{x} \frac{q \operatorname{tg} \varphi + c}{\gamma_0}. \tag{70}$$

3. Для полосообразной нагрузки при сыпучем грунте основания и небольшой пригрузке ($h/b \leqslant 0{,}5$):

$$P_{п.к} = q (\bar{\sigma} \operatorname{tg} \varphi + 1) \text{ при } x = \bar{x} \frac{q \operatorname{tg} \varphi}{\gamma_0}. \tag{71}$$

Значения безразмерных величин $\bar{\sigma}_z$ и x приведены в табл. 49.

Таблица 49

Безразмерные величины σ_z для определения предельной критической нагрузки по формулам (69)—(71)

$\bar{x}$	При значениях φ							
	5	10	15	20	25	30	35	40
0	6,49	8,34	11,0	14,8	20,7	30,1	46,1	75,3
0,5	6,73	9,02	12,0	17,0	27,0	43,0	73,8	139
1,0	6,95	9,64	13,8	20,6	32,3	53,9	97,1	193
1,5	7,17	10,2	15,1	23,1	37,3	64,0	119	243
2,0	7,38	10,8	16,2	25,4	41,9	73	140	292
2,5	7,56	11,3	17,3	27,7	46,4	82	160	339
3,0	7,77	11,8	18,4	29,8	50,8	91	179	386
3,5	7,96	12,3	19,4	31,9	55,0	101	199	432
4,0	8,15	12,8	20,5	34,0	59,2	109	218	478
4,5	8,33	13,2	21,4	36,0	63,8	118	237	523
5,0	8,50	13,7	22,4	38,0	67,3	127	256	568
5,5	8,67	14,1	23,3	39,9	71,3	135	275	613
6,0	8,84	14,5	24,3	41,8	75,3	143	293	658

4. При действии нагрузки, направленной под некоторым углом δ к вертикали, В. В. Соколовский на основе теоретического решения получил следующее выражение для ее предельного значения:

$$P_{\text{п. к}} = N_\gamma \gamma_0 x + N_q q + N_c c,$$

где N_γ; N_q; N_c — безразмерные величины;
x — текущая координата для нагрузки по оси абсцисс (рис. 39).

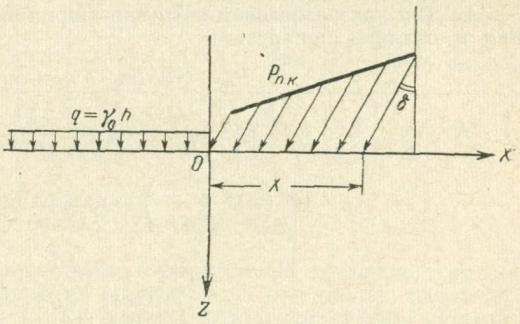


Рис. 39. Схема наклонной полосообразной нагрузки

5. Для пространственной осесимметричной задачи при незначительной пригрузке ($h/b < 0{,}5$) имеем следующее выражение для предельной критической нагрузки, полученное В. Г. Березанцевым:

$$P_{\text{п. к}} = N_\gamma \frac{\gamma b}{2} + N_q q + N_c c. \qquad (72)$$

Значения безразмерных величин N_γ, N_q, N_c приведены в табл. 50, величина b соответствует диаметру симметричной нагрузки.

В табл. 50 отношение L/b — относительная длина призмы выпирания, зависящая от угла внутреннего трения φ.

К. Терцаги на основе теоретических решений плоской задачи теории предельного равновесия Прандтля и Рейснера дает ряд приближенных выражений для определения предельной критической нагрузки. Уравнения выведены в предположении, что разрушение грунта происходит вследствие полного сдвига при

Таблица 50

Значение безразмерных величин N_γ; N_q; N_c для случая осесимметричной нагрузки
(квадратного или круглого очертания)

Коэффициенты	При значениях						
	16	18	20	22	24	26	28
N_γ	4,1	5,7	7,3	9,9	14,0	18,9	25,3
N_q	4,5	6,5	8,5	10,8	14,1	18,6	24,8
N_c	12,8	16,8	20,9	24,6	29,9	36,4	45,0
L/b	1,44	1,50	1,58	1,65	1,73	1,82	1,91

Коэффициенты	При значениях						
	30	32	34	36	38	40	42
N_γ	34,6	48,8	69,2	97,2	145,8	216	317
N_q	32,8	45,5	64,0	87,6	127,0	185	270
N_c	55,4	71,5	93,6	120	161,0	219	300
L/b	1,99	2,11	2,22	2,34	2,45	261	270

допущении, что объемный вес грунта $\gamma = 0$, а поверхности скольжения описываются уравнением логарифмической спирали.

1. Для полосообразной нагрузки шириной $2b$ при связном грунте основания и наличии пригрузки:

$$P_{\text{п. к}} = 2b\,(x_\gamma \cdot b \cdot \gamma + x_q \cdot q + x_c c), \tag{73}$$

где $x_\gamma = \frac{1}{2}\operatorname{tg}\varphi\left(\frac{\lambda_p}{\cos^2\varphi} - 1\right)$;

$\lambda_p = \operatorname{tg}^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)$ — коэффициент отпора грунта;

$$x_q = \frac{\alpha_1^2}{2\cos^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)};$$

$$x_c = \operatorname{ctg}\varphi\left[\frac{\alpha_1^2}{2\cos^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)} - 1\right];$$

$$\alpha_1 = e^{(3/4\pi - \varphi/2)\operatorname{tg}\varphi}.$$

2. Если основанием является связной грунт, для которого $\varphi = 0$, то значения безразмерных коэффициентов в формуле (73) соответственно будут равны: $x_\gamma = 0$; $x_q = 1$; $x_c = 5{,}7$. Тогда предельная критическая нагрузка на единицу длины полосообразной нагрузки будет равна:

при отсутствии пригрузки

$$P_{\text{п. к}} = 2b \cdot 5{,}7c, \tag{74}$$

при наличии пригрузки

$$P_{\text{п. к}} = 2b \cdot 5{,}7c + q. \tag{75}$$

3. Если в плоскости приложения нагрузки отсутствуют трение и сцепление, то для связного грунта при $\varphi = 0$ имеем:

$$x_\gamma = 0; \quad x_q = 1; \quad x_c = 5{,}14.$$

Предельная критическая нагрузка при этом будет равна:
при отсутствии пригрузки

$$P_{\text{п. к}} = 2b \cdot 5{,}14c, \tag{76}$$

при наличии пригрузки

$$P_{\text{п. к}} = 2b \cdot 5{,}14c + q. \tag{77}$$

Предельную критическую нагрузку для фундаментов прямоугольной формы (в плане) при связных грунтах основания можно определить по приближенной формуле А. Скемптона:

$$P_{\text{п. к}} = (0{,}84 - 0{,}16b/L)\, N_c c + q, \tag{78}$$

где b/L — отношение ширины фундамента к его длине;
N_c — полуэмпирический коэффициент, значения которого приведены в табл. 51.

Таблица 51

Значения безразмерного коэффициента N_c

Формы подошвы	При относительной глубине заложения фундамента h/b									
	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4 и более
Круглая и квадратная . .	6,2	6,7	7,1	7,4	7,7	8,1	8,4	8,6	8,8	9,0
Полосообразная	5,14	5,6	5,9	6,2	6,4	6,6	7,0	7,2	7,4	7,5

VI. ДАВЛЕНИЕ ГРУНТОВ НА ОГРАЖДЕНИЯ

Давление грунтов на подпорную стенку. Определение давления грунтов на подпорную стенку является одной из важных задач при расчете давления грунтов на ограждения. На рис. 40 изображена подпорная стенка, которая воспринимает боковое давление грунта, обозначенное равнодействующей силой E_a. Под действием этой силы стенка стремится сместиться в сторону. Равновесие стенки обеспечивается ее собственным весом Q и противодавлением грунта $E_\text{п}$ на другую сторону стенки.

Давление грунта, обозначенное равнодействующей E_a, которое передается со стороны грунтового массива и воспринимается ограждением, называется *активным давлением*.

Противодавление грунта, обозначенное равнодействующей $E_\text{п}$, которое передается от ограждения и воспринимается грунтом, называется *пассивным давлением* или *отпором*.

Если подпорную стенку перемещать по направлению действия активного давления E_a, то в конечном итоге произойдет сползание части грунтового массива по кривой скольжения ab.

Часть грунтового массива, которая вызывает активное давление грунта на стенку и сползает при перемещении ограждения по линии его действия, называется *призмой обрушения*. Часть грунтового массива *b*, которая вызывает пассивное давление $E_п$ и выпирается при непрекращающемся перемещении стенки, называется призмой выпирания.

Приближенный метод Кулона для определения активного и пассивного давления грунтов на подпорные стенки. Точные решения задачи по определению давления грунтов на ограждения, а также результаты многочисленных экспериментальных исследований показывают, что поверхность скольжения призмы обрушения имеет криволинейное очертание. Решение задачи упрощается, если очертания поверхностей скольжения считать прямолинейными.

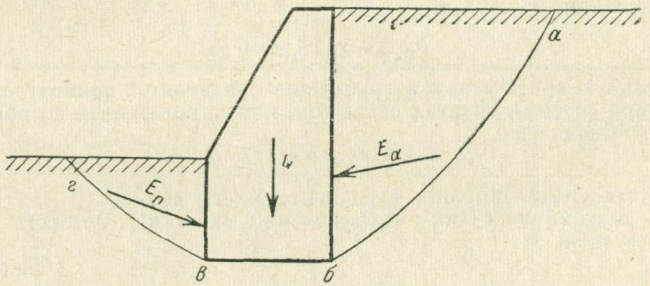


Рис. 40. Схема давлений грунта на подпорную стенку

Наиболее распространенные приближенные решения задачи по определению давления грунтов на ограждения, поверхности скольжения которых имеют прямолинейные очертания, основаны на теории давления сыпучих сред Кулона.

В основу решений Кулона положены следующие допущения: 1) криволинейные поверхности скольжения призм обрушения и выпирания заменяются прямолинейными; 2) максимальное давление грунта на подпорную стенку равно давлению грунта призмы обрушения или призмы выпирания; 3) грунт призмы обрушения или выпирания представляет собой изотропную однородную по свойствам среду, вертикальное давление которой изменяется с глубиной по закону прямой линии.

В дальнейшем решение Кулона для сыпучих сред было распространено и на связные грунты с учетом сил сцепления последних.

За основу решения задачи по определению давления грунтов на ограждения принята зависимость, связывающая между собой главные напряжения для состояния предельного равновесия грунта в засыпке за стенкой в условиях плоской задачи:

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2\left(45^\circ \pm \frac{\varphi}{2}\right). \qquad (86)$$

В рассматриваемой задаче главное напряжение σ_3 является активным или пассивным давлением грунта на рассматриваемой глубине *z*, а σ_2 — вертикальным давлением грунта от собственного веса, которое изменяется по линейному закону, т. е.

$$\sigma_1 = \gamma_z. \qquad (87)$$

Графический метод Кульмана определения давления грунтов на подпорную стенку. Метод Кульмана является приближенным методом определения давления грунта на подпорную стенку и исходит из предположения о наличии плоских

поверхностей скольжения грунта. Его рекомендуется использовать при сложных очертаниях засыпки и задней грани стенки, когда применение аналитических формул оказывается затруднительным. Метод дает близкие к истинным результаты при расчете активного давления грунта, а также при определении пассивного давления, когда трение грунта о стенку можно принять равным нулю.

Сущность метода Кульмана состоит в отыскании такой плоской поверхности скольжения, при которой давление призмы обрушения будет наибольшим.

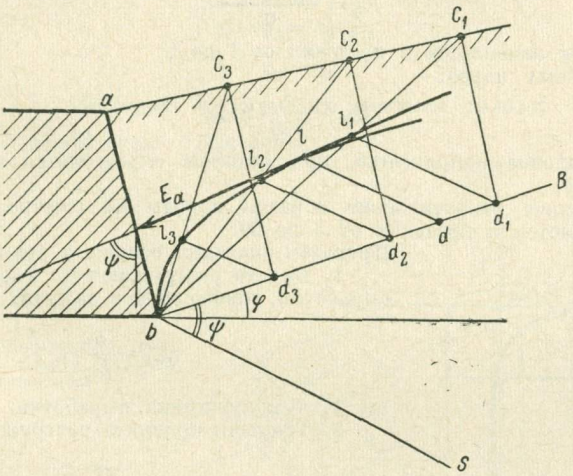


Рис. 41. Графический метод Кульмана для определения давления грунта на подпорную стенку

Через нижнюю точку задней грани стенки проведем произвольную плоскость скольжения bC_1, пересекающую поверхность засыпки в точке C_1. Далее через точку b проведем прямую bB под углом внутреннего трения φ к горизонту и ориентирующую линию bS под углом ψ к прямой bB, этот угол образован равнодействующей давления с вертикалью. Из точки C_1 проведем отрезок C_1d_1, параллельный ad, и отрезок d_1l_1, параллельный bS. Аналогично проводим другие произвольные плоскости скольжения bC_2, bC_3 и т. д.; найдем отрезки d_2l_2; d_3l_3 и т. д. Кривая $bl_3l_2l_1$ называется *линией давления грунта Кульмана.*

Максимальное активное давление грунта E_a пройдет по касательной к линии Кульмана в точке L, параллельной линии естественного откоса bB. Отрезок Ld, проведенный из точки касания L параллельно ориентирующей линии bS даст абсолютное значение равнодействующей активного давления E_a (рис. 41).

VII. ДАВЛЕНИЕ ПОРОД В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Давление пород, которое возникает в горных выработках, называется *горным давлением.*

Давление на кровлю выработки при ее расположении на глубине, превосходящей величину 5 полуширин сечения выработки, практически считается независящим от глубины расположения выработки вследствие появления разгружающего эффекта (свода), или так называемого *арочного эффекта.*

Характеристикой прочности пород при расчете горного давления, по М. М. Протодьяконову, является коэффициент крепости пород, который учитывает как трение, так и сцепление пород.

Коэффициент крепости пород $f_{кр}$ для различных пород имеет следующие значения:

для рыхлых пород:

$$f_{кр} = \operatorname{tg} \varphi, \tag{88}$$

практически он изменяется в пределах от 0,1 до 1;

для связных пород:

$$f_{кр} = \frac{\operatorname{tg} \varphi \sigma + c}{\sigma}, \tag{89}$$

практически он изменяется в пределах от 1 до 5;

для скальных пород:

$$f_{кр} = \frac{1}{100} R_{сж}, \tag{90}$$

где σ — нормальное напряжение, при котором определяется сопротивление сдвигу;

$R_{сж}$ — временное сопротивление образца породы на сжатие, практически изменяется в пределах от 5 до 20.

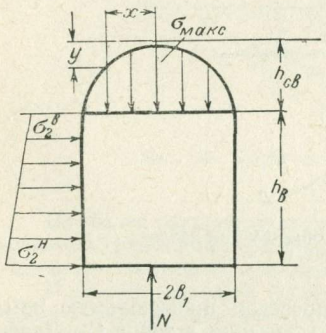


Рис. 42. Давление пород, действующее на горную выработку

Приведём значения основных величин (рис. 42).

1. Высота разгружающего свода для горной выработки, пройденной в сыпучих породах:

$$h_{св} = \frac{b_1}{f_{кр}}, \tag{91}$$

где b_1 — полуширина выработки.

2. Текущая ордината разгружающего свода

$$y = \frac{x^2}{b_1 f_{кр}}. \tag{92}$$

3. Максимальное давление породы на кровлю выработки по оси свода:

$$\sigma_{max} = \frac{\gamma_0 b_1}{f_{кр}}. \tag{93}$$

4. Давление породы в любой другой точке кровли:

$$\sigma = \frac{\gamma_0 b_1}{f_{кр}} - \frac{\gamma x^2}{b_1 f_{кр}}. \tag{94}$$

5. Горизонтальное давление в верхней точке боковой стенки выработки:

$$\sigma_г^в = \gamma_0 h_{св} \operatorname{tg}^2 \left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) - 2 \operatorname{ctg} \left(45° - \frac{\varphi}{2}\right). \tag{95}$$

6. Горизонтальное давление в нижней точке боковой стенки выработки:

$$\sigma_г^н = \gamma_0 (h_{св} + h_0) \operatorname{tg}^2 \left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) - 2 \operatorname{ctg} \left(45° - \frac{\varphi}{2}\right). \tag{96}$$

7. Давление на подошву выработки («дутье породы»):

$$N = (E_а - E_п) \operatorname{tg} \left(45° - \frac{\varphi}{2}\right), \tag{97}$$

где $E_а$ и $E_п$ — активное и пассивное давление породы.

При проходке буровых скважин возникает проблема крепления их стенок, поскольку под действием давлений, возникающих от собственного веса грунта, происходит потеря устойчивости стенок и начинаются пластические течения породы в горизонтальных плоскостях скважины. В элементарном объеме грунта, расположенном на глубине z на некотором расстоянии r от оси скважины, действуют следующие усилия (рис. 43).

1. До бурения скважины:

$$\sigma_z = \gamma_0 z;$$

$$\sigma_r = \sigma_z = \lambda_0 \gamma_0 z, \tag{98}$$

$$\tau_{rz} = 0,$$

где $\lambda = \dfrac{\mu}{1-\mu}$ — коэффициент статического давления грунта;

μ — коэффициент Пуассона.

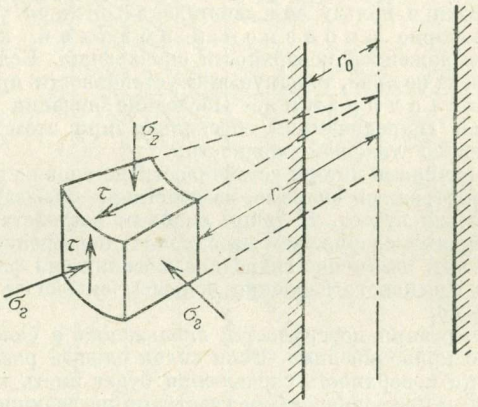


Рис. 43. Напряжения, возникающие вокруг буровой скважины

2. После проходки скважины в песчаных грунтах ($C = 0$):

$$\sigma_z = \gamma_0 z; \tag{99}$$

$$\sigma_r = \sigma_{r_0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\lambda_\varphi - 1};$$

$$\sigma_г = \lambda_\varphi \sigma_{r_0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\lambda_\varphi - 1};$$

$$r_п = r_0 \left[\frac{2\gamma < z}{\sigma_{r_0} (\lambda_\varphi + 1)} \right]^{\frac{1}{\lambda_\varphi - 1}},$$

где σ_{r_0} — нормальное напряжение по стенке буровой скважины;

$\lambda_\varphi = \operatorname{tg}^2 (45° + \dfrac{\varphi}{2})$ — предельное соотношение главных напряжений;

r_0 — радиус буровой скважины;

σ_r — горизонтальное радиальное напряжение;

$\sigma_г$ — горизонтальное главное напряжение (перпендикулярное радиусу);

$r_п$ — предельный радиус зоны пластических деформаций грунта за стенкой скважины.

3. После проходки скважины в глинистых грунтах ($\varphi = 0$)

$$\sigma_r = 2c\ln\left(\frac{r}{r_0}\right) + \sigma_{r0};$$

$$\sigma_p = 2c\left[\ln\left(\frac{r}{r_0}\right) + 1\right] + \sigma_{r_0};$$

$$r_п = r_0 e^{\frac{\gamma_0 z \cdot c - \sigma_{r_0}}{2c}}. \qquad (100)$$

VIII. УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ

Перемещение грунтовых масс на склонах в природных условиях является следствием нарушения равновесия сил, удерживающих грунты в статическом состоянии в пользу сил сдвигающих. Потеря устойчивости склонов проявляется в форме о п о л з н е й и о б в а л о в, когда часть склона сползает по явно выраженной поверхности скольжения. Если же поверхность скольжения выражена не явно, то нарушение устойчивости проявляется в виде с п л ы в о в и в ы д а в л и в а н и я. Последние явления наиболее точно подчиняются законам гидродинамики, поскольку при этом происходят течения, близкие к течению тяжелой жидкости.

Причинами потери устойчивости склонов во всех случаях являются внешние или внутренние силовые воздействия, вызывающие нарушение предельного равновесия откоса. К таким силовым воздействиям относятся: возведение искусственных сооружений на склонах, повышение или понижение уровня грунтовых вод, изменение гидродинамических сил фильтрационных потоков, уменьшение пассивного давления подошвы склона за счет подмыва или отрыва канав и др.

Очертания поверхностей скольжения в склонах, теряющих устойчивость, обычно криволинейные. Если склон сложен разнородными по свойствам грунтами, то поверхность скольжения будет иметь криволинейные очертания с изломами и прямолинейными участками на границах слоев.

В ряде случаев, когда несущая способность основания оказывается ниже прочности самого склона, может произойти р а з р у ш е н и е о с н о в а н и я с к л о н а.

Устойчивость откоса, сложенного сыпучими грунтами. Рассмотрим устойчивость откоса, сложенного грунтами, обладающими только трением ($c = 0$). Устойчивость откоса будет обеспечена в том случае, если каждая элементарная частица на поверхности откоса будет находиться в равновесии. При этом предельное равновесие выразится соотношением

$$\operatorname{tg}\alpha = f = \operatorname{tg}\varphi, \qquad (101)$$

или

$$\alpha = \varphi, \qquad (102)$$

т. е. для сыпучей среды устойчивость откоса обеспечивается в том случае, если угол естественного откоса α равен или меньше угла внутреннего трения среды φ.

Устойчивость откоса, сложенного связными грунтами. Если грунты, слагающие откос, обладают только сцеплением ($\varphi = 0$), то до некоторой глубины h откос может быть вертикальным, а ниже он должен иметь криволинейное очертание.

Предельная высота $h_{пр}$, до которой откос может удерживаться силами сцепления в вертикальном положении, равна:

$$h_{пр} = \frac{2c}{\gamma_0}. \qquad (103)$$

Текущие координаты откоса 00_1 ниже предельной высоты вертикальной части откоса, согласно решению В. В. Соколовского, связаны уравнением

$$y=\frac{2c}{\gamma_0}\left| n\frac{\cos\left(\frac{\gamma_0 h_{пр}}{2c}-1\right)}{\cos\left(\frac{\gamma_0 h_{пр}}{2c}-1-\frac{\gamma_0}{2c}\cdot z\right)}\right. . \qquad (104)$$

При практическом использовании уравнений (103) и (104) для определения устойчивой формы откосов необходимо вводить соответствующий коэффициент запаса, поскольку эти уравнения выражают предельное равновесие грунтов.

Устойчивость откоса, сложенного грунтами, обладающими трением и сцеплением. 1. Решение В. В. Соколовского. На основе решений плоской задачи предельного равновесия В. В. Соколовский получил решение для определения очертания равноустойчивого откоса, сложенного из грунтов, обладающих трением и сцеплением. На рис. 44 приведены графики этого решения, которые представляют собой безразмерные координаты равноустойчивых откосов для различных углов внутреннего трения φ. Истинные координаты откосов будут равны:

$$x=x'\frac{c}{\gamma_0}\ \text{и}\ y=y'\frac{c}{\gamma_0}. \qquad (105)$$

Таким образом, безразмерные координаты x', y' равноустойчивых откосов, указанные на графиках, уточняются внесением постоянной для данных грунтов поправки, равной отношению сцепления к объему веса грунта.

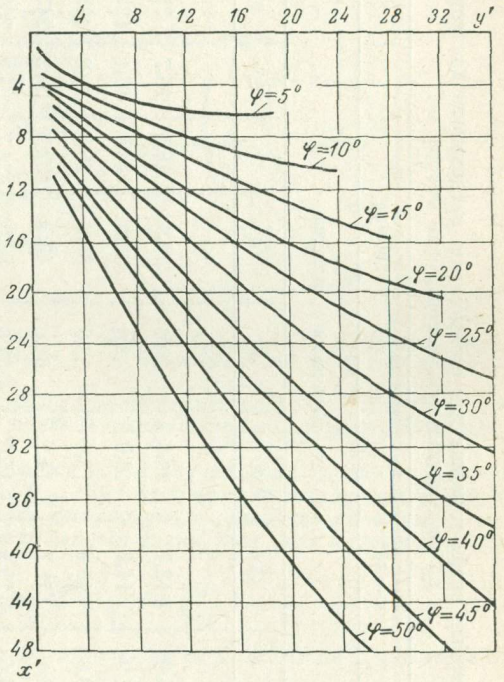


Рис. 44. Очертание равноустойчивых откосов в безразмерных координатах

Для определения истинного значения предельной нагрузки на горизонтальную плоскость откоса следует пользоваться выражением

$$P_{пр}=\bar{\sigma}_z c+c\operatorname{tg}\varphi\cdot c;\quad y=y'\cdot\frac{c}{\gamma_0}. \qquad (106)$$

В табл. 52 приведены безразмерные величины $\bar{\sigma}_z$ в зависимости от угла внутреннего трения φ и угла наклона откоса к горизонтальной плоскости α. При криволинейном очертании откоса предельное давление на него можно определить по формуле

$$P_{пр}=c\operatorname{ctg}\varphi\left[\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi e^{(\pi-2\alpha_0)\operatorname{tg}\varphi}}-1\right], \qquad (107)$$

где α_0 — угол между касательной к откосу в точке 0 и горизонтальной плоскостью.

Таблица 52

Безразмерные коэффициенты для определения предельного давления $\bar{\sigma}_z$ на горизонтальную поверхность откоса

γ'	$\varphi=10°$		$\varphi=20°$			$\varphi=30°$				$\varphi=40°$				
	Значения α, градусы													
	0	10	0	10	20	0	10	20	30	0	10	20	30	40
0	8,34	7,51	14,8	12,7	10,9	30,1	24,3	19,6	15,7	75,3	55,9	41,4	30,6	22,5
0,5	9,02	7,90	17,9	14,8	12,0	43,0	32,6	24,4	18,1	139	94,0	62,6	41,3	27,1
1	9,64	8,26	20,6	16,6	13,1	53,9	39,8	28,8	20,3	193	126	81,1	50,9	31,0
1,5	10,2	8,62	23,1	18,2	14,1	64,0	46,5	32,8	22,3	243	157	98,5	59,8	34,7
2	10,8	8,95	24,4	19,9	15,0	73,6	52,9	36,7	24,2	292	186	115	68,4	38,1
2,5	11,3	9,28	27,7	21,4	15,8	82,9	59,0	40,4	26,0	339	215	132	76,7	41,3
3	11,8	9,59	29,8	23,0	16,7	91,8	65,1	44,1	27,8	386	243	148	84,9	44,4
3,5	12,3	9,89	31,9	24,4	17,5	101	71,0	47,6	29,4	432	271	164	93,0	47,5
4	12,8	10,2	34,0	25,8	18,3	109	76,8	51,2	31,1	478	299	179	101	50,4
4,5	13,2	10,5	36,0	27,2	19,1	118	82,6	54,7	32,7	523	327	195	109	53,3
5	13,7	10,8	38,0	28,7	19,9	127	88,3	58,1	34,3	568	354	211	117	56,2
5,5	14,1	11,0	39,9	30,0	20,6	135	94,0	61,6	35,8	613	381	226	125	59,0
6,0	14,5	11,3	41,8	31,4	21,4	143	99,6	65,0	37,4	658	409	241	132	61,7

2. Приближенный метод критического круга скольжения Терцаги. Допустим, что разрушение откоса произойдет по поверхности скольжения ab (рис. 45), которая является дугой окружности, описанной радиусом R из центра 0 и проходящей через подошву откоса.

При угле внутреннего трения $\varphi = 0$ устойчивость откоса будет определяться величиной сил сцепления, действующих по дуге ab. Из условия равновесия откоса находим:

$$c = Q\frac{r}{Rl}, \tag{108}$$

где c — удельная сила сцепления, необходимая для обеспечения устойчивости откоса;

Q — вес призмы обрушения откоса;

r — плечо силы относительно центра окружности.

Вероятная поверхность скольжения пройдет через подошву откоса по такой дуге окружности, для которой требуется максимальная или критическая удельная сила сцепления.

Положение центра 0 критического круга скольжения Терцаги определяется однозначно углами β, α и θ, значение $C_{кр}$ определяется из выражения

$$C_{кр} = \frac{\gamma h}{f(\alpha, \beta, \theta)} = \frac{\gamma h}{\chi_c}, \tag{109}$$

где χ_c — коэффициент устойчивости, зависящий от угла откоса β.

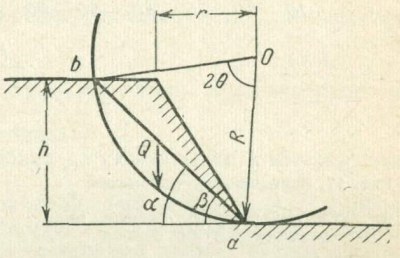


Рис. 45. Определение устойчивости откоса по критическому кругу скольжения

При известном значении угла откоса β величины углов α и θ, а следовательно, и положение центра критического круга О можно найти по графикам Фелениуса (рис. 46).

Устойчивость откоса обеспечивается в том случае, если величина фактической удельной силы сцепления $c \geqslant C_{кр}$. Если угол внутреннего трения φ больше нуля, то и в этом случае сохраняет свое значение вышеуказанное выражение (109), однако функция в знаменателе зависит также и от угла внутреннего трения:

$$C_{кр.\,\varphi} = \frac{\gamma_0 h}{F(\alpha, \beta, \theta, \varphi)} = \frac{\gamma_0 h}{\chi_{c\varphi}}, \tag{110}$$

где $\chi_{c\varphi}$ — коэффициент устойчивости, зависящий от угла откоса β и угла внутреннего трения φ.

Отношение коэффициента устойчивости $\chi_{c\varphi}$ к коэффициенту устойчивости χ при $\varphi = 0$ называется параметром трения

$$\eta_\varphi = \frac{\chi_{c\varphi}}{\chi_c} \tag{111}$$

Учитывая, что $\chi_{c\varphi} = \eta_\varphi \chi_c$, получаем:

$$C_{кр,\,\varphi} = \frac{1}{\eta_\varphi} C_{кр}. \tag{112}$$

В этом выражении $C_{кр}$ определяется по кругу скольжения для случая $\varphi = 0$, значение $\frac{1}{\eta_\varphi}$ в зависимости от угла внутреннего трения φ при различных углах откоса β определяется по графику Фелениуса (рис. 47).

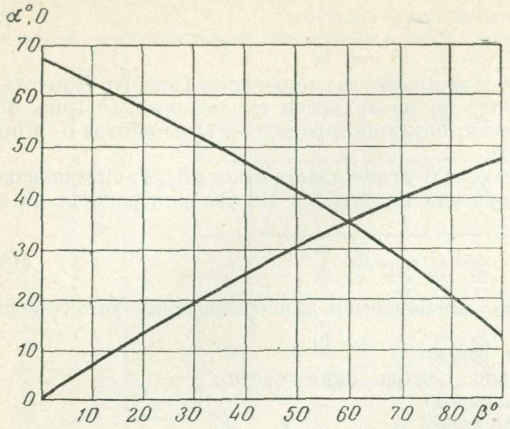


Рис. 46. Зависимость положения центра критического круга от угла откоса

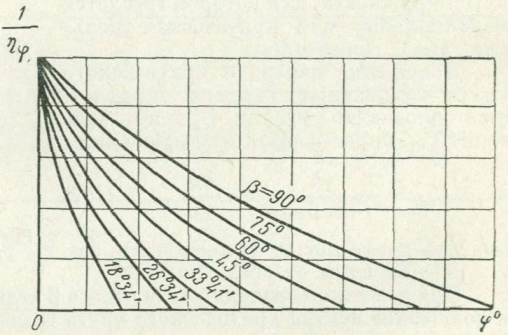


Рис. 47. Зависимость параметра $\frac{1}{\eta_\varphi}$ от угла внутреннего трения при различных углах откоса

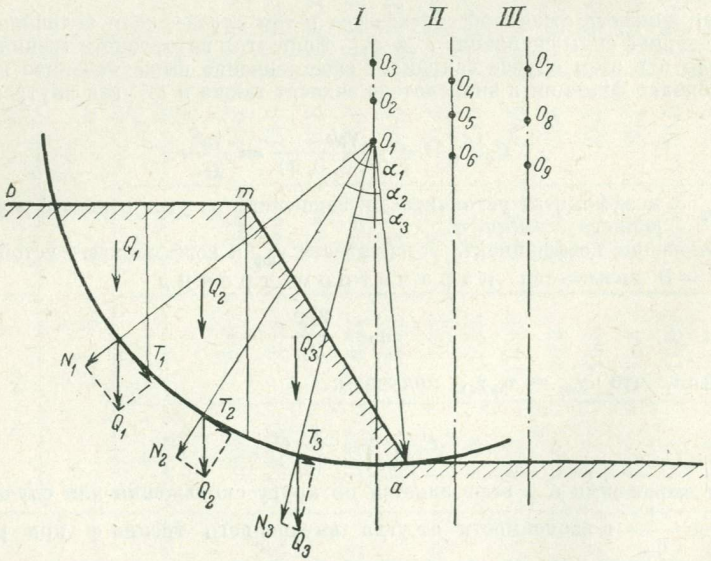


Рис. 48. Определение устойчивости откоса по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения

3. Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Модификацией метода критического круга скольжения Терцаги, применяемой для оценки устойчивости откосов, является метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Сущность его состоит в отыскании графоаналитическим способом такой круглоцилиндрической поверхности скольжения, проходящей через основание откоса, при которой коэффициент устойчивости грунта откоса будет минимальным (рис. 48).

При этом коэффициент устойчивости будет равен:

$$\eta = \frac{\sum Nf + cl}{\sum T}, \tag{113}$$

где $\sum N$ — сумма нормальных сил, действующих радиально относительно поверхности скольжения;

$f = \operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент трения;

c — удельная сила сцепления в пределах участка дуги поверхности скольжения;

l — длина дуги поверхности скольжения;

$\sum T$ — сумма сдвигающих сил, действующих по касательным к поверхности скольжения.

При практическом использовании метода из некоего произвольного центра O_1 радиусом R через точку a основания откоса проводят поверхность скольжения ab. Участок откоса, ограниченный дугой ab и ломаной линией откоса a, mb, разбивает на ряд призм, массу которых Q_1, Q_2, Q_3, . . ., Q_n подсчитывают как площади соответствующих геометрических фигур, умноженные на объемную массу грунта γ_0. Силы, удерживающие N и сдвигающие T, будут найдены соответственно:

$$N_i = Q_i \cdot \cos \alpha, \quad T_i = Q_i \cdot \sin \alpha. \tag{114}$$

После определения коэффициента η_1 повторяют построения и расчеты при цилиндрических поверхностях скольжения, проведенных из новых центров O_2, O_3 и т. д. до тех пор, пока не будет найдено минимальное значение η_{min} на первой вертикали. Аналогично находят минимальный коэффициент устойчивости η_{min} для второй вертикали путем построения цилиндрических поверхностей скольжения из центров O_4, O_5, O_6 и т. д., а затем для третьей и следующих вертикалей до тех пор, пока не будет найден минимум миниморум коэффициента устойчивости $\eta_{min\ min}$. Цилиндрическая поверхность скольжения, соответствующая коэффициенту устойчивости $\eta_{min\ min}$, является наиболее вероятной поверхностью скольжения грунтов склона. Устойчивость склона считается обеспеченной, если $\eta_{min\ min} > 1$.

Определение коэффициента устойчивости $\eta_{min\ min}$ описанным выше способом связано с громоздкими графическими построениями и аналитическими подсчетами. Поэтому рядом авторов выполнены решения этой задачи для некоторых часто встречающихся случаев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голушкевич С. С. Статика предельного состояния грунтовых массивов. М., Гостехиздат, 1957, 288 с.
2. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М., Автотрансиздат, 1961, 707 с.
3. Снитко Н. К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. Л., Госстройиздат, 1970, 206 с.
4. Флорин В. А. Основы механики грунтов, т. I и II. М.—Л., Стройиздат, 1959, 357 с.
5. Цытович Н. А. Механика грунтов. М., Госстройиздат, 1963, 636 с.

Глава четвертая

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Инженерно-геологическими процессами (по Г. Н. Каменскому) называют изменения, происходящие в геологической среде под воздействием строящихся и эксплуатируемых сооружений (табл. 53—57).

Таблица 53

Количественные показатели интенсивности развития и активности геологических процессов
(по Е. П. Емельяновой)

Объект изучения	Показатели	
	интенсивность развития	активность
Процесс	Продолжительность цикла и его отдельных фаз Скорость процесса Скорость денудации, обусловленной данным процессом	Количество вновь образующихся форм или повторений цикла в единицу времени на единицу длины или площади
Формы, образованные процессом	Количество форм на единицу длины или площади и их размеры Доля (процент) длины или площади, занятой формами от общей длины или площади	Отношение количества свежих форм к их общему количеству (число, длина или площадь)

Цели изучения геологических процессов.

1. Учет наличия и активности процессов и распространенности созданных ими форм для общей оценки инженерно-геологической обстановки — выяснения возможности ее изменения, приспособления к ней или ее избежания при строительстве.

2. Прогноз развития процессов, возможности возникновения их новых очагов и новых форм.

3. Обоснование и выбор мероприятий по предупреждению процессов или борьба с их вредным влиянием, получение расчетных показателей для их проектирования.

Таблица 54

Основные методы изучения физико-геологических и инженерно-геологических процессов
(по Е. П. Емельяновой)

Группы методов	Решаемая задача
Разовые (сравнительно кратковременные) полевые исследования: съемка, изыскания для различных сооружений, обследование построенных сооружений и т. п.	Изучение условий возникновения и развития процессов, их результатов (форм, ими образованных), степени их распространения и активности
Стационарные наблюдения (более или менее длительные), а также наблюдения при строительстве и эксплуатации сооружений	Изучение хода процессов во времени в зависимости от влияния комплекса природных и искусственных факторов, их режима и интенсивности
Лабораторное моделирование	Изучение общих и частных закономерностей возникновения и развития процессов в условиях исключения — влияния некоторых факторов
Полевое экспериментирование	Искусственное возбуждение или ускорение процессов при заранее предусмотренных условиях и установленной аппаратуре для наблюдений

1 ГРАВИТАЦИОННЫЕ СМЕЩЕНИЯ

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ СКЛОНОВ (ПО И. В. ПОПОВУ)

1. Обвально-осыпные
2. Оползневые
3. Солифлюкционные
4. Делювиальные (аккумулятивные)
5. Эрозионные
6. Аллювиально-террасовые в долинах рек
7. Тектонические — по сбросовым зонам
8. Поверхности лавовых потоков
9. Склоны сложного генезиса

ТИПЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ СМЕЩЕНИЙ НА СКЛОНАХ (СИСТЕМАТИКА И УТОЧНЕНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ПО Е. П. ЕМЕЛЬЯНОВОЙ)

I. СОБСТВЕННО ГРАВИТАЦИОННЫЕ СМЕЩЕНИЯ

А. Основные типы

1. *Обвал* — отделение от склона более или менее крупной массы горных пород, их опрокидывание и обрушение вниз частично путем свободного падения, частично путем ударения о склон и отскакивания, перекатывания по склону и т. п.

2. *Осыпание* (образование осыпей) — отделение от склона более или менее мелких (дресва, щебень) обломков горных пород, их падение или скатывание по склону; *осыпь* — накопление продуктов осыпания у подошвы склона.

3. *Оползень* — смещение части горных пород, слагающих склон, нередко также его основание и территорию, расположенную за его бровкой, в виде скользящего движения без потери контакта между смещающейся и неподвижной частью склона (а также форма рельефа и геологическое образование, представляющие результат оползания).

4. *Лавины* — скольжение и обрушение снежных масс.

Б. Промежуточные типы

5. *Оползень-обвал* — смещение части горных пород, слагающих склон начинающееся оползанием его верхней части и переходящее в обвал в процессе смещения по его нижней крутой части, не подвергавшейся оползанию.

6. *Обвал-оползень* — смещение части пород, слагающих склон, начинающееся в виде обвала его верхней крутой части и переходящее в скользящее движение по его нижней более пологой части; могут оползать не только обвалившиеся массы, но и подстилающие их отложения, равновесие которых нарушается обвалом.

7. *Осовы* — соскальзывание всей или значительной части осыпи, большей частью быстрое.

II. СМЕЩЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ СОВМЕСТНЫМ ВЛИЯНИЕМ ГРАВИТАЦИИ И ДРУГИХ СИЛ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОРОД, СЛАГАЮЩИХ СКЛОН В ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ

8. *Курумы* — смещающиеся скопления крупнообломочных продуктов выветривания (преимущественно морозного), двигающиеся по склонам под совместным влиянием гравитации и колебаний температуры.

9. *Солифлюкция* — перемещение по склону водонасыщенных рыхлых отложений под совместным воздействием гравитации и процессов, связанных с промерзанием и оттаиванием грунтов (в районах с суровым климатом).

10. *Крип*, или *поверхностная ползучесть*, — преимущественно зигзагообразное перемещение поверхности склона при сложении перемещений, возникающих под влиянием температурного расширения и сжатия, замерзания и таяния, разбухания и усадки, деятельности корней растений и роющих животных, с перемещениями, обусловленными гравитацией (термин применяется преимущественно для районов с умеренным и теплым климатом).

ОБВАЛЫ

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБВАЛОВ

По виду деформаций (по В. Д. Ломтадзе)

1. Вывалы — выпадение из крутых откосов и обрывов отдельных глыб и камней, которые большую часть пути проходят по воздуху.

2. Обвалы — обрушение масс горных пород, как отдельных глыб, так и крупных выступов горных пород, сопровождающееся скатыванием, опрокидыванием и раскалыванием.

По составу обрушающихся пород и их объему (по М. Н. Ройнишвили)

1. Скальные или каменные: а) крупные (несколько сотен или тысяч м^3); б) малые (до 150—200 м^3); в) падение и скатывание отдельных камней (камнепады).
2. Земляные обвалы, образующиеся в глинистых, песчаных, гравелистых, щебнистых, легко выветривающихся скальных и полускальных или слабо сцементированных породах.
3. Смешанные обвалы, образующиеся при залегании рыхлых или слабо сцементированных пород на скальных породах.

СХЕМА ОПИСАНИЯ ОБВАЛОВ

I. Область отрыва: 1) высота склона, его генезис и возраст (для искусственных откосов — метод и время сооружения); 2) слагающие склон породы и условия их залегания, основные системы трещин и величина отдельностей, наличие тектонических нарушений, характер и степень выветрелости пород, наличие взрывных работ при подрезке и степень вызванной ими трещиноватости; 3) крутизна и форма склона в районе отрыва, наличие и характер растительности; 4) поверхность отделения обвалившейся массы, ее размеры, форма и относительная свежесть, указания на характер отделения (отрыв с опрокидыванием или оползень-обвал).

II. Область транзита (путь движения обвала, прохождения глыбово-каменной лавины или падения отдельных камней): 1) длина и относительная высота; 2) состав пород и условия их залегания вдоль пути обвала; 3) морфология — ложбина в склоне или склон, их форма в профиле и в плане, крутизна средняя и в характерных местах, наличие выступающих карнизов, скал, крупных глыб на поверхности; 4) растительность и ее состояние; 5) следы работы и разрушений, совершенных обвалом (или обвалами); 6) наличие задержавшихся при обвалах глыб и камней.

III. Область отложения: 1) характеристика области отложения — дно долины, пляж, бичевник, полотно дороги и т. п.; 2) характер отложения — сплошной завал (его форма, размеры и условия залегания, образование плотины, перегораживающей долину) или участок разброса отдельных глыб и камней (его форма и площадь); 3) объем обвалившихся масс (суммарный); 4) петрографический состав, размер (средний и максимальный) и форма глыб, закономерность в их сортировке, расположении и ориентировке; 5) средняя и максимальная дальность отлета глыб и камней, наличие их на противоположном склоне долины, максимальная высота подъема; 6) указания на время отложения — относительная свежесть и выветрелость разных поверхностей глыб, наличие, характер и возраст растительности, перекрытие дорог, разрушение сооружений.

IV. Сведения о процессе обвала (единичного): 1) время обвала (год и дата или сезон, час или время суток); 2) указания на его подготовку, сведения о его ходе (одновременное или последовательное обрушение), о предшествовавших и сопутствующих явлениях; 3) сведения о причиненном им ущербе.

V. Сведения, получаемые из материалов статистики обвальных явлений (результатов наблюдений на дорогах и т. п.): 1) основные направления и характер движения обломков при обвалах; 2) объемы обвалов (графики их распределения для выбора расчетного значения); 3) величина отдельных камней (то же), дальность отлета (то же); 4) распределение обвалов во времени (по сезонам и времени суток).

VI. Сведения о противообвальных сооружениях: 1) их наличие, состав и время сооружения; 2) состояние в настоящее время и эффективность.

МЕРЫ БОРЬБЫ С ОБВАЛАМИ (ПО Н. М. РОЙНИШВИЛИ)

1. Надзор за состоянием горных склонов и профилактика — искусственное обрушение камней, угрожающих падением.
2. Уположение откосов и их укрепление при помощи устройства противообвальных сооружений (подпорные и облицовочные стены, контрфорсы и т. п.).
3. Защита пути от обвалов путем устройства улавливающих сооружений (стен, траншей, валов, лесопосадок и т. п.) или противообвальных галерей, перекрывающих путь сверху.
4. Относ трассы в сторону или обход обвальных участков.
5. Устройство тоннельных обходов.

Большая часть перечисленных мер борьбы с обвалами, предложенных Н. М. Ройнишвили для дорог, может быть использована и для защиты других сооружений.

ОСЫПИ

По мнению С. Г. Вишнякова, осыпи и накопления обвалов разграничиваются по размерам составляющих их обломков:

Содержание обломков размером более 0,5 м, %	Образование
>75	Обвал
50—75	Осыпь-обвал
25—50	Обвал-осыпь
<25	Осыпь

КЛАССИФИКАЦИЯ ОСЫПЕЙ

Осыпи классифицируются по составу слагающего их материала и по степени подвижности (табл. 55—56).

Таблица 55

Классификации осыпей по составу материала
(по П. И. Пушкину)

Тип	Размер и форма обломков	Преобладающий петрографический состав	Преобладающий размер обломков, мм	Средний угол откоса, градусы
А	Крупнообломочные, глыбовые	Массивные кристаллические породы	Более 100	37
Б	Среднеобломочные, щебеночные, угловатые	Изверженные и прочные осадочные породы	200—100	35
В	Мелкообломочные и дресвяные из угловатых обломков	Сильно выветрелые прочные породы	2—20	32
Г	Разнообломочные из плитчатых или пластинчатых обломков с гладкой поверхностью	Сланцы и осадочные породы		30

Таблица 56

Классификация осыпей по степени подвижности

Тип	Характеристика осыпей	Коэффициент подвижности K
1	Подвижные «живые»	1,0
2	Достаточно подвижные, признаков затухания обычно не наблюдается	0,7—1,0
3	Слабоподвижные, затухающие, имеющие слабое питание	0,5—0,7
4	Относительно неподвижные, уплотнившиеся, поступления нового материала не наблюдается	Менее 0,5

Коэффициент подвижности осыпи равен:

$$K = \frac{\alpha}{\varphi},$$

где α — угол поверхности осыпи;
φ — угол естественного откоса материала, слагающего осыпь.

СХЕМА ОПИСАНИЯ ОСЫПЕЙ

I. **Область питания** (отрыва обломков) и процесс осыпания: 1) общая высота склона, его экспозиция, генезис и возраст (или метод и время сооружения откоса); 2) положение, форма и размеры области питания осыпи; 3) слагающие ее породы, условия их залегания, характер и мощность коры выветривания и ее отдельных зон для каждой литологической разности пород; 4) длина, крутизна и форма склона в области питания, наличие перегибов (участков разной крутизны), выступающих карнизов, гребней, останцов, стенок, типы пород, к которым они приурочены; 5) размер и форма отделяющихся обломков, их зависимость от типа пород и крутизны склона, характер перемещения, частота отделения и скатывания обломков (на единицу длины склона), ее колебания в течение суток, по сезонам и в зависимости от погоды (или время и погода при единичном наблюдении); 6) наличие участков с признаками прекращения осыпания (появление растительности, ее характер), их крутизна и положение на склоне.

II. **Область транзита** (выделяется в тех случаях, когда осыпающиеся обломки часть пути проходят по устойчивым породам, не склонным к осыпанию): ее длина и высота, слагающие породы, условия их залегания и выветрелость, морфология (наличие желобов скатывания), крутизна средняя и в отдельных частях характер перемещения обломков.

III. **Область аккумуляции** (собственно осыпь): 1) условия залегания осыпи (выполнение долины, ложбины или прислонение к склону); 2) состав и условия залегания пород, подстилающих осыпь; 3) форма осыпи в плане (отдельные конусы — треугольные, лучевидные, трапециевидные, слившиеся в основаниях, сплошной шлейф, покров или отдельные пятна на склоне), размеры в плане и мощность, формы поперечного сечения и объем отдельных конусов, форма осыпи в продольном профиле (выпуклая, прямолинейная, вогнутая), уклоны в характерных местах наибольший и средний; 4) петрографический и гранулометрический состав материала, слагающего осыпь, его распределение (хаотическое, закономерное возрастание или убывание крупности обломков книзу), форма обломков, их выветрелость, наличие слоистости, наличие мелкоземистого заполнителя, его содержание, распределение и влажность; 5) наличие подземных

вод, источники обводнения; 6) наличие подмыва или подрезки основания осыпи; 7) активность осыпи, наличие, характер и частота скатывания, следы осовов и сведения о них; 8) поверхность осыпи — обнаженная, образование растительного покрова, его характер, густота и распределение, образование рытвин и оврагов; 9) другие указания на возраст осыпи и стадию ее развития.

СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ОСЫПЕЙ (ПО С. Г. ВИШНЯКОВУ)

I. Интенсивное разрушение — крутизна области питания более 65°, преобладает обваливание, растительность почти отсутствует, осыпь активна.

II. Умеренное разрушение — крутизна области питания 45—65°, происходит обваливание или шелушение, местами появляется растительность.

III. Слабое разрушение — крутизна области питания 30—45°, происходит только шелушение, почти весь склон покрывается растительностью.

ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ ОСЫПЕЙ

1. Мероприятия по обеспечению устойчивости дорожного полотна на осыпях (по В. В. Корнееву): а) регулирование поверхностного и подземного стоков; б) сооружение подпорных и одевающих стенок; в) уполаживание и террасирование осыпей; г) берегоукрепительные и выправительные работы у шлейфа осыпей; д) укрепление осыпей растительностью.

2. Мероприятия по борьбе с осыпанием на верховых откосах: а) сооружение площадок и берм или предохранительных щитов (козырьков) и периодическая уборка скапливающегося на них материала; б) водоотвод, уполаживание осыпающихся склонов, закрепление их растительностью, сооружение барражных стенок.

ОПОЛЗНИ

КЛАССИФИКАЦИЯ ОПОЛЗНЕЙ

Из большого количества классификаций оползней в справочнике приведены лишь те, которые в настоящее время могут принести пользу в практике или необходимы для понимания терминологии, часто встречающейся в литературе об оползнях. В практике рекомендуется использовать только классификации логически выдержанные, основанные на одном признаке в каждом таксономическом подразделении. Из классификаций разных авторов, основанных на одинаковых признаках, приведены наиболее полные, а также получившие широкое распространение.

Классификации оползней можно подразделить на три группы.

Общие классификации, применимые ко всем районам и основанные на признаках, характеризующих особенности самого оползневого процесса; используются при съемке и терминологически (для сокращения описаний, при рассмотрении закономерностей оползневых явлений и т. п.), а также для определения применимости различных методов расчета устойчивости склонов, прогноза оползней и разных противооползневых мероприятий.

Частные классификации, также применимые к любым районам, основанные на признаках, существенных для оценки значения в развитии оползней отдельных факторов; используются для этой оценки и выбора противооползневых мероприятий.

Региональные классификации, применимые только к отдельным районам распространения оползней, основанные на признаках, характе-

ризующих региональные (или местные) различия условий их возникновения; используются для систематизации сведений об оползнях в районах их широкого развития и выявления некоторых закономерностей этого развития.

Во всех случаях возможно одновременное или последовательное использование нескольких классификаций.

ОБЩИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ОПОЛЗНЕЙ

I. Классификация оползней по характеру захвата горных пород К. И. Богдановича (1911 г).

1. Оползни первого порядка, захватывающие ранее несмещавшиеся породы.
2. Оползни второго порядка, возникающие в теле ранее образовавшихся оползней.

II. Классификация оползней по структуре оползневого склона и положению поверхности смещения Ф. П. Саваренского (1934 г.)

1. Асеквентные — оползни в однородных неслоистых породах с криволинейной поверхностью скольжения, положение которой зависит от величины трения и сцепления пород.
2. Консеквентные — оползни, у которых скольжение происходит по наклонной поверхности, предопределенной строением склона (поверхности наслоения, трещине и т. п.).
3. Исеквентивные — оползни, у которых поверхность смещения пересекает слои разного состава.

III. Классификация оползней по видам деформаций пород — по механизму смещения Дорожного исследовательского бюро США, Варнес (1958 г.)

Скольжение: 1) вращательное (оползни вращения); 2) плоское: а) блоковый сдвиг; б) скольжение рыхлых наносов и разрыхленных масс: 3) оползни выдавливания (раздавливания).

Течение: 1) сухое; 2) мокрое.

Смешанное движение. Типы оползней выделяются по сочетанию их механизма с составом смещающихся пород.

IV. Классификация оползней по их возрасту и фазам развития И. В. Попова (1946 г.)

1. Современные — образовавшиеся при современном базисе эрозии и уровне абразии: а) движущиеся; б) приостановившиеся; в) остановившиеся; г) закончившиеся.
2. Древние — образовавшиеся при ином базисе эрозии и уровне абразии: д) открытые (ничего, кроме почвы и элювия, на поверхности не имеют); е) погребенные — перекрытые позднейшими отложениями.

V. Классификация оползней по геологическим условиям их зарождения Е. П. Емельяновой (1968 г.)

1. Оползни в почти горизонтально залегающих слоях.
2. Оползни по наклонным поверхностям ослабления в коренных породах.
3. Оползни покровных образований на склонах.

VI. Классификация оползневых явлений по их морфологии для целей инженерно-геологического картирования Е. П. Емельяновой (1961 г.)

При картировании в зависимости от соотношения размеров оползней с масштабом карты наносят изображения: 1) только районов развития оползней — при мелкомасштабном картировании; 2) отдельных оползней внемасштабными знаками — при среднемасштабном картировании; 3) всех оползней в масштабе с их индивидуальными очертаниями и деталями строения — при крупномасштабном картировании. Соответственно даны три классификации оползневых явлений: 1) оползневых районов, 2) собственно оползней, 3) элементов морфологии оползней.

Классификация по морфологии оползневых районов

1. Единичные оползни.
2. Области линейного распространения оползней по берегам морей, крупных рек, озер, водохранилищ, вдоль дорог:
   а) оползни чередуются с устойчивыми участками склонов,
   б) оползни занимают почти весь склон.
3. Области площадного развития оползней (по разветвленной эрозионной сети):
   а) оползни редки,
   б) оползни часты.

Классификация оползней по их морфологии как по комплексному признаку, отражающему условия их образования, глубину захвата склона и механизм смещения (перечислены лишь наиболее часто встречающиеся формы оползней)

1. Оползни циркообразные (полукруглые).
2. Оползни фронтального типа, вытянутые вдоль склона (их ширина значительно превышает длину, измеряемую по направлению движения).
3. Оползни глетчерообразные, вытянутые по склону (их длина значительно превышает ширину).
4. Оползни с суженной горловиной (их ширина внизу значительно меньше ширины в средней части).
5. Оползни ложкообразные, ха рактеризующиеся наличием оползневого цирка в верхней части склона и глетчеровидного потока в нижней.
6. Оплывины эллипсоидальной, грушевидной или каплевидной формы, не доходящие до основания склона.
7. Оползни угловатых очертаний (разновидность — лабиринт).
8. Оползни без ясных границ (результат медленного пластического течения).
9. Оползни сложные, образовавшиеся за счет разрастания и сочетания более простых форм.

Классификация элементов морфологии оползней (перечислены лишь наиболее часто встречающиеся элементы морфологии оползней)

А. Свежие оползни

1. Границы: а) бровка срыва, б) граница оползших масс.
2. Поверхности: а) обнажившиеся поверхности срыва, б) сохранившаяся дневная поверхность на смещенных монолитных блоках, в) бугристая и сильнотрещиноватая поверхность на деформированных и раздробленных участках,

г) поверхность относительно просевших участков (грабенов), д) сглаженная поверхность масс, находившихся в разжиженном (текучем) состоянии, е) валы выпирания и наплыва, ж) поверхности, образовавшиеся в результате обрушения (на стенках срыва и клиф), и) глыбовая и комковатая поверхности обрушившихся масс, к) площади оползней второго порядка и оплывин.

3. Отдельные признаки деформаций: а) трещины, б) осыпи, обвалы, оплывины и другие локальные деформации в пределах оползневого цирка, в) деформации растительности и сооружений.

Б. Давние оползни

1. Граница оползневого цирка.

2. Поверхности: а) сглаженная, б) с наличием оползневых террас или ступеней (границы и поверхности отдельных ступеней), в) бугристая, г) пологие западины, д) измененная искусственно (в результате планировки или других работ), е) площади оползней II порядка, оплывин, накоплений обвалов и осыпей.

3. Отдельные признаки деформаций и изменений тела оползня: а) деформированные сооружения, б) «пьяный» лес, саблевидные деревья, наличие растительных аномалий, в) овраги и промоины на теле оползня, г) места подмыва или искусственной подрезки языка оползня.

ЧАСТНЫЕ КААССИФИКАЦИИ ОПОЛЗНЕЙ

I. Классификация оползней по глубине захвата склона (А. Коллен, 1846 г.).

1. Мелкие оползни, поверхность смещения которых расположена в зоне сезонных колебаний влажности и температуры.

2. Глубокие оползни, поверхность смещения которых в основном проходит ниже зоны сезонных колебаний влажности и температуры грунтов.

Аналогично можно выделить оползни, целиком расположенные в зоне выветривания и оползни, поверхность смещения которых проходит ниже зоны выветривания, а также оползни, поверхность смещения которых располагается в корнеобитаемом слое или ниже глубины проникновения корней, испытывающие и не испытывающие влияние деятельности человека.

II. Классификация оползней по значению в их развитии подземных вод (по Е. П. Емельяновой, 1959 г.)

1. Оползни, у которых поверхность или зона смещения расположена в породах, содержащих гравитационную воду, испытывают большое влияние подземных вод на условия равновесия склона.

2. Оползни с поверхностью (или зоной) смещения, расположенной в водоупорных породах, в которых вся вода находится в связанном состоянии и не передает гидростатического давления, а подземные воды содержатся в выше залегающих породах, пассивно увлекаемых оползнем, — влияние подземных вод на условия равновесия склона незначительно.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ КЛАССИФИКАЦИИ ОПОЛЗНЕЙ

I. По приуроченности движения к определенному стратиграфическому горизонту и генезису пород, участвующих в смещении (Дранников, 1949).

II. По приуроченности оползней к склонам разного генезиса (морским, речным, овражным, искусственным откосам и т. п.) или по основным причинам возникновения оползней (например, оползни абразионные, эрозионные и искусственные по И. Б. Корженевскому, 1960).

КЛАССИФИКАЦИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ТРЕЩИН (ПО Г. И. ТЕР-СТЕПАНЯНУ, 1958 Г.)

Трещины выделяются по двум признакам:

1) по характеру вызвавших их напряжений: а) растяжения, б) растяжения и сдвига, в) сдвига, г) сжатия и сдвига, д) сжатия;

2) по направлению вектора полной деформации по отношению к плоскости трещины: а) опущенные, б) горизонтальные, в) поднятые.

Типы трещин именуются по двум признакам, например: тип 2а — опущенная трещина растяжения и сдвига.

СХЕМА ОПИСАНИЯ ОПОЛЗНЕЙ

I. Склон или откос, на котором возник оползень (описываются условия вне оползня и на участке оползня до его возникновения): 1) местоположение, экспозиция, генезис (морской, озерный, речной, овражный, водохранилища, поверхность сброса, искусственный откос или насыпь), длина (между соседними долинами), относительная высота; 2) форма в профиле и в плане, крутизна в характерных местах и средняя; 3) геологическое строение склона и его основания, условия залегания пород относительно склона, их состояние — влажность, консистенция, трещиноватость, выветрелость и т. д.; 4) гидрогеологические условия; 5) морфология и микрорельеф, их связь с геологическим строением, эрозионная сеть на склоне; 6) растительность и застройка; 7) характеристика рельефа за бровкой склона — плато, терраса, более пологий склон, обратный склон, расстояние водораздела от бровки склона; 8) характеристика подножия склона и его подводной части, наличие подмыва или искусственной подрезки склона или его подножия, интенсивность подмыва; 9) наличие и характеристика останцов террас, прислоненных к склону; 10) возраст склона и основные этапы его формирования (для откосов — время и способ их сооружения).

II. Оползень: 1) расположение на склоне, базис; 2) размеры и форма в плане, в продольном и поперечном профиле; 3) превышение вершины бровки срыва над базисом, высота и характер стенки срыва, бортов и языка (вала выдавливания), амплитуда смещения; 4) рельеф поверхности оползня; 5) площадь водосбора оползня, условия поверхностного стока по оползню, источники питания тела оползня водой; 6) растительный покров на оползне и его отличия от растительности вне оползня; 7) сооружения на оползне и их деформации; 8) сведения о мощности оползня, о форме и положении поверхности скольжения, составе, условиях залегания и состоянии оползших грунтов, указания на механизм смещения; 9) свежесть оползневых деформаций, указания на возраст оползня.

III. Соседние оползни: 1) расстояние до них и их краткая характеристика (если они расположены на том же склоне); 2) межоползневые мысы — наличие, размеры, морфология.

IV. Сведения о подготовке, образовании и смещениях оползня: 1) рельеф склона и условия до оползня, время, скорость и характер смещения, предшествовавшие и сопутствовавшие явления; 2) последующее разрастание оползня и возникновение оползней второго порядка; 3) повторные подвижки; 4) активность оползня в настоящее время и режим деформаций; 5) причиненный ущерб, деформации и разрушение сооружений; 6) обратные расчеты или проверка расчетных схем и показателей для момента смещения.

V. Осуществленные противооползневые мероприятия: состав, размеры, расположение, время сооружения, состояние в настоящее время, эффективность.

VI. Выводы: 1) тип оползня, его причины и относительное значение в его возникновении различных факторов; 2) взаимосвязь с другими процессами; 3) стадия развития, прогноз дальнейшего развития.

КОЭФФИЦИЕНТ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА

Этот коэффициент показывает соотношение сил сопротивления оползневому смещению и активных сдвигающих сил, в разных случаях он имеет различное математическое выражение:

1) при плоской поверхности скольжения — это отношение сумм проекций соответствующих сил на плоскость скольжения;

2) при круглоцилиндрической поверхности скольжения — это отношение сумм моментов соответствующих сил относительно оси вращения;

3) при любом виде поверхности смещения — это отношение суммарной прочности пород вдоль этой поверхности (на сдвиг) к алгебраической сумме касательных сил вдоль той же поверхности.

Коэффициент устойчивости склонов непрерывно изменяется во времени и поэтому имеет определенную величину только для определенного момента времени и для определенных условий. Оползневое смещение начинается в тот момент, когда коэффициент устойчивости склона K, уменьшаясь во времени, достигает величины, равной единице.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕЙ ВО ВРЕМЕНИ

I. Стадии развития оползней (по Ф. П. Саваренскому, 1937 г.): 1) подготовительная стадия; 2) собственно оползневое смещение масс горных пород; 3) последующая стадия в жизни склона и смещенных оползневых масс.

II. Схема полного оползневого цикла. Для случая однократного нарушения равновесия склона и образования оползня первого порядка Е. П. Емельянова выделяет стадии и фазы (табл. 57). *Стадии* — части оползневого цикла, в течение которых развитие оползневого процесса качественно однородно и накапливаются количественные изменения, подготавливающие качественный переход в другую стадию.

Фазы — части стадий развития оползневого процесса, в течение которых его как качественные, так и количественные характеристики более или менее постоянны.

III. Скорость вязко-пластического течения бесконечно длинного слоя постоянной мощности h, залегающего на плоском склоне, наклоненном под углом β к горизонту (по Н. В. Тябину, Н. Н. Маслову, А. С. Строганову и др.).

А. Слой характеризуется постоянными реологическими характеристиками — порогом ползучести τ и коэффициентом вязкости η.

Максимальная скорость на поверхности земли:

$$V_{max} = \frac{\gamma}{2\eta} (h - h_0)^2 \sin \beta,$$

где γ — объемная масса грунта;

h_0 — мощность верхней части слоя, движущейся с одинаковой скоростью, равной V_{max} («жесткий слой»).

$$h_0 = \frac{\tau_0}{\gamma \sin \beta}.$$

Б. Величина порога ползучести τ является линейной функцией от величины нормального давления p:

$$\tau_0 = p \operatorname{tg} \varphi + C.$$

Тогда

$$h_0 = \frac{C}{\gamma (\sin \beta - \cos \beta \operatorname{tg} \varphi)}.$$

Таблица 57

Схема полного оползневого цикла

Стадия	Фаза
I. Стадия подготовки оползня — период времени, в течение которого происходит уменьшение коэффициента устойчивости склона и в породах склона нарастают деформации, предшествующие их разрушению (образованию поверхности скольжения) или началу их вязко-пластического течения Сопутствующие оползневые явления при наличии прислоненных к склону ранее оползших масс: 1) возникновение оползней II порядка в теле ранее возникших оползней; 2) повторные подвижки ранее возникших оползней; 3) подвижки скоплений рыхлого материала, накопившегося у стенки срыва ранее возникшего оползня	*1. Фаза затухающих деформаций* — период времени, в течение которого нарастание деформаций соответствует величине роста напряжений или падения прочности пород и прекращается или замедляется с прекращением или замедлением этих процессов (упругие деформации и затухающая ползучесть) *2. Фаза глубинной ползучести* — период времени, в течение которого происходит медленное нарастание деформаций, непрекращающееся и при отсутствии возрастания напряжений (установившаяся ползучесть)
II. Стадия основного смещения оползня — период времени, в течение которого вслед за разрушением пород вдоль поверхности скольжения за сравнительно короткий срок осуществляется большая часть оползневого смещения и коэффициент общей устойчивости склона повышается (стадия восстановления общего равновесия склона)	*3. Фаза нарастания скорости деформаций*, обусловленная процессом разрушения пород в зоне смещения *4. Фаза быстрого нарастания скорости смещения*, обусловленная превышением сил сдвигающих над силами сопротивления после разрушения пород *5. Фаза затухания скорости смещения*, наступающая после того, как вследствие изменения положения тела оползня на склоне сдвигающие силы становятся меньше сил сопротивления (движение по инерции)
III. Стадия вторичных смещений — период времени, в течение которого разрыхлившиеся при основном смещении массы горных пород уплотняются, а участки оползневого склона, оказавшиеся в результате основного смещения в неустойчивом состоянии, путем локальных смещений достигают устойчивости (стадия восстановления локальных условий равновесия)	*6. Фаза восстановления локальных нарушений равновесия*, вызванных главным оползневым смещением *7. Фаза восстановления локальных нарушений равновесия*, вызванных выветриванием горных пород, подведенных к дневной поверхности в процессе основного смещения
IV. Стадия устойчивости (стабилизации) — период времени, в течение которого средний коэффициент устойчивости склона остается постоянным или увеличивается, а горные породы, слагающие склон, не испытывают деформаций Перемещаются только их поверхностные частицы в результате процессов эрозии, абляции и крипа	

Примечание. При повторении оползневого цикла стадия IV нередко отсутствует, а стадия III в большей или меньшей степени перекрывается стадией I.

IV. Амплитуда смещения оползня по круглоцилиндрической поверхности скольжения в стадию основного смещения (по Е. П. Емельяновой). Полная амплитуда смещения состоит из двух отрезков: 1) проходимого оползнем до достижения им нового состояния предельного равновесия D_1 и 2) проходимого по инерции $D_{\parallel}$. В сечении, проходящем через центр тяжести оползня, величина горизонтальной проекции d_1 отрезка D_1, т. е. часть горизонтального смещения, соответствующая достижению нового состояния равновесия, равна следующей величине:

$$d_1 = (C_п - C_у) R \frac{L}{W},$$

где $C_п$ — пиковое сопротивление сдвигу, преодолеваемое в момент отрыва оползня (суммарное);
$C_у$ — остаточное, установившееся сопротивление сдвигу по поверхности скольжения (суммарное);
R — радиус кривизны поверхности скольжения;
L — длина поверхности скольжения в направлении смещения;
W — вес тела оползня.

V. Влияние баланса масс грунта в теле оползня на его устойчивость и величина повторных смещений активного оползня при круглоцилиндрической поверхности скольжения (по Е. П. Емельяновой). Уравнение баланса: 1) для верхней части оползня (расположенной выше центра тяжести оползня):

$$X_в = П_в - Р_в - haS;$$

2) для нижней части оползня:

$$X_н = П_н - Р_н + haS.$$

Здесь X — прибыль (при знаке плюс) или убыль (при знаке минус) массы грунта в рассматриваемой части склона за период времени T, для которого подсчитывается баланс;
П — приход новых масс за счет обвалов, осыпей и смыва с прилегающих склонов, искусственных подсыпок, отложения наносов на языке оползня и т. д.;
Р — расход масс за счет размыва языка оползня, образования промоин и оврагов, искусственных срезок и т. д.;
h — средняя мощность оползня в сечении, отделяющем его верхнюю часть от нижней;
a — ширина оползня в том же сечении;
S — средняя величина смещения оползня в этом же сечении за период времени T;
в, н — индексы, указывающие, к какой части оползня (верхней или нижней) относятся соответствующие обозначения.

Если $X_в - X_н > 0$, то устойчивость оползня за период T уменьшилась, если $X_в - X_н \leqslant 0$, то устойчивость увеличилась.

При многократных повторных смещениях, когда тело оползня почти все время находится в условиях предельного равновесия, соблюдается условие $X_в = X_н$. Тогда величина смещения S будет равна:

$$S = \frac{П_в - Р_в - П_н + Р_н}{2ha}.$$

Когда приход масс отсутствует, а основной статьей расхода является подмыв языка оползня, равный в сумме Q за период времени T (или в среднем q м³ на 1 пог. м берега), то величина смещения S за этот период будет равна:

$$S = \frac{Q}{2ha} = \frac{q}{2h}.$$

VI. Продолжительность повторяющегося полного оползневого цикла (по Е. П. Емельяновой). Для оползней в однородных породах или горизонтально залегающих слоях, развивающихся на склонах плато или террас, средняя продолжительность оползневого цикла (в годах) T выражается формулой

$$T = \frac{aH}{q} \text{ или } T = \frac{a}{V},$$

где a — средняя ширина захвата плато новым оползнем, м;
H — высота плато, м;
q — средняя скорость эрозии или абразии, м³ на 1 пог. м склона в год;
V — средняя скорость отступания бровки склона, м/год (за период продолжительностью в несколько оползневых циклов).

VII. Виды периодичности оползневых процессов (по Е. П. Емельяновой): 1) повторяемость процесса на одном и том же месте, определяемая продолжительностью оползневого цикла или его отдельных стадий и фаз; 2) собственно периодичность или частота распределения во времени оползневых подвижек в разных местах одного района или обширного региона, определяемая существованием периодов, более и менее благоприятных для устойчивости склонов.

Периоды могут быть суточные, месячные, годовые и многолетние разной продолжительности (преимущественная приуроченность оползневых смещений к определенному времени суток, фазам луны, сезонам года, фазам солнечной активности и т. п.).

ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕЙ

I. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ФАКТОРОВ

Классификация Кейла, Н. Н. Маслова и др.: 1) факторы, влияющие на величину сдвигающих сил; 2) факторы, влияющие на величину сил сопротивления смещению.

Классификация Е. П. Емельяновой: 1) условия, определяющие величину коэффициента устойчивости в данный момент; 2) процессы, изменяющие величину коэффициента устойчивости во времени: а) вызывающие временные обратимые изменения коэффициента устойчивости, определяющие его периодические и непериодические колебания, б) вызывающие необратимые изменения коэффициента устойчивости, обусловливающие его односторонние изменения (на которые всегда накладываются и периодические колебания).

II. МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РОЛИ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ В ВОЗНИКНОВЕНИИ ОПОЛЗНЕЙ (ПО Е. П. ЕМЕЛЬЯНОВОЙ)

I. Аналитический — определение влияния фактора на величину коэффициента устойчивости склона K:

а) на абсолютную величину K,

б) на относительное изменение величины K (в %); может применяться и в тех случаях, когда абсолютная величина K неизвестна.

II. Синтетический, или статистический, — выявление связи между факторами и оползневыми процессами путем их сопоставления во времени или в пространстве (картирование), вычисления коэффициентов корреляции и других статистических показателей связи.

МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕВЫХ ЯВЛЕНИЙ (ПО Е. П. ЕМЕЛЬЯНОВОЙ)

А. Расчетные методы:

1. Определение коэффициента устойчивости склона.
2. Сравнение профиля данного склона с профилем склона предельного равновесия.
3. Сравнение величины напряжений в склоне с прочностью слагающих его пород.

Б. Моделирование:

1. Моделирование оползневого разрушения склона: а) на центрифуге, б) методом эквивалентных материалов.
2. Моделирование распределения напряжений в склоне: в) оптическое моделирование, г) метод тензосетки.

В. Метод аналогий или сравнительно-геологический — сравнение основных характеристик данного склона (геологическое строение, прочность пород, высота, крутизна и т. п.) с аналогичными характеристиками других склонов, устойчивость которых известна.

Г. Метод историко-геологический — сравнение настоящих условий склона с условиями, в которых он находился ранее (на основе восстановления истории формирования и существования склона).

Д. Метод учета баланса земляных масс для прогноза повторных смещений оползней вращения и выдавливания (см. выше).

Е. Метод учета влияния факторов — процессов, изменяющих величину коэффициента устойчивости склона.

Ж. Метод наблюдений за предвестниками оползневых смещений — ростом деформаций, возникновением или исчезновением источников, звуковыми явлениями и т. п.

МЕРЫ БОРЬБЫ С ОПОЛЗНЯМИ

КЛАССИФИКАЦИИ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

I. По интенсивности вмешательства в природные условия (по С. К. Абрамову):

1. Пассивные или профилактические мероприятия — всевозможные запрещения (подрезки и подсыпки, уничтожения растительности и распашки, полива и сброса вод, взрывных работ и т. п.) и ограничения (скорости движения транспорта, величины заряда при взрывах и т. п.). 2. Активные (или инженерные) — специальные противооползневые сооружения и мероприятия.

II. По условиям создания необходимого запаса устойчивости склона (по К. Терцаги):

1. Мероприятия, прекращающие или замедляющие уменьшение коэффициента устойчивости склона.
2. Мероприятия, увеличивающие коэффициент устойчивости склона.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ

I. Борьба с подмывом склона:

1. Пассивная защита (мероприятия, не изменяющие режима водоема или водотока): сооружение стенок набережных, волноотбойных стен, покрытие

склонов железобетонными плитами и отмостками, фашины, габионы, искусственные пляжи, устройство коллекторов или лотков и быстротоков в оврагах и т. д.

2. Активная защита (мероприятия, воздействующие на режим водоема или водотока): поперечные буны и продольные волноломы на берегах водоемов, струенаправляющие дамбы и поперечные полузапруды на крупных реках, отвод водотоков, спрямление русел и т. п.

II. Переустройство склонов и откосов: уполаживание, срезка верхней части, создание берм, террасирование, отсыпка банкетов, контрбанкетов и земляных траверсов, уборка оползающих грунтов; замена грунта, засыпка оврагов и т. д.

III. Механическое удержание оползающих масс: подпорные стены, сваи, шпонки, анкерные связи, контрфорсы, обратные своды в выемках, инъекционные преграды.

IV. Мероприятия по дренированию горизонтов подземных вод:

1. Постоянное осушение или снижение уровня (самотечные дренажи): а) перехват подземных вод до их выклинивания на оползневом склоне, б) каптаж выходов подземных вод на склоне, в) осушение тела оползня, изменение направления гидродинамического давления, снижение уровня подземных вод в теле оползня.

2. Временное осушение — откачки, иглофильтры, электродренаж.

V. Регулирование поверхностного стока:

1. Возведение сооружений, перехватывающих поверхностные воды до их поступления на оползень, — различные нагорные канавы.

2. Мероприятия по организации и ускорению стока по поверхности оползня — забивка трещин, микропланировка, выпуск воды из бессточных понижений, устройство отводящей водосточной сети на оползне.

VI. Укрепление склонов и откосов растительностью — одерновка, посев трав, посадка специальных сортов деревьев и кустарников.

VII. Покрытие откосов одеждой, предохраняющей от выветривания, уменьшающей инфильтрацию или теплоизолирующей, — различные облицовки, покрытия из грунтобетона, шлака, битума; нефтевание и солонцевание грунта.

VIII. Изменение свойств грунтов — искусственное закрепление или мелиорация грунтов:

1. Постоянное (необратимое) изменение свойств — обжиг или клинкеризация (при температуре $>800°$), цементация и битуминизация трещиноватых и крупнопористых пород, силикатизация хорошо проницаемых песков, электрохимическое закрепление глин.

2. Временное (обратимое) изменение свойств — замораживание, электродренаж, прогрев до температуры 200—300° (просушивание) и т. п.

Искусственное закрепление применяется только для небольших объемов грунта, т. е. для создания подземных барражей, контрфорсов и т. д.

Основные конструкции постоянного дренажа:

1. Горизонтальный дренаж — открытые откосные дренажи, дренажные контрфорсы, прорези, трубчатые дренажи, галереи, штольни, горизонтальные скважины.

2. Вертикальный дренаж — колодцы, сквозные фильтры, забивные фильтры, вакуум-фильтры.

3. Комбинированные вертикальный и горизонтальный дренажи.

4. Сочетание дренажа и вентиляции (просушивание грунтов).

КУРУМЫ

КЛАССИФИКАЦИЯ КУРУМОВ

1. Каменные моря — широкие по фронту скопления крупнообломочного материала, смещающегося (или смещавшегося раннее) по склону.

2. Каменные реки (потоки) — вытянутые по склону смещающиеся (или смещавшиеся ранее) скопления крупнообломочного материала, приуроченные к отрицательным элементам рельефа.

Схема описания курумов: 1) геоморфологический элемент, на котором залегает курум, форма курума в плане; 2) экспозиция склона, по которому смещается курум; 3) наличие области питания курума, ее характеристика, происхождение курума (накопление обвалов или элювиальное); 4) наличие уноса масс или области аккумуляции у подошвы курума; 5) размеры курума — длина, ширина и мощность, угол склона (средний и в характерных местах), соотношение между мощностью курума и крутизной склона; 6) высота верхней и нижней границ (абсолютная и относительная); 7) характер границ и форма поперечного сечения (для каменных рек); 8) характер поверхности — ровная, ступенчатая, бугристая, струйчатая; 9) форма фронтальной части — прямая, выпуклая, фестончатая, образование крутого уступа, вала или серии концентрических валов, их размеры, ориентировка глыб в них; 10) состав и условия залегания подстилающих пород; 11) петрографический состав, размеры и форма обломков, составляющих курум, степень их выветрелости, острота или закругленность ребер, ориентировка (хаотическая или наличие преобладающего) направления длинных осей), наличие сортировки материала по мощности и по длине курума, относительное количество мелкозема, его распределение и формы залегания; 12) признаки обводнения, наличие выходов подземных вод и выноса мелкозема; 13) присутствие снега или льда в куруме; 14) наличие растительности, ее характер и возраст, степень покрытия; 15) указания на активность, скорость и механизм смещения — наличие деформированных, поваленных или засыпанных деревьев, разрывы сплошности лишайникового покрова, пересечение курумом дорог, троп, нарушения искусственных сооружений; результаты непосредственного измерения скорости смещения; характер смещения — целиком или участками, распределение скоростей по длине и ширине курумов.

ЛАВИНЫ

КЛАССИФИКАЦИИ ЛАВИН (Г. К. ТУШИНСКОГО)

I. По типу и состоянию снега:

1. Сухой метелевый снег, снежные доски.
2. Влажный старый метелевый снег.
3. Мокрый фирновый снег.

II. По морфологии пути:

1. Основы — отрыв и скольжение снежных масс по всей поверхности ровного склона.
2. Лотковые лавины — течение и перекатывание снежных масс по строго фиксированному руслу (логу или лотку).
3. Прыгающие лавины — свободное падение снежных масс при наличии участка отвесных стен на их пути.

III. По морфологии лавиносбора:

1. Эрозионный врез.
2. Денудационная воронка.
3. Деформированный кар.

Типы лавин именуются по трем показателям, например: 1) осов сухой; 2) лотковая влажная лавина из эрозионного среза; 3) прыгающая мокрая лавина из деформированного кара.

СХЕМА ОПИСАНИЯ ЛАВИН И РАЙОНОВ ИХ РАЗВИТИЯ

1. Лавиноопасный склон: положение, экспозиция, относительная высота, форма в профиле и в плане, крутизна (в разных местах); геологическое строение, условия залегания пород, их состояние; 2) лавиносбор (снегосборный бассейн): генезис и морфология, размер, микрорельеф, растительность; 3) канал стока (лог): длина, уклон, его изменения по длине, форма в профиле и размеры поперечного сечения, следы скольжения, растительность («лавинные прочесы»); 4) конус выноса: форма, размер, состав (разрез по данным шурфования), растительность, ее отличия от растительности вне конуса, дальность выброса снега по геоморфологическим и геоботаническим признакам; 5) следы разрушений, причиненных лавинами (снегом и воздушной волной), и формы рельефа, созданные лавинами (борозды, рытвины, ямы выбивания, псевдобоковые морены и т. п.); 6) сведения о количестве падающих лавин, о времени (дата и час), о состоянии снега и погоды в момент падения лавин, о характере смещения, о предшествующих и сопровождающих звуковых и других явлениях; 7) наличие лавинозащитных сооружений, их состав и эффективность.

ФАКТОРЫ ЛАВИНООБРАЗОВАНИЯ (ПО Г. К. ТУШИНСКОМУ)

1. Соотношение крутизны склона и мощности снега.
2. Структура снега, метаморфизация снежного покрова.
3. Температурный режим внутри снежной толщи и метеорологические условия.
4. Микрорельеф подстилающей поверхности.
5. Землетрясения и другие сотрясения.

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ ОТ ЛАВИН (ПО Г. К. ТУШИНСКОМУ)

I. Профилактические меры защиты:

Служба дозора и предупреждения: составление карт прогноза лавинной опасности, организация лавинных станций и другие организационные мероприятия, выработка правил поведения людей, создание спасательного отряда, оповещение работников и населения.

Искусственное обрушение лавин: сброс лавин минометным огнем, подпиливание снежных карнизов.

II. Инженерные меры защиты:

Использование естественных видов защиты — особенностей микрорельефа, скальных террас и выступов.

Предупреждение снегонакопления в лавиносборах — каменные стенки, деревянные щиты.

Предупреждение соскальзывания снега со склонов — облесение склонов, застройка склонов снегосборных бассейнов.

Тормозящие постройки (бетонные клинья).

Изменение пути движения лавин — лавинорезы, отбойные дамбы, направляющие дамбы.

Пропуск лавин над защищаемым объектом — навесы, галереи, тоннели.

II. ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С ДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

1. ПЕРЕРАБОТКА БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ

Сущность процесса переработки берегов заключается в том, что под воздействием абразии, вызываемой ветровыми и судовыми волнами, береговой склон водохранилища разрушается и вырабатывается новый профиль равновесия. В результате переработки надводная часть берегового склона водохранилища

отступает и приобретает новые очертания, а в подводной части склона, в пределах зоны сработки уровня водохранилища и глубины абрадирующего действия волны, формируется абразионная аккумулятивная отмель (рис. 49).

Формы и скорость переработки берегов в различных горных породах различны. Наиболее интенсивно переработка берегов протекает в первые 2—3 года эксплуатации водохранилища, далее, как правило, она постепенно угасает по мере развития отмели и выравнивания береговой линии. В первые годы эксплуатации скорость отступания бровки берега, особенно в легкоразмываемых породах, составляет десятки метров, общая же ширина зоны переработки берега может достигнуть нескольких сотен метров.

В связи с таким интенсивным развитием процесса переработки береговых склонов создается угроза разрушения населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных объектов, расположенных по берегам водохранилищ. Перенос или сохранение таких объектов предусматривается при проектировании водохранилищ и определяется экономическими и другими соображениями с учетом прогнозов скорости переработки.

Изучение процесса переработки берегов показало, что его характер и скорость зависят от сочетания различных природных условий и факторов устойчивости берегового склона от их изменений в связи с созданием водохранилищ. Эти факторы необходимо учитывать при прогнозах переработки берегов. Основные из них приведены в табл. 58.

Из многих существующих методов прогнозов переработки берегов в практике проектных организаций наиболее широко используются методы Е. Г. Качугина (1959 г.) и Г. С. Золотарева (1955 г.), однако следует отметить их избирательную применимость, определяемую геологическим строением берегов. Одним из наиболее перспективных методов прогноза этого процесса является метод Л. Б. Розовского (1962 г.), разработанный на основании теории геологического подобия.

При необходимости защиты берегов водохранилищ от переработки применяются специальные мероприятия, основные из которых приведены в табл. 59. В зависимости от направления их действия они разделяются на две группы.

Для оползневых склонов, подверженных переработке, в дополнение к мероприятиям, приведенным в табл. 59, используют фильтрующие подпорные стенки, контрбанкеты, дренажи, проводят мероприятия по уполаживанию надводной части склона, организации поверхностного стока, применяют и другие средства.

При проектировании водохранилищ инженерно-геологические исследования и изыскания проводятся в две стадии — для проектного задания и для составления рабочих чертежей. Им предшествует составление технико-экономического доклада (ТЭД) о схеме использования реки (внестадийное проектирование).

Изучение переработки берегов должно начинаться с момента составления схемы использования реки или ТЭДа и продолжаться на всех стадиях проектирования, а также в период сооружения плотины и в процессе эксплуатации водохранилища.

При составлении схемы использования реки или ТЭДа инженерно-геологические исследования береговых склонов долины реки производятся главным образом с помощью изучения литературных и фондовых материалов. На основании изучения этих материалов следует установить участки, которые могут повлиять на схему использования реки (оползневые, слабоустойчивые к размыву и т. п.). Иногда может появиться необходимость в небольших рекогносцировочных полевых инженерно-геологических исследованиях, а в особо ответственных случаях также в специальных инженерно-геологических исследованиях.

Для суждения о возможной величине подрезки склонов при ориентировочных прогнозах можно использовать метод аналогий и метод учета изменения условий и факторов устойчивости склонов до и после наполнения водохранилища.

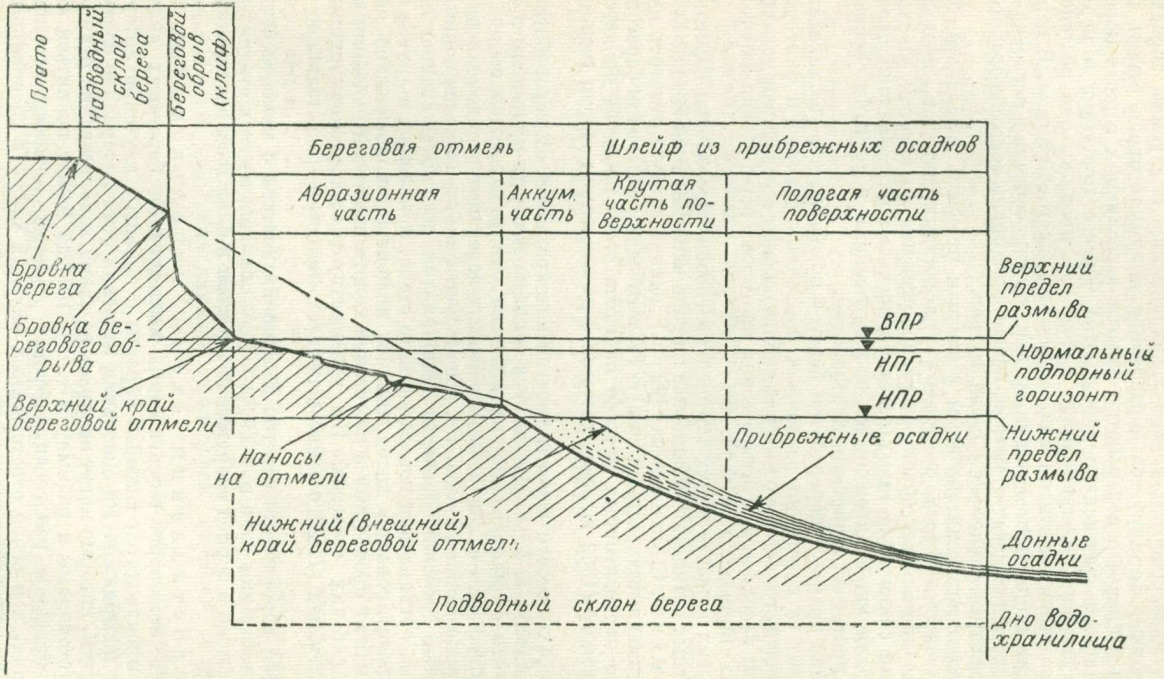


Рис. 49. Схема переработки берега (по Е. Г. Качугину)

Таблица 58

Основные условия и факторы переработки береговых склонов водохранилищ
(по Е. В. Трепетцову)

Условия — элементы среды	Факторы — движущие силы процесса
Морфология чаши водохранилища — форма зеркала, длина, ширина и глубина чаши, конфигурация береговой линии, высота и крутизна склонов — определяет возможности разгона волн, перемещения наносов, формирование отмелей	*Колебание уровенного режима водохранилища* определяет глубину вреза абразионной отмели, величину гидродинамического давления, попеременное смачивание и иссушение склонов; ускоряет выветривание пород
Геоморфологические условия долины определяют морфологию чаши водохранилища, характер распределения пород, современных геологических процессов и явлений по элементам долины	*Абразия, вызываемая ветровыми и судовыми волнами*, определяет размыв и подрезку основания склонов, формирование отмелей, пересыпей, перенос наносов
Геологическое строение и тектоника долины определяют состав, условия залегания, трещиноватость пород, их размываемость, гидрогеологические условия и характер современных геологических процессов и явлений на склонах	*Течения в верховой части водохранилища* и устьях притоков определяют боковой эрозионный врез, перенос наносов, формирование отмелей
Гидрогеологические условия долины и химизм вод влияют на обводненность пород, выщелачивание, суффозию, водный баланс водохранилища, развитие современных геологических процессов и явлений	*Ледоход* подрезает и выпахивает основание склонов, переносит крупные обломки осыпей и обвалов, отрывает и уносит смерзшиеся со льдом горные породы и деревья, удары масс льда при подвижках сотрясают берега
Физико-механические свойства горных пород, слагающих долину, определяют скорость выветривания, сопротивление размыву пород, способность к оползанию и другие их особенности	*Перемещение и аккумуляция* наносов трансформируют энергию волнения, формируют отмели, пересыпи и береговую линию
Температурный режим определяет скорость и характер выветривания, испарение, глубину промерзания, характер снежной эрозии и длительность ледового периода	*Колебание уровней подземных вод* вызывает гидродинамическое давление и суффозию при спаде зеркала водохранилища, способствует обводнению пород и заболачиванию склона, смачиванию поверхностей скольжения оползней и выщелачиванию пород
Режим атмосферных осадков влияет на уровенный режим водохранилища, режим поверхностного стока, подземных вод, обводненность пород склонов, размыв берегов, заиление водохранилища и впадающих в него балок и оврагов	*Насыщение пород талыми и ливневыми водами* снижает сопротивление пород сдвигу, увеличивает вес масс пород на склонах, способствует заболачиванию склонов
Ветровой режим определяет характер энергии волнения, накопления и таяния снежников на склонах, развевание пород	*Современные геологические процессы и явления*, способствующие переработке берегов: образование обвалов, оползней и отседа-

Условия — элементы среды	Факторы — движущие силы процесса
Гидрогеологический режим реки определяет уровенный режим и водный баланс водохранилища *Экспозиция склонов* сказывается на увлажнении склонов, степени устойчивости их и развитии снежной эрозии *Растительность в надводной части склонов* снижает силу ветра, а следовательно, энергию волнения, укрепляет склон корневой системой, но нарушает связность пород на склоне при раскачивании деревьев ветром *Водная растительность* играет роль волнолома и снижает энергию волн почти в два раза	ние склонов, линейная эрозия талых и ливневых вод, карстообразование, образование просадки в лёссовых породах, развитие лёссового и глиняного «карста», выветривание, снежная эрозия и солифлюкция, суффозия, дефляция, мерзлотные процессы и процессы, связанные с сезонным промерзанием, сейсмические явления *Деятельность человека* на береговых склонах, способствующая их переработке: подрезка склонов при сооружении дорожных выемок, котлованов, карьеров, нагрузка склонов инженерными сооружениями, отвалами, промачивание склонов при орошении, устройстве водоемов, сброс сточных промышленных и бытовых вод по склонам, уничтожение растительности на склонах, распашка склонов поперек горизонталей, выпас скота на склонах, взрывные работы на склонах

Таблица 59

Меры защиты берегов от переработки
(по Е. В. Трепетцову)

Направление мероприятий	Характер мероприятий
Укрепление береговых склонов	1. Каменная мостовая 2. Камень в плетеных ивовых корзинах 3. Габионы (камень в проволочных сетках) 4. Бетонные плиты 5. Асфальтовые покрытия 6. Фашинно-хворостяные покрытия 7. Лесомелиорация (посадка корнеотпрысковых растений) 8. Свайные стенки 9. Шпунтовые заборы 10. Мелиорация грунтов (цементация, силикатизация, обжиг и пр.)
Гашение энергии волнения	11. Защитные дамбы и волноломы 12. Посадка подводной растительности у берегов 13. Буны или шпоры 14. Намыв отмелей 15. Уполаживание подводного склона

На стадии проектного задания основными задачами инженерно-геологических исследований условий переработки береговых склонов являются:

1. Прогноз скорости переработки берегов на участках, важных в народнохозяйственном и характерных в инженерно-геологическом отношениях.

2. Оценка возможной переработки берегов с точки зрения угрозы для сохранности и нормальной работы расположенных на склонах различных сооружений, в целях обоснования их инженерной защиты или переноса.

3. Учет и типизация участков возможной активизации старых оползней на склонах долины реки и возникновения новых по берегам проектируемого водохранилища после его наполнения.

4. Освещение инженерно-геологических условий для размещения и выбора типа защитных мероприятий против переработки берегов.

5. Выбор «ключевых» береговых участков для наблюдений за их переработкой в процессе эксплуатации водохранилищ в целях своевременного предупреждения о разрушении берегов и корректирования первоначальных прогнозов. Выбор этих участков делается с учетом их важности в народнохозяйственном и научном отношении. Так же должны учитываться гидрологические особенности водохранилища.

Инженерно-геологические исследования на этой стадии изысканий производятся главным образом с помощью инженерно-геологической съемки берегов водохранилища в масштабе 1 : 200 000—1 : 25 000. В процессе съемки осуществляется типизация и районирование берегов, на характерных участках разбиваются поперечники, на которых показывается геологическое строение склонов. Поперечники в дальнейшем используются для прогноза переработки склонов. Особо должны быть учтены условия разрушения подошвы склона абразией. На «ключевых» участках проводятся детальные инженерно-геологические исследования с применением инженерно-геологической съемки масштаба 1 : 500—1 : 1000, буровых, горных, лабораторных и геофизических работ. Организуются также стационарные наблюдения.

Прогноз переработки берегов производится с помощью анализа истории развития долины с применением метода аналогий (Ф. П. Саваренский, 1935 г.). Там, где это возможно, прогноз подкрепляется расчетными методами. При выборе расчетного метода прогноза следует отдать предпочтение тому, который разработан с учетом природных условий, близких к прогнозируемым.

На стадии рабочих чертежей должны быть доработаны отдельные детали, характеризующие наиболее сложные участки. Необходимость дополнительных работ может возникнуть также в связи с освоением новых участков склонов, не предусмотренных проектным заданием, в результате изменения НПГ, принятия нового варианта плотины и т. д.

При доработке деталей на отдельных участках может потребоваться дополнительная проходка буровых скважин и шурфов, а также расширение лабораторных исследований и сети стационарных наблюдений.

При изменении НПГ или при освещении нового варианта водохранилища состав дополнительных инженерно-геологических исследований в каждом конкретном случае должен определяться особо.

В период строительства плотин на выбранных «ключевых» участках организуются наблюдения за поведением склонов до наполнения водохранилища и подготовка к проведению соответствующих наблюдений после наполнения водохранилища. Устанавливаются наблюдательные реперы и пьезометры, позволяющие следить за подвижками склонов и колебаниями уровня подземных вод, подготавливаются участки и створы для наблюдений за будущей переработкой берегов, гидрологическим режимом водохранилища, волнением, скоростями течения, переносом наносов и пр. Производится маршрутная аэрофотосъемка по периметру проектируемого водохранилища в масштабе 1 : 5000—1 : 10 000.

В период эксплуатации водохранилища на «ключевых» участках производятся наблюдения за переработкой берегов в целях: 1) своевременного предупреждения заинтересованных организаций о возможности разрушения расположенных на берегах промышленных и сельскохозяйственных объектов, а также о возможных изменениях фарватера; 2) изучения механизма переработки берегов в различных геологических и гидрогеологических условиях, уточнения первоначальных прогнозов и разработки новых; 3) изучения инженерно-геологических процессов, возникших под действием берегоукрепительных сооружений, выявления эффективности сооружений.

Эти работы носят характер стационарных наблюдений за условиями и факторами переработки берегов, они включают дежурное картирование отдельных этапов процесса на этих участках.

В целях изучения переработки берегов по всему периметру водохранилища сразу после его наполнения и далее через каждые 3—4 года рекомендуется повторно проводить маршрутную аэрофотосъемку береговой полосы в масштабе аэрофотосъемки, выполненной до наполнения водохранилища, и сравнение результатов съемки. Рекомендуются ежегодные объезды водохранилища для выявления новых разрушений берегов. Объезды делают весной вместе с работниками обсерватории или озерной станции, обслуживающей водохранилище. Программы работ должны быть увязаны с работами обсерватории или озерных станций, обслуживающих водохранилища, и с организациями, изучающими эффективность защитных мероприятий против развития переработки берегов.

2. БОЛОТА И ЗАБОЛОЧЕННЫЕ ЗЕМЛИ

Болотом называется избыточно увлажненный участок земной поверхности, прикрытый слоем торфа мощностью не менее 30 см — в неосушенном виде и не менее 20 см — в осушенном. Если мощность торфа измеряется вместе с «очесом» (моховым покровом), то указанная выше мощность неосушенного торфа должна быть увеличена до 60 см. Все прочие избыточно-увлажненные участки называются заболоченными землями.

Болота по своему происхождению разделяются на низинные, верховые, ключевые и пойменные. Низинные болота питаются в основном грунтовой и отчасти поверхностной водой, верховые — атмосферными осадками, переходные болота имеют смешанное питание.

Низинные болота образуются путем заторфовывания поверхностных водоемов или медленно текущих водотоков в результате развития у берегов болотной растительности.

Верховые болота возникают в результате разрастания сфагнового мха на заболоченных участках или на низинных болотах.

Ключевые болота образуются вблизи родников. Если они располагаются на средней или верхней частях склона, то называются висячими.

Пойменные болота формируются в результате заторфовывания заболоченных участков поймы.

Заболачивание тех или иных участков земной поверхности может происходить вследствие уменьшения водопроницаемости почвы или ухудшения условий испарения, поверхностного стока и дренажа. При прогнозе условий строительства на болоте особенно важно учитывать следующие природные факторы: генезис болота, его глубину и рельеф, геологическое строение дна, а также характер органического заполнения. Верховые болота подвергаются осушению легче, чем низовые.

По глубине, т. е. по мощности болотных отложений, болота разделяются на мелкие — при мощности до 2 м, средние — от 2 до 4 м и глубокие — более 4 м. По рельефу дна наиболее благоприятными для строительства являются болота с ровным дном, близким к горизонтальному, а неблагоприятными — болота со значительным уклоном дна, на котором при нагрузке может

произойти неравномерная осадка. Геологическое строение дна болота имеет особенно существенное значение при малой глубине, когда на породы дна передается значительная часть нагрузки поверхности болота.

Болотные отложения представлены главным образом торфом, который нередко подстилается озерным илом — сапропелем, или гиттией. Несущая способность торфа определяется его сжимаемостью, влагоемкостью, водопроницаемостью, а также сопротивлением сдвигу. Сжимаемость торфа настолько велика, что обычно требует устройства искусственных оснований для сооружений, кроме некоторых видов земляных сооружений. Величина сжатия торфа под сооружением зависит от его мощности и влажности, а также от величины нагрузки. Влагоемкость торфов значительно выше, чем у минеральных пород, водопроницаемость торфов того же порядка, что у суглинков и глин; ее величина находится в прямой зависимости от степени разложенности торфа и его ботанического состава.

Весьма высокой степенью разложенности (40—60%) характеризуется торф сосново-кустарникового и сосново-пушицевого состава, он нередко содержит сосновые пни и остатки стволов.

Сапропель по консистенции отличается от торфа несколько студенистым характером. При сжатии он упруг и не пачкает руки, а при высушивании существенно уменьшается в объеме, делается твердым, как кость, и не размокает в воде. На болотах с сапропелем обычным видом деформации торфяного основания является выпучивание торфяных бугров вследствие оттока сапропеля из-под основания.

3. СЕЛИ

С е л ь, или с и л ь, — термин, взятый из арабского языка и означающий горный быстронесущийся поток.

В современной литературе под термином с е л ь понимают к р а т к о в р е м е н н ы й горный поток с очень высоким (до 60—70% от общего объема) содержанием твердого материала, характеризующийся внезапностью возникновения, большими (метры в секунду) скоростями движения и обладающий значительной разрушительной силой. Селевым потокам свойствен пульсационный режим, связанный с заторным характером движения.

Для возникновения селей необходимо сочетание следующих природных условий: 1) крутосклонный сильно расчлененный рельеф, значительные (не менее 0,10) уклоны русел постоянных и временных водотоков; 2) наличие в бассейнах рек больших запасов рыхлообломочного материала, служащего источником твердой составляющей селевых потоков; 3) интенсивный русловой и склоновый сток, обусловленный выпадением ливней, бурным снеготаянием, реже — таянием ледников или прорывом открытых (горные озера плотинного типа) и закрытых (в ледниках и моренах) водоемов.

К числу природных факторов, способствующих активизации селей, относятся следующие.

А. Г е о л о г и ч е с к и е: 1) литолого-петрографический состав горных пород, определяющий их способность сопротивляться процессам денудации; 2) характер и интенсивность новейших тектонических движений, определяющих эрозионную активность горных рек и «энергию» рельефа; 3) сейсмичность, вызывающая нарушение устойчивости масс горных пород на склонах и активизацию склоновых процессов; 4) современные геологические процессы (оползни, осыпи, обвалы и др.).

Б. Г е о м о р ф о л о г и ч е с к и е: 1) характер и степень расчлененности рельефа, его динамика, возраст, морфологические особенности, обусловливающие специфику эрозионных и денудационных форм в различных высотных зонах; 2) наличие аккумулятивных форм (террас, конусов выноса и т. п.) — потенциальных источников питания твердого стока.

В. Гидрологические — характер гидрографической сети — веерообразное расположение притоков, наличие резких сужений и поворотов, ступенчатый продольный профиль и т. д.

Г. Почвенно-ботанические — характер почвенно-растительного покрова, влияющий на поверхностный сток и гранулометрию селевых выносов.

Д. Антропогенные — нерациональное хозяйственное освоение горных территорий, вырубка лесов, распашка горных склонов, неправильное ведение горных работ и т. п.

Селевые потоки в геологическом аспекте представляют одну из активных форм горной денудации и характерны для многих горных районов земного шара.

Общее количество селевых бассейнов в СССР, по данным ГУГМС на 1 января 1966 г., составляет 5022. Потенциально селеопасных бассейнов значительно больше.

Некоторые понятия и термины. Селевой бассейн — водосборный бассейн, в пределах которого формируются селевые потоки.

В элементарном селевом бассейне различают:

1 — зону питания или зарождения селевых потоков — часть бассейна, в которой располагаются основные очаги питания твердой и жидкой составляющих селей и происходит формирование селевого потока.

2 — зону транзита — часть бассейна, в которой происходит движение уже сформировавшегося селевого потока и его пополнение твердым материалом за счет глубинной и боковой эрозии.

3 — зону разгрузки — часть бассейна, в которой происходит затухание движения селевых потоков и аккумуляция селевых отложений в форме *конуса выноса*.

Эта классическая схема характерна не для всех селевых бассейнов. Известны случаи совмещения первых двух зон или частичного наложения одной зоны на другую.

Селевой очаг, или очаг формирования твердого стока, — часть селевого бассейна, с которой поступает рыхлообломочный материал в селевой поток.

Можно различать: *действующие* селевые очаги, в которых имеются следы участия рыхлообломочного материала в питании прошедших селей (гравитационные смещения на склонах, эрозионные врезы, прорывы плотин и т. п.), и *очаги потенциальные*, рыхлообломочный материал которых может быть источником твердого стока в результате подмыва берегов, активизации оползней, катастрофических прорывов запруд, вызванных экстремальными синоптическими условиями или сейсмической деятельностью.

Селеактивность — частота или повторяемость прохождения селей в данном бассейне.

Селеопасность — мощность (максимальные объемы и расходы) селей расчетной повторяемости.

Приведенная селеактивность или интенсивность селепроявлений — средний объем селевых выносов, приведенный к определенному периоду времени (10-летнему, 100-летнему и т. д.).

Классификации селевых бассейнов, селевых потоков и селевых очагов. В селевой литературе приводятся многочисленные классификации, подразделяющие селевые бассейны в зависимости от основных факторов, обусловливающих формирование, движение и неблагоприятные последствия селей.

Эти классификации не охватывают всей многофакторности селевого процесса и имеют ограниченное применение.

Для инженерно-геологических целей наиболее применимы классификации селевых бассейнов, составленные с учетом генетических условий селеобразования и комплексной оценки селеопасности (повторяемости селей, объемам выносов и причиняемому ущербу).

Н. Ф. Колотилин выделяет 5 категорий бассейнов различной степени селеопасности: 1) бассейны, отличающиеся активной селевой деятельностью и образующие сели катастрофического характера; 2) бассейны с затухающей селевой деятельностью; 3) бассейны с почти полным прекращением селевой деятельности: 4) бассейны, дающие выносы овражного типа; 5) бассейны, в которых возникают «сейсмические» оплывины, иногда громадной разрушительной силы.

Наиболее принятой для гидрологических расчетов является классификация *селевых потоков*, учитывающая их динамическую структуру в зависимости от насыщенности твердым материалом и фракционного состава селевой массы. По этой классификации выделяют два структурно-реологических (С. М. Флейшман, 1970 г.) типа селевых потоков: *связные*, где вода связана тонкодисперсными глинистыми и пылеватыми частицами и движение потока осуществляется в виде совместного гравитационного процесса, и *несвязные*, в которых вода является транспортирующей средой для переноса твердого материала, который в процессе движения (в зависимости от русловых условий) либо откладывается, либо выносится к конусу выноса.

По составу селевой массы различают: сели грязекаменные, грязевые и водокаменные.

По генезису жидкой составляющей выделяют: сели ливневого генезиса, снеготаяния, смешанного генезиса (снеготаяния в сочетании с ливневыми), гляциальные.

Отмечены случаи возникновения селей в результате разгрузки подземных вод.

В отдельную группу выделяют сели, образующиеся в *результате прорыва водоемов*, и сели *вулканогенные*, возникающие в результате катастрофического таяния снежного покрова и ледников на склонах вулканов при извержении последних.

При инженерно-геологических исследованиях особое внимание уделяется изучению *селевых очагов*.

Из существующих классификаций определенный интерес представляет генетическая классификация очагов зарождения селей, предложенная А. И. Шеко.

А. И. Шеко выделяет четыре группы очагов:

I. Очаги, связанные со скоплением рыхлого материала в руслах временных водотоков.

II. Очаги, связанные с подпруживанием рек; к ним относятся: А — современные завалы, Б — древние завалы и искусственные плотины.

III. Очаги, связанные с деятельностью современных ледников.

IV. Очаги, связанные с деятельностью вулканов.

Интересна генетическая классификация очагов питания селевого стока, разработанная Б. Н. Ивановым (Сб. «Инженерно-геологическое изучение селей», 1969) для горных районов Украины.

Он выделяет *денудационные*, *гравитационные* и *водно-аккумулятивные* типы очагов.

Основные характеристики селевых потоков. Для обоснования мероприятий по защите от селей необходимо иметь следующие основные показатели селевых потоков:

1) скорость движения селей; 2) плотность потока (его консистенция); 3) максимальные расходы и объемы селевых потоков; 4) структурно-реологический тип селя; 5) гранулометрические характеристики селевых выносов; 6) максимальный размер транспортируемых селем обломков; 7) глубина потока в рассматриваемом сечении.

Скорость движения — важнейший параметр, определяющий динамику селевого потока. Расчеты средних скоростей несвязных селей определяются по формуле М. Ф. Срибного:

$$V_{ср} = 6{,}5R^{2/3}I^{1/4}(1-P)^{1/2}$$

или в преобразованном виде (по И. И. Херхеулидзе):

$$V_{ср} = 4{,}25R^{2/3}I^{1/4};$$

$$V_{max} = 10{,}75H^{0{,}55}I^{0{,}33},$$

где R — гидравлический радиус потока;
H — глубина потока;
I — уклон русла;
P — весовая концентрация (содержание твердого материала в потоке в % по массе).

Для расчета средних скоростей связных селевых потоков М. А. Мостковым предложена формула

$$V_{ср} = K_c\sqrt{gH(I - I_t)},$$

где K_c — коэффициент сопротивления движения потока, зависящий от шероховатости;
g — ускорение силы тяжести;
H — глубина потока;
I — уклон русла;
I_t — остаточный уклон.

М. А. Мостков приводит значения K_c для разных зависимостей $l = \frac{d}{H}$, т. е. отношения среднего диаметра обломка к глубине потока:

K_c	l	K_c	l
7,10	0,025	1,94	0,20
4,85	0,050	1,32	0,30
3,20	0,100	0,95	0,40
		0,66	0,50

В полевых условиях определение максимальной скорости прошедших селей может производиться по наибольшему диаметру вынесенных селем крупных глыб по формуле

$$V_{ср} = 5\sqrt{d}.$$

Плотность потока, выражаемая его объемной массой γ_c, является показателем насыщенности потока твердым материалом и определяется по формуле

$$\gamma_c = \gamma_ж + S_c(\gamma_т - \gamma_ж) \text{ (по И. И. Херхеулидзе)},$$

где $\gamma_ж$ — объемная масса жидкой фазы селевого потока;
$\gamma_т$ — объемная масса твердой фазы;
S — мутность потока, определяемая отношением массы твердой фазы $P_т$ к объему всей селевой массы W_c.

Основными расчетными параметрами селей являются их расходы и объемы выносов.

При полевых исследованиях определение объема селевых выносов производится либо непосредственным измерением селевых выносов на всех участках аккумуляции, либо по формуле Д. Л. Соколовского:

$$W_н = 1000H\alpha\beta F \text{ (м}^3\text{)},$$

где H — слой осадков, вызвавший паводок, мм;
α — коэффициент стока, принимаемый для бассейнов: высокогорных — 0,50—0,70; среднегорных — 0,25—0,50; низкогорных — 0,10—0,25;
β — объемное содержание наносов в породе (в 1 м³ воды);
F — площадь водосбора, км².

Прогнозирование селей представляет сложную проблему в связи со сложностью их образования, внезапностью проявления и быстрым развитием во времени. Существуют два аспекта прогнозирования селей: прогнозирование селей в пространстве и прогнозирование селей во времени.

Первый аспект представляет собой региональную оценку селеопасности данной территории, которая решается с помощью специального инженерно-геологического картирования и анализа основных (геологических, геоморфологических и гидрометеорологических) факторов формирования селей.

Второй — представляет собой количественное выражение условий, при которых возможно возникновение селевых потоков либо возможность возникновения селя резко возрастает.

Для прогнозирования селей существуют следующие методы: г и д р о м е т е о р о л о г и ч е с к и е, основанные на оценке возможных критических объемов осадков и стока.

Для селей ливневого генезиса: наиболее селеопасными признаками являются: 1) синоптическая ситуация, определяющая температуру и осадки; 2) предварительная увлажненность пород бассейна или, предшествующий селеопасному, засушливый период, обусловливающий сильное прогревание и растрескивание почвы; 3) перекрытие зоной выпадения максимальных осадков значительных площадей со снежным покровом.

Для селей смешанного генезиса (сочетание ливней и весеннего снеготаяния) селеопасным признаком считается возможность совпадения максимальной водоотдачи при таянии снега (при устойчивой высокой температуре воздуха) с интенсивными ливнями.

Для гляциальных селей основными показателями селеопасности служат интенсивная абляция при большой ее площади, устойчивость положительных температур, увеличение мутности подморенных ручьев.

И н ж е н е р н о - г е о л о г и ч е с к и е, основанные на проведении крупномасштабных съемок селевых бассейнов, детального и стационарного изучения селевых очагов, наблюдения за скоростью выветривания и накопления рыхлообломочных пород, за режимом влажности пород, изучение критических условий, устойчивости пород на склонах селевых бассейнов и в селевых очагах.

Г е о б о т а н и ч е с к и е, основанные на индикационной геоботанике или на анализе флористического состава растительности в зоне селевых отложений.

Различают: д е н д р о х р о н о л о г и ч е с к и й метод датировок селей по отложениям годичных колец древесины, основанный на морфологическом изучении деревьев, затронутых селевыми потоками, и л и х е н о м е т р и ч е с к и й, основанный на стабильности годового прироста лишайников, растущих на обломочном материале селевых отложений.

Противоселевые мероприятия. Сели приносят большой ущерб народному хозяйству горных районов. Борьба с селями и защита от них различных народнохозяйственных объектов может быть успешной лишь при осуществлении комплекса мероприятий: 1) организационно-хозяйственных; 2) лесомелиоративных и агротехнических и 3) инженерных (гидротехнических).

К о р г а н и з а ц и о н н о - х о з я й с т в е н н ы м относятся мероприятия, обеспечивающие регулирование склонового стока и служба предупреждения селеопасности (установки РОСов — радиооповестителей селя системы Димаксяна и др.).

Л е с о м е л и о р а т и в н ы е м е р о п р и я т и я — облесение склонов, лесоразведение в руслах и на конусах выноса.

Агромелиоративные мероприятия, как и организационно-хозяйственные, направлены на предотвращение формирования селей, на уменьшение и ослабление селеактивности.

Г и д р о т е х н и ч е с к и е с о о р у ж е н и я осуществляются в руслах селевых бассейнов и направлены на их укрепление и стабилизацию, их инженерное регулирование и непосредственную защиту тех или иных объектов от

селей. Среди них различают сооружения: 1) селезадерживающие — барражи (запруды), селеуловители, наносозадерживающие дамбы; 2) селепропускные (однопролетные мосты, селеспуски, быстротоки); 3) селенаправляющие или регуляционные (валы, стенки, отводные каналы); 4) руслоукрепительные (полузапруды, сипаи, габионы).

III. ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С ДЕЙСТВИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

1. КАРСТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Слово «карст» происходит от одноименного названия известкового плато в провинции Каринтия на юге Австрии. Из многочисленных определений понятия карста как процесса, предложенных различными исследователями, наиболее удачны определения, данные Ф. П. Саваренским и И. В. Поповым.

Ф. П. Саваренский под карстом понимал явления, связанные с деятельностью подземных вод, выражающиеся в выщелачивании горных пород (известняков, доломитов, гипса) и образовании пустот (каналов, пещер в породе), сопровождающихся часто провалами и оседаниями кровли и образованием воронок, озер и других впадин на земной поверхности.

И. В. Попов под карстом понимал «совокупность геологических процессов и созданных ими явлений в земной коре и на ее поверхности, вызванных химическим растворением горных пород и выраженных в образовании в земной коре пустот, в разрушении и изменении структуры и состояния пород, в создании особого характерного рельефа местности и режима гидрографической сети».

Важнейшей задачей инженерно-геологических исследований в карстовых районах является изучение условий формирования карста, его современного состояния и скорости дальнейшего развития с целью выявления участков, на которых процессы карста не вызывают и не будут вызывать существенных затруднений при строительстве или представлять опасность для сооружения во время его эксплуатации. Необходимо также выяснить возможность применения противокарстовых мероприятий и определить их характер для построенных или проектируемых сооружений.

Термин «карст» в применении к самим пустотам, возникшим путем растворения пород подземными водами, в настоящее время можно считать вышедшим из употребления, он заменен терминами: «карстовые формы», «карстовые пустоты», «пещеры» и т. д. Употребление слова «карст» во множественном числе («карсты») не рекомендовано решением Пермской карстовой конференции (1947 г.)

Таблица 60

Типовая классификация карста
(по А. Е. Голову и др.)

Группа карста	Тип карста	Подтип карста
I. В труднорастворимых породах	1. Карбонатный	а) Известняковый б) Доломитовый в) Меловой г) В кластических породах с карбонатным цементом
	2. Сульфатный (гипсовый)	
	3. Сульфатно-карбонатный	
II. В легкорастворимых породах	4. Соляной (выщелачивание соли)	

Типовая классификация карста по литологическому составу закарстованных пород приведена в табл. 60.

Признается неправильным также применение термина «карст» к явлениям и процессам, которые не являются результатом растворения пород и выноса из них вещества в растворенном виде. Неправильными следует считать и имеющие некоторое распространение термины: «глиняный карст», «лёссовый карст», «термокарст» и др., относящиеся к явлениям, лишь внешне сходным с карстом. Первые два термина относятся к явлениям, вызванным главным образом суффозией, механическим выносом вещества из породы (хотя растворение вещества и имеет некоторое значение). Термокарст является результатом таяния ледяных включений (смена фаз воды) в рыхлых горных породах под влиянием теплового воздействия.

ТИПИЗАЦИЯ ВАЖНЕЙШИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАЛЕГАНИЯ КАРСТУЮЩИХСЯ ПОРОД И ПРОЯВЛЕНИЙ КАРСТА

А. По отношению к земной поверхности.

1. Открытый карст: карстующиеся породы лежат непосредственно на поверхности.

2. Скрытый карст: а) карстующиеся породы перекрываются слоями нерастворимых водонепроницаемых пород; б) карстующиеся породы перекрываются слоями нерастворимых водопроницаемых пород.

Б. По отношению к уровню подземных вод.

1. Карстующиеся породы залегают в зоне аэрации.

2. Карстующиеся породы залегают в зоне постоянного водонасыщения.

3. Карстующиеся породы залегают в зонах аэрации и постоянного водонасыщения.

ГЛАВНЕЙШИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ КАРСТА

1. Исчезающие ручьи и реки.
2. Участки с частичной потерей воды в реках.
3. Локальные продольные депрессии.
4. Крупные карстовые источники.
5. Очаги разгрузки карстовых вод в руслах рек и озер.
6. Субмаринные источники.
7. Карстовые озера: а) поверхностного питания; б) подземного питания; в) смешанного питания.
8. Подземные реки.
9. Подземные озера.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЗАКАРСТОВАННОСТИ И СКОРОСТЬ РАЗВИТИЯ КАРСТА

Существует несколько методов приближенной оценки закарстованности пород и территорий.

1. Широко распространено определение закарстованности территорий путем подсчета количества воронок, карстовых озер, суходолов и других характерных проявлений карста, приходящихся на единицу площади. Подсчет ведется по отдельным участкам различного геологического строения и разной тектонической структуры или по различным геоморфологическим элементам (поймы, террасы, склоны и т. д.). Более точно закарстованность территории

определяется отношением суммарной площади карстопроявлений к площади распространения закарстованных пород.

2. Другим методом может быть определение объема пустот, который при естественной сработке уровня водоносного горизонта и при шахтном водоотливе равен объему вытекающей воды. В результате такой региональной оценки закарстованности, по расчетам, основанным на изучении баланса и режима подземных вод, О. Б. Скиргелло определил, что коэффициент закарстованности пород одного из районов Южного Урала равен 7%. Этот метод пригоден для определения степени трещиноватости и закарстованности лишь верхних частей толщ, для которых удается рассчитать баланс подземных вод.

3. Региональными методами определения степени закарстованности пород являются геофизические методы — сейсморазведка и электроразведка.

4. Определение трещиноватости и закарстованности пород часто проводится по замерам трещин и пустот в обнажениях и карьерах, в стенках горных выработок, в кернах скважин и в шлифах путем подсчета суммарной длины или площади этих трещин (в процентах), отнесенной к площади или объему пород, вскрытых горными выработками. При достаточно большом количестве замеров трещин можно охарактеризовать глубину и площадь развития карста, а также степень закарстованности пород и дать оценку закарстованности территории.

Малый выход керна при бурении в закарстованных породах связан с наличием не только закарстованных трещин или открытых полостей, но и зон закарстованных пород с разрушенной структурой. В разрезах скважин эти зоны характеризуют степень разрушенности пород как отношение суммарной мощности пород с разрушенной структурой к мощности пород всего разреза закарстованных пород.

Пористость кавернозных пород нередко измеряется десятками процентов, а на границе разрушения (при переходе в карбонатный песок, доломитовую муку и т. п.) она может возрастать до 30—35%.

5. Используются также результаты опытных работ и наблюдений за режимом подземных вод (откачки, наливы, нагнетания и др.) с определением величин коэффициента фильтрации, удельного водопоглощения и других важнейших характеристик. Опробование буровых скважин с определением фильтрационных свойств пород, проведенное через некоторые интервалы глубин, дает наиболее точные результаты по характеристике степени закарстованности растворимых пород.

6. Потеря промывочных вод при бурении также указывает на наличие в закарстованных породах поглощающих полостей, чередующихся с зонами разрушенных или монолитных пород.

7. В некоторых речных долинах, где имеются закарстованные участки, поглощающие речные воды, степень закарстованности можно установить по разности расходов реки до входа в пределы закарстованной территории и по выходе из нее. В ряде случаев речной поток, входя в закарстованные участки, полностью поглощается, поэтому проведение таких замеров возможно лишь во время паводков, когда в русле имеется непрерывный поток воды.

Для оценки скорости развития карста применяется показатель современной активности карстового процесса. Скорость развития карста выражается отношением (в процентах) объема растворенной породы, выносимой подземными водами из карстового массива, к общему объему карстующихся пород за определенный отрезок времени (обычно принимается за тысячелетие).

Показатель современной активности карстового процесса выражается формулой:

$$A = \frac{v}{V} \cdot 100,$$

где v — объем растворенной породы, выносимой подземными водами карстового массива;

V — общий объем карстующихся пород.

СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ КАРСТА (ПО Н. В. РОДИОНОВУ)

1. Эрозионный карст приурочен к современным и древним речным долинам и балкам. Активность процесса тесно связана с мощностью и амплитудой сезонных и вековых колебаний современного или древнего речного потока, а также с колебаниями уровня подземных вод прибрежной зоны, т. е. с величиной и активностью водообмена в пределах всех элементов речной долины (русло, террасы, коренные склоны).

Наибольшее развитие карстовый процесс получает в прирусловой части под влиянием поверхностных вод, а также на участках долин, где подземные воды испытывают максимальные сезонные колебания. С выполаживанием кривой подпора подземных вод в сторону водораздела постепенно уменьшается активность водообмена, агрессивность воды и затухают карстовые процессы. Глубина зоны активного развития карста этого типа обычно несколько ниже базиса эрозии и в схеме (несколько шире) повторяет контуры долины.

Основными формами карста являются воронки, провалы, пещеры, концентрирующиеся в речной долине — в прирусловой ее части, в пойме, на террасах, реже на склонах и в присклоновой части водоразделов. Закономерности их распределения, помимо первичной системы диагенетических трещин, в значительной мере определяются наличием специфической системы трещин скола (бортового отпора), развивающейся в породах склона при врезании русла реки в условиях перераспределения напряжений в склоне.

2. Карст водораздельных (междуречных) пространств развивается вдоль трещин первичной отдельности и выветривания, он выражается главным образом в растворении породы и расширении этих трещин. На широких водоразделах, в зоне отсутствия влияния поверхностных водотоков и замедленного движения грунтовых вод активного образования воронок и провалов может и не происходить.

Глубина активной зоны определяется глубиной зоны движения агрессивных подземных вод. Вследствие слабого водообмена активность процесса обычно невелика. При относительно узких водоразделах, представляющих собой области активного водообмена в зоне двух смежных речных потоков, карст может развиваться весьма активно.

3. Карст тектонических поднятий возникает при наличии системы тектонических трещин. Поэтому закономерности в распределении форм проявлений древнего и современного карста в значительной мере подчинены распределению тектонической трещиноватости.

4. Карст зон тектонических разломов носит линейный характер, обусловленный наличием нарушений и трещиноватой зоны растворимых пород, примыкающих к ним. Распространение карстовых форм также морфологически не связано с какими-либо элементами рельефа, а обусловлено исключительно направлением зоны разлома и геологическим строением участка.

5. Эрозионно-тектонический карст наблюдается в речных долинах, прорезающих зону тектонических поднятий. В этом случае на распределение карстовых форм влияет не только первичная диагенетическая трещиноватость, но и тектоническая трещиноватость, а также трещины скола. В современных условиях карстовые явления в таких районах приурочены к зоне активного водообмена, т. е. к речной долине, и по своему характеру трудно отличимы от карста эрозионного типа.

6. Карст древних тектонических опусканий (погружений) наблюдается в виде карстовых пустот и каверн до глубины 2000 м от поверхности. По мнению Ф. П. Саваренского, это так называемый подземный (затопленный, погребенный, пассивный) карст.

7. Приконтактный карст распространяется вдоль контакта растворимых и нерастворимых пород.

8. Антропогеновый карст, современная активность которого вызвана нарушением условий залегания и изменениями естественного режима вод и пород в широком региональном масштабе. К этому типу относятся участки крупных разработок солей, бокситов и других полезных ископаемых, залегающих в закарстованных породах и добываемых с помощью искусственного выщелачивания, или участки с резким изменением гидродинамического режима подземных вод вследствие водоотлива, а также зоны крупных водохранилищ.

РАЙОНИРОВАНИЕ ЗАКАРСТОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

По структурно-тектоническому принципу территории развития карста разделяются на карстовые области и карстовые районы, с соответствующими названиями. Выделяются карстовые области платформ, предгорных краевых прогибов и горноскладчатых территорий.

Карст платформенных областей тесно связан с эрозионными процессами и медленными изменениями главнейших базисов эрозии, обусловленными вековыми тектоническими колебаниями как положительными, так и отрицательными. В платформенных областях карст приурочен главным образом к речным долинам и к отдельным структурам. По мере изменения базиса эрозии меняется и уровень подземных вод, в связи с чем карстовые зоны образуются на различной глубине от поверхности.

Для карстовых областей платформ наиболее характерно наличие нескольких «этажей» карста, связанных главным образом с континентальными этапами развития территории.

Современная активность карста платформенных областей определяется составом пород и их закарстованностью в предшествующие эпохи карста, растворяющей способностью вод, их количеством, а также глубиной вреза и скоростью движения подземных и поверхностных вод. Современная активность карста подчинена горизонтальной климатической зональности (зоны многолетней мерзлоты, избыточного и умеренного увлажнения, аридная зона).

В горноскладчатых карстовых областях для развития карста характерны процессы интенсивного тектонического поднятия с непрерывно нарастающим эрозионным расчленением. Наряду с процессами растворения большую роль в горных областях играет размыв растворимых пород. Здесь наблюдается приуроченность карстовых явлений к зонам тектонической нарушенности растворимых пород и к определенным элементам тектонических структур — замкам антиклинальных складок, зонам тектонических разломов и т. п. В горных областях количество осадков в 2—3 раза больше, чем на платформах, это также является причиной более высокой активности карста в горных областях по сравнению с платформенными.

В высокогорных областях наблюдается вертикальная климатическая зональность карста, осложненная наличием современных ледников (многолетнемерзлые породы и дополнительное питание водоносных горизонтов водами тающих ледников).

Карстовые области предгорных краевых прогибов в зависимости от их строения занимают промежуточное положение между описанными выше областями, но в большей своей части сходны с карстовыми областями платформ. Для этих областей характерно наличие карста на глубине от нескольких метров до 1—2 км в зависимости от глубины погружения пород в различные эпохи развития карста в зоне краевого прогиба.

Мощность зоны аэрации и гидрогеологические условия района тесно связаны с направленностью и скоростью тектонических движений. На платформах, за исключением зон локальных тектонических поднятий, зона аэрации не превосходит несколько десятков метров, в горноскладчатых областях мощность ее достигает тысячи метров и более, в областях же погружения эта зона может вообще отсутствовать (затопленные карстовые зоны) или иметь различную величину.

Карстовые районы выделяются по принадлежности их к тем или иным крупным тектоническим структурам или к их частям, к структурам низших порядков и к группам мелких структур.

По обнаженности карстующихся толщ и характеру покровных образований выделяется шесть основных типов карста.

КАРТЫ ЗАКАРСТОВАННЫХ ПОРОД И КАРСТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Главнейшей задачей методики составления и содержания обзорных карт является отражение на них основных условий развития карста. На картах показывается распространение растворимых закарстованных пород различного литологического состава и разного геологического возраста. Выделяются территории безводных, полностью обводненных и частично обводненных закарстованных пород, соответствующие зонам аэрации, активного и затрудненного водообмена.

В комплекс карстовых форм, отраженных на картах, входят карстовые воронки, котловины, пещеры, крупные полости, исчезающие реки, карстовые озера, карстовые родники, а также современные воронки и провалы, о времени образования которых имеются достаточно достоверные данные. Показываются и древние (дочетвертичные) карстопроявления, вскрытые эрозией или скважинами. Возраст древних карстопроявлений (допалеогеновый, доюрский, додевонский и т. д.) приближенно фиксируется возрастом отложений, выполняющих карстовые пустоты и неровности древнего карстового рельефа. На рис. 50 приведена схема распространения карста на территории СССР. На рис. 51 в качестве примера дана схема выделения карстовых районов.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КАРСТА (ПО Д. С. СОКОЛОВУ)

1. Снижение закарстованности массива с глубиной, что обусловлено: а) снижением с глубиной трещинной водопроницаемости; б) уменьшением с глубиной скоростей движения подземных вод и в) снижением с глубиной растворяющей способности подземных вод.

2. Усиление интенсивности процесса карстообразования вблизи речных долин—дрен и соответственно повышенная закарстованность придолинных участков по сравнению с ядрами водораздельных массивов. Главными причинами этой закономерности являются: 1) повышенная трещинная водопроницаемость в придолинных участках; 2) увеличение скорости движения карстовых вод вблизи долин—дрен как и их бортах, так и на дне; 3) проникновение в карстующийся массив пресных речных вод и смешивание их с карстовыми водами, что происходит главным образом во время речных паводков в области подруслового потока зоны полного насыщения и в прибрежных участках зоны сезонных колебаний уровня карстовых вод.

3. Теснейшая связь развития карста с климатом, а карбонатного карста также с растительностью (как продуктом климата). По мере перехода от зон с сухим климатом и слабо развитым растительным покровом к зонам влажного субтропического и тропического климата с пышным растительным покровом и круглогодичным вегетационным периодом интенсивность развития карста, в особенности карбонатного, в целом возрастает.

От климата и, в частности, от количества осадков зависит (наряду с другими факторами) активность водообмена в верхних гидродинамических зонах, то или иное выражение сезонной неравномерности развития карста. От климата зависит также режим карстовых вод верхних гидродинамических зон, в частности мощность зоны сезонных колебаний уровня карстовых вод.

С климатом связаны характер растительного покрова и продолжительность вегетационного периода, от которых зависит углекислотный режим карстовых

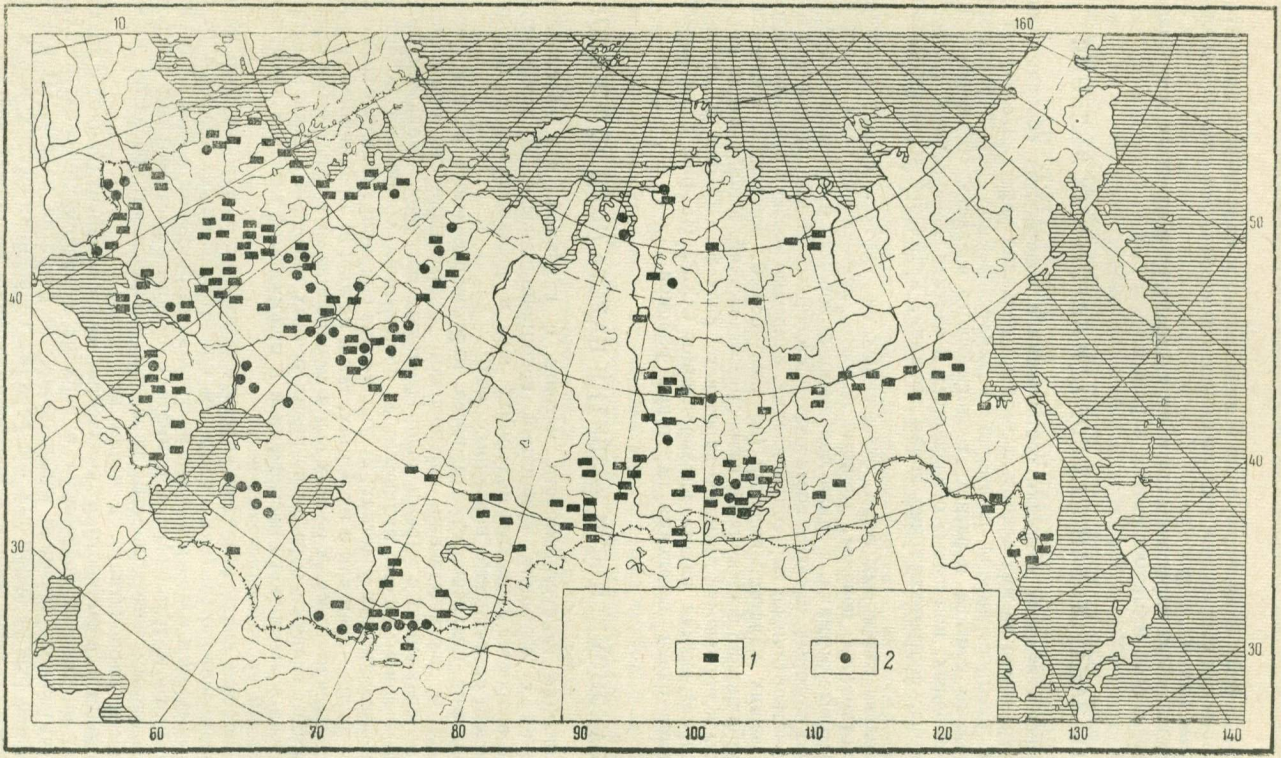


Рис. 50. Схематическая карта карстопроявлений на территории СССР (по Пармузину).

Районы развития карста: *1* — преимущественно известнякового, доломитового и мелового; *2* — преимущественно гипсового и соляного

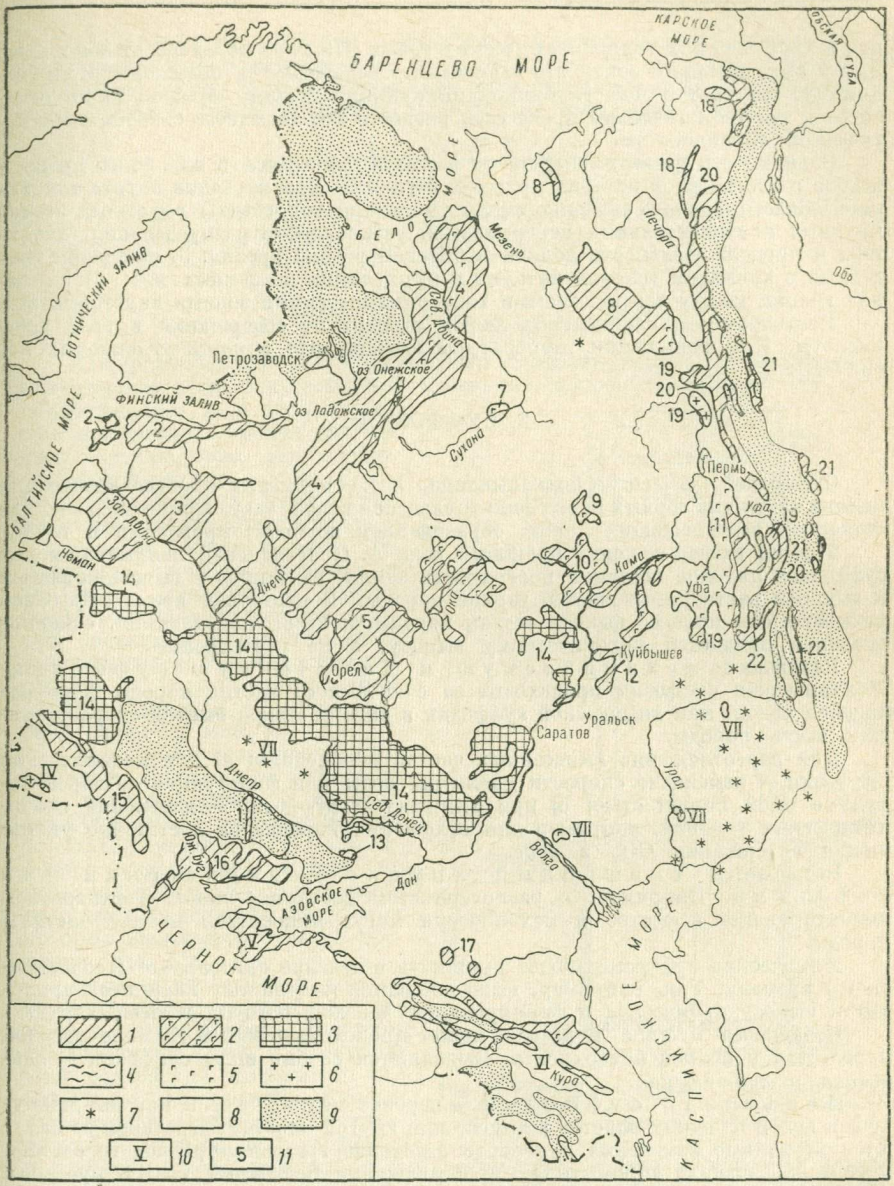


Рис. 51. Схема карстовых областей и районов европейской части СССР, Урала и Кавказа

Закарстованные породы: *1* — известняки, доломиты, мраморы и др.; *2* — сульфатно-карбонатные породы; *3* — мел, мергельно-меловые породы; *4* — карбонатный флиш; *5* — гипсы, ангидриты; *6* — соли; *7* — соляные купола.

Некарстующиеся породы: *8* — осадочные; *9* — изверженные, метаморфические и вулканогенные; *10* — карстовые области; *11* — карстовые районы

вод в трех верхних гидродинамических зонах. По мере перехода от зоны аэрации к нижележащим зонам эта зависимость ослабевает и практически, по-видимому, затухает в зоне глубинной циркуляции. Таким образом, карст относится к тем геологическим процессам, развитие которых тесно связано с климатической зональностью.

Зависимость развития карста от климата отмечается и для более древних этапов геологической истории крупных регионов. При изучении карста той или иной области большое значение имеют следующие вопросы: 1) выделение этапов крупных континентальных перерывов; 2) установление распределения, характера и продолжительности донной и боковой речной эрозии; 3) изменение связанных с климатом условий питания и циркуляции подземных вод; 4) смещение границ между вертикальными гидродинамическими зонами карстовых вод.

Растворимость карбонатных пород зависит от содержания в воде углекислоты. При повышении температуры кальцитовая емкость углекислых вод снижается.

2. СУФФОЗИЯ

Суффозией (*suffosio* — подкапывание, лат.) называют процесс вымывания мелких частиц из горных пород фильтрующейся водой, часто сопровождающийся оседанием вышележащих пород, образованием воронок, провалами и т. п.

Термин введен в конце прошлого века А. П. Павловым, понимавшим под суффозией явление оседания поверхности земли, связанное с выщелачиванием и выносом растворимых частей горной породы. В настоящее время суффозией называют сам процесс выноса частиц породы, а не его последствия, основное значение придается механическому выносу, а не растворению.

Различают механическую и химическую суффозию. Механическая суффозия происходит за счет выноса частиц породы фильтрующейся водой, при химической суффозии в виде раствора выносится растворимая часть породы.

Для переотложения вынесенных частиц необходимо: а) при механической суффозии — изменение скорости движения воды или фильтрация ее через породу с иной пористостью; б) при химической суффозии — изменение гидрохимических условий, например для отложения карбонатов достаточно уменьшения содержания CO_2 в воде.

Встречается смешанный химико-механический тип суффозии. Например, в разнозернистом песчанике может растворяться цементирующее вещество и механически могут выноситься мелкие частицы породы.

Химическая суффозия может протекать в течение длительного (геологического) времени. Так, например, выщелачивание железистых кварцитов приводит к выносу кремнезема и формированию залежей богатых железных руд.

Независимо от типа, суффозия может происходить как в глубине массива пород, так и вблизи поверхности. Выделяются особые виды суффозии — *подземная и контактная*.

Подземная суффозия — перенос мелких частиц породы движущейся водой из одних пластов в другие или внутри пласта. Следствием ее являются вторичные изменения и перераспределение гранулометрического состава пород, образование «промытых» путей движения подземных вод, в пределах которых коэффициенты фильтрации значительно выше, чем в породах, не затронутых подземной суффозией.

Контактная суффозия — один из видов подземной суффозии, при которой на контакте двух пород мелкие частицы одной породы потоком воды разносятся по порам другой. В связи с контактной суффозией вдоль контакта иногда создается слой породы, имеющий измененный гранулометрический состав и иные свойства.

В случаях, когда суффозия происходит на контакте мелкозернистого и крупнозернистого однородных песков, для определения скорости фильтрации, отвечающей началу выноса частиц (при условии движения воды от мелкозернистой породы к крупнозернистой), С. В. Избаш предложил формулу

$$V_b = V_0 + f\left(\frac{d^2}{D^2}\right) \text{ см/с},$$

где V_0 — скорость, при которой преодолевается вес частицы;
D и d — диаметры частиц породы разных слоев.

Л. И. Козлова уточнила эту формулу:

$$V_b = 0{,}26d^2\left[1 + 1000\left(\frac{d_{60}}{D_{60}}\right)^2\right] \text{ см/с}.$$

Как механическая, так и химическая суффозии активно проявляются при естественном или искусственном изменении гидродинамических условий — формировании воронок депрессии, колебаниях уровня подземных, поверхностных вод, откачках, дренировании и т. п. В откосах строительных выемок суффозионный вынос пород приводит к оседанию блоков породы, образованию провалов, воронок и оползней. Например в районе Волгограда широко развиты оползни, связанные с суффозионным выносом песка. На Соколовском карьере в начале эксплуатации суффозия вызвала оползень объемом около 0,5 млн. м³.

Для выявления пород, способных к суффозии, в Лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР (1955) разработан прибор КГС-2 системы В. Н. Славянова, позволяющий в полевых условиях определять критические градиенты и давление воды, при которых начинается процесс суффозии (рис. 52).

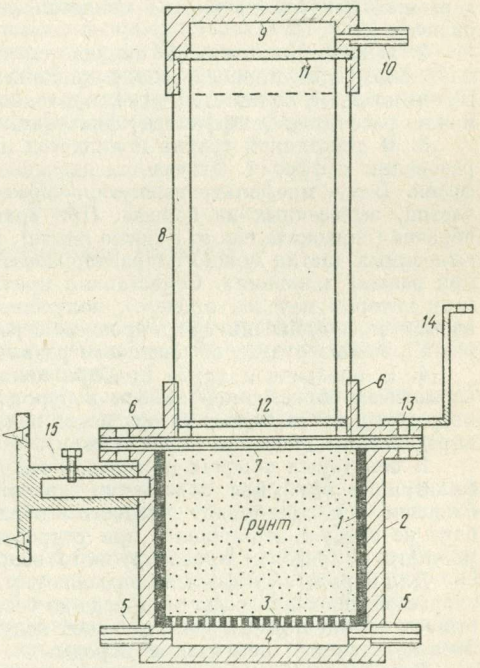


Рис. 52. Прибор для изучения суффозии и плывунов ЛГГП системы В. Н. Славянова (с поперечным круговым сечением)

Образец исследуемой породы в тонкостенном кольце *1* вкладывают в корпус прибора *2* на перфорированный диск *3*, отделяющий водораспределительную камеру *4* от загрузочной. Камера закрывается крышкой *6* с прозрачной пластмассовой трубой *8* и колпаком *9*, защищающим от разбрызгивания. Между корпусом *2* и крышкой *6* ставят резиновую прокладку *7*, в которую вдавлено на 1—2 мм режущее кольцо с грунтом для того, чтобы вода не могла просочиться между ним и корпусом прибора. Прокладки *11* и *12* имеются в местах свинчивания прозрачной пластмассовой трубы с крышкой прибора и колпаком.

Прибор имеет три штуцера — два из них (*5*) в водораспределительной камере и один (*10*) в колпаке. Крышка привинчивается болтами. Для этого имеется шесть отверстий *13* в корпусе и в крышке прибора. К одному из

отверстий крепится держатель *14* манометра. В водораспределительную камеру *4* через штуцер *5* подают воду до полного заполнения и капиллярного смачивания образца (медленно без давления). После этого постепенно повышается давление в водораспределительной камере. К противоположному штуцеру присоединяют манометр.

В экспедиционных условиях повышать давление воды можно при помощи передаточной емкости, создавая давление на воду через воздух, нагнетаемый обычным насосом (например, автомобильным). При испытании пород, теряющих устойчивость при малых давлениях воды, можно изменять давление путем простого поднятия сосуда, из которого вода по трубке поступает в прибор. При этом манометром может служить стеклянная трубка со шкалой высоты напора.

Прибор крепится на стене на шарнире *15*, что позволяет проводить опыты с фильтрацией воды под любым углом к вертикали.

При исследовании различных песчано-глинистых пород можно ожидать различные результаты опыта.

1. Вода не фильтруется и образец в кольце сохраняет свою форму при создаваемых давлениях; порода является устойчивым водоупором при данных давлениях.

2. В стеклянной трубке появляется чистая вода, образец в кольце сохраняет свою форму; порода водопроницаема и при данных давлениях устойчива. Путем подсчета количества воды, проходящей через прибор в единицу времени, можно рассчитать коэффициент фильтрации породы.

3. В стеклянной трубке появляется мутная вода — порода способна к образованию суффозии. Отмечается давление воды, при котором начинается суффозия. Воду, профильтровавшуюся через образец, собирают для исследования частиц, вынесенных из породы. При сравнении гранулометрического состава образца (первоначального и после опыта), а также гранулометрического состава выносимых частиц можно охарактеризовать процесс суффозии в данной породе при разных давлениях. Сопоставляя критическое гидродинамическое давление (при котором начался процесс), полученное при опыте, с величинами тех давлений, которые возникнут в процессе строительства и при эксплуатации сооружений, можно судить об опасности развития суффозии.

4. В прозрачной трубе прибора появляется выдавленный грунт (процесс аналогичен образованию пробок в буровых скважинах). Результат опыта непосредственно указывает на опасность появления плывуна в данной породе при определенном давлении (критическом).

В некоторых породах при малом гидродинамическом давлении происходит фильтрация воды, при повышении давления начинается суффозия, а при еще большем — порода теряет связность и образуется плывун. Поэтому опыт в приборе не следует заканчивать при гидродинамическом давлении, меньшем возможного в пределах проектируемого сооружения.

Для борьбы с суффозией применяются: 1) осушение породы или уменьшение скоростей движения воды по породе до безопасных величин; 2) перекрытие мест выноса частиц породы, фильтрующей воду (например, путем присыпки песка); 3) искусственная цементация породы.

При значительном растворении породы химическая суффозия переходит в карст. При массовом выносе частиц породы механическая суффозия вызывает подземный или внутренний размыв (образование ниш и каналов размыва, карнизов оплывания и т. д.) и образование «глинистого карста».

В лёссовидных породах фильтрация воды начинается по ходам землероев и по вертикальной скважности, затем вода промывает себе горизонтальные пути (часто над водоупором). При падении струи или при быстром течении около препятствий образуются завихрения, порода размывается и возникают подземные пустоты сложной формы (котлы, чаши размыва).

При борьбе с глинистым карстом следует забивать отверстия, через которые проникает вода с поверхности земли, или заливать в них цементирующие вещества.

3. ПЛЫВУННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПЕСКАХ

Плывунностью называется способность водонасыщенных дисперсных пород переходить в текучее состояние. Разжиженная порода, образующаяся при этом, называется плывуном.

В плывунное состояние могут переходить пески различного гранулометрического состава, даже крупнозернистые. Наиболее опасен этот процесс для тонкозернистых песков с пылеватыми, илистыми, коллоидными и органическими фракциями, обладающими тиксотропными свойствами.

Песчаные породы, обладающие ярко выраженными тиксотропными свойствами, могут образовать (по А. Ф. Лебедеву) истинный, или активный, плывун. Л. К. Танкаева эту группу пород с конденсационно-коагуляционными структурными связями делит на: а) песчано-коллоидные плывуны; б) пылевато-коллоидные плывуны; в) плывунные глины.

Породы, лишенные структурных связей, могут под влиянием гидродинамического давления перейти в текучее состояние. Такое движение породы называется, по А. Ф. Лебедеву, псевдоплывуном, или пассивным плывуном.

Переход в плывунное состояние псевдоплывунов объясняется потерей внутреннего трения и взвешиванием частиц в воде. Характерными показателями псевдоплывунов являются гидравлический градиент, при котором порода переходит в плывун (критический градиент), и критическая пористость. Для псевдоплывунов критический градиент может быть определен по формуле

$$I_к = \frac{\nu - 1}{1 + \varepsilon},$$

где $I_к$ — критический градиент возникновения плывуна;
ν — плотность породы;
ε — коэффициент пористости.

При заполнении порового пространства песков тонкодисперсным минеральным и органическим веществом резко уменьшается водопроницаемость пород и облегчается их переход в текучее состояние.

Тиксотропные* структуры полностью обратимы при сохранении влажной среды. Прочность восстановленных структур постоянна, независимо от количества разжижений. Время восстановления тиксотропных структур может колебаться от 10—15 минут до суток (И. М. Горькова).

Коллоиды плывунов могут содержать: а) живую органику (бактерии); б) мертвую органику (продукты разложения органических веществ); в) неорганические коллоиды.

Наиболее подвижны плывуны с живой бактериальной органикой. В. В. Радина доказала, что бактерии могут «заразить» неплывунный песок (волжский аллювий) и превратить его в истинный плывун. При этом наблюдается массовая гибель бактерий, когда в законсервированных истинных плывунах (через 3—5 лет после консервации) возникает скачкообразное оседание песка с образованием слоя воды над ним (В. Н. Славянов). Аналогичный процесс возникает при отравлении бактерий. Тиксотропные свойства породы при этом резко снижаются.

При разжижении связи между частицами породы, по которым передается напряженное состояние, нарушаются и частицы.

Основными причинами разжижения песчаных пород являются: 1) вибрация скелета пород; 2) волновые колебания грунтовых вод; 3) гидравлические удары; 4) фильтрационные силы; 5) воздействие динамических нагрузок; 6) изменение статических напряжений, деформирующее породу, и др.

---

* Тиксотропия — самопроизвольное восстановление структуры дисперсных систем после ее разрушения (переход золя в гель) при постоянной влажности.

Наиболее часто в разжиженное состояние переходят пески с критической пористостью (А. Казагранде). Определение критической пористости производится на сдвиговых приборах методами М. Н. Гольдштейна, В. В. Радиной, Н. Н. Сидорова и др.

И. М. Горькова отмечает, что тиксотропия характерна только для высокодисперсных слабоуплотненных осадков со структурами коагуляционного или пластифицированно-коагуляционного типа. Формирование таких структур происходит при сравнительно высокой минерализации жидкой фазы и оптимальном соотношении одновалентных и двухвалентных катионов, обеспечивающих мозаичное строение адсорбционных поверхностей глинистых минералов. Тиксотропные свойства могут проявляться в песках и суглинках, если эти породы содержат достаточное количество коллоидов, обладающих высокой структурообразующей способностью.

Тиксотропное структурообразование зависит от: а) количества и состава высокодисперсных частиц; б) от формы и строения частиц (особенно глинистых минералов); в) состава, состояния и активности органического вещества; г) минерализации поровых растворов; д) состава обменных катионов и ряда других факторов. Например, у монтмориллонитовых глинистых частиц тиксотропные свойства выражены сильнее, чем у каолинитовых.

Особым видом являются зыбучие пески морских побережий. Они периодически разжижаются под воздействием волновых колебаний воды при определенной высоте прилива. Критические градиенты возникновения плывуна определяются в приборе КГС-2.

При испытании заполнение породы водой должно производиться со скоростью, не превышающей скорости капиллярного поднятия воды в данной породе. Сопоставление критических градиентов возникновения плывуна с реально возможными градиентами, возникающими при строительстве, позволяет оценить опасность возникновения плывуна под влиянием гидродинамических сил.

IV. ПРОЦЕССЫ РАЗВЕВАНИЯ И ВЫВЕТРИВАНИЯ

1. ЭОЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ — РАЗВЕВАНИЕ И ПЕРЕВЕВАНИЕ ПЕСКОВ

Эоловые процессы характерны для песчаных пустынь и обнаженных склонов, в менее заметной форме они протекают в пределах выветрелой зоны многих пород, между корнями растений, вдоль грунтовых дорог и в местах земляных работ. Интенсивность эоловых процессов зависит от ряда условий: 1) гранулометрического состава пород; 2) их связности; 3) наличия защитного покрова; 4) силы и режима обвевания ветром.

По данным Н. А. Соколова, для смещения песчаных частиц различного диаметра необходимы следующие скорости ветра:

Скорость ветра, м/с более:	Диаметр несцементированных частиц, мм
4,5	0,25
6,7	0,50
7,8	1,0
11,4	1,5

Эоловые процессы, действующие самостоятельно или во взаимодействии с другими геологическими процессами, переносят значительные количества мелкозернистых пород на большие расстояния. Примером комплексного переноса пород может быть формирование лёссовидных пород Степного Крыма. По рекам и оврагам во время паводков выносится большое количество мелких частиц пород, которые оседают в долинах рек. Незадернованные отложения развеваются и переотлагаются по всему Степному Крыму. При раскопках кур-

ганов эоловые наслоения лёссовидных пород позволили определить, что слой годового отложения достигает 1—5 мм. По данным Л. С. Берга, в 1927 г., в Пекине за одну ночь количество осевшей пыли превысило 43 т на 1 км².

На крутых склонах, особенно на останцах пород, в связи с различным сопротивлением пород развеванию образуются структурные формы развевания — «свидетели», эоловые пещеры, структурные террасы и холмы развевания, эоловые карнизы и т. д. В пустынях и на площадях, покрытых песками, создаются своеобразные формы: барханы, гряды, дюны, кучевые и бугристые пески.

Эоловые отложения имеют повышенную пористость, которая, по Н. Н. Маслову, достигает 50%.

Фактором защиты от развевания является формирование «пустынного загара», при котором рыхлые породы цементируются защитной коркой, состоящей из окислов железа, марганца или солей. В некоторых пустынях мощность такой корки достигает нескольких дециметров. На северном борту Лебединского карьера КМА песчаные откосы, покрытые такой коркой толщиной до 0,5 см, сохранялись длительное время. Для определения интенсивности эолового разрушения склонов используются эоловые трубчатые реперы (рис. 53).

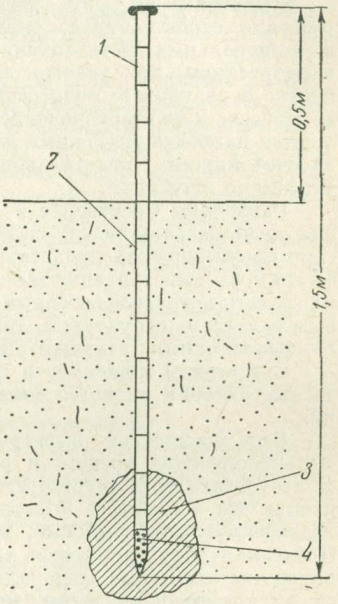


Рис. 53. Эоловый трубчатый репер системы В. Н. Славянова

1 — вступающая часть репера (0,5 м); *2* — забитая часть репера (1 м); *3*—заостренный перфоритовый конец репера (0,1 м); *4* — якорь репера — зацементированный участок песка

Для борьбы с эоловыми процессами применяют: 1) поверхностное закрепление пород растительностью (фитомелиорация) и цементирующими веществами; 2) защиту от ветра щитами, циновками из камыша и других материалов, пескоуловителями и т. д.; 3) создание безаккумуляционных форм сооружений.

Растения для закрепления песков выбирают в зависимости от климатических условий, высотных отметок и влажности пород. В безводных и засоленных породах применение фитомелиорации не всегда возможно.

Поверхностное закрепление песков производится путем перемешивания поверхностного слоя породы с торфом, глиной и вяжущими веществами; применяется также опрыскивание битумом, цементным молоком, растворами полимеров.

В Средней Азии для закрепления песков успешно применяется опрыскивание поверхности водным раствором полиакриламида; метод разработан Ленинградским институтом галургии. При этом способе скрепляются места соприкосновения отдельных песчинок и создается водо- и воздухопроницаемый слой, защищающий песок от развевания, но способствующий развитию растительности. До опрыскивания полиакриламидом рекомендуется засеять обрабатываемый участок семенами защитных трав.

Защита от ветра щитами, циновками, заборами и тому подобными устройствами протекает наиболее успешно при использовании законов аэродинамики. Щиты следует располагать таким образом, чтобы создавались завихрения воздуха, отстраняющие ветер от опасных мест.

А. И. Знаменским разработан метод «безаккумулятивного переноса песков», основанный на том, что сооружениям, в основном дорожным покрытиям, ирригационным каналам или специальным «отсечным» полосам вдоль них, придают

соответствующие формы, при которых на сооружениях не задерживаются песок и снег. Породы, образующие само сооружение, а также защитные полосы, расположенные вдоль него, с поверхности закрепляют.

2. ВЫВЕТРИВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Выветривание — это экзогенный геологический процесс физического разрушения горных пород, химических и кристаллохимических преобразований их минеральных составляющих под воздействием внешних геосфер (атсмосферы и гидросферы) при участии живых организмов и продуктов их жизнедеятельности. В результате процессов выветривания формируется кора выветривания в разрезе, характеризующаяся зональным строением. Верхние зоны ее отличаются наиболее глубокими изменениями материнских пород. Они развиваются за счет нижних (подстилающих) зон, степень выветрелости пород в которых угасает с глубиной.

Различают физическое и химическое выветривание *. Оба типа выветривания тесно связаны между собой; они действуют совместно и протекают при участии биохимических процессов. Интенсивность процессов выветривания и «профиль» коры выветривания зависят от многих факторов, но в основном определяются геолого-петрографическими особенностями самих горных пород (их минеральным составом, структурой, текстурой и трещиноватостью) и местными физико-географическими (главным образом климатическими) условиями.

Следствием зависимости процессов и продуктов выветривания от климатических условий является физико-географическая зональность коры выветривания.

При физическом выветривании происходит раскрытие петрогенетических и тектонических трещин и развитие новых трещин — трещин выветривания. В результате формируется зона первичного расчленения породы по трещинам, раскрытым в процессе выветривания, а затем зоны более дробной физической дезинтеграции — глыбовые, щебенистые или грубообломочные и дресвяные. Последняя характеризуется частичным или полным распадом обломков горных пород на отдельные минеральные зерна — дресву, а в дальнейшем распадом самих минеральных зерен, происходящим чаще всего по направлениям спайности.

Физическое выветривание происходит под воздействием объемных напряжений, возникающих в толще горных пород, находящихся в переменном температурном режиме — в поясе суточных сезонных и отчасти годовых колебаний температуры (температурное выветривание), а также при образовании кристаллов льда (морозное выветривание), кристаллогидратов и некоторых других кристаллоструктурных преобразованиях, сопровождающихся объемными деформациями минералов. Физическое выветривание в форме десквамации (шелушение) горных пород на обнаженных поверхностях обусловлено суточными и в меньшей степени сезонными колебаниями температур и влажности пород. Физической дезинтеграции пород способствует развитие корневой системы растений и деятельность роющих животных.

Суммарная мощность всех зон физической дезинтеграции горных пород чаще всего варьирует от 1 до 10 м и возрастает с усилением континентальности климата.

Следствием физического выветривания является прогрессивный рост удельной поверхности частиц твердой фазы горных пород и в силу этого удельных поверхностей межфазных взаимодействий. Такова предпосылка развития и активизации химического выветривания пород.

---

* Выделяется также особый, подводный тип выветривания горных пород (гальмиролиз). Образование монтмориллонитовых глин за счет вулканического пепла на дне морей может служить примером данного типа выветривания.

Химическое выветривание включает в себя процессы окисления, растворения, гидратации и гидролиза, т. е. взаимодействия минерального вещества горных пород с химически активными компонентами атмосферы и гидросферы. Химическое выветривание протекает при участии живых организмов (главным образом бактерий, водорослей, грибков, лишайников, а также высших растений и животных) и под воздействием продуктов их жизнедеятельности. Вода, являясь высокодинамичным, энергоемким и химически активным компонентом горных пород, относится к числу самых мощных агентов химического выветривания. Все процессы химического выветривания протекают при участии и присутствии воды.

О к и с л е н и е. Инфильтрационная вода и воды зоны активного водообмена, обогащенные кислородом и углекислым газом атмосферы, обладают высокой окисляющей и растворяющей способностью. С глубиной подземные воды расходуют свободный кислород и поэтому ниже так называемой кислородной поверхности процессы окисления становятся невозможными. Мощность зоны окисления, располагающейся выше кислородной поверхности, различна и возрастает с «энергией рельефа». В горных областях она достигает 1000 м.

Окислению подвержены многие сульфидные и закисные соединения железа и других металлов. Окислением сопровождается гидролитическое разложение железо-магнезиальных силикатов.

Р а с т в о р е н и е. Практически все минералы в той или иной степени растворимы в воде. По степени растворимости выделяются следующие группы минералов (табл. 61).

Таблица 61

Группы минералов по степени растворимости

Степень растворимости	Границы степени растворимости	Примеры минералов (в порядке понижения растворимости)
Высокая	$> 10^{-1}$	Мирабиллит, галит, сильвин
Средняя	10^{-1}—10^{-4}	Гипс, шеелит, магнезит, флюорит, кальцит, арагонит
Слабая	10^{-4}—10^{-8}	Барит, гидраргиллит, пирротин
Очень слабая	$< 10^{-8}$	Пирит, галенит, кварц, силикаты

Растворяющая способность воды возрастает с повышением температуры по отношению к большинству минералов. Увеличение давления повышает растворимость карбонатов, но не сказывается существенно на растворимости ряда других минералов (например, галита). Значительное влияние на растворимость минералов оказывает состав растворителя (наличие и концентрация других растворенных веществ, величина pH).

Отмечается повышение растворимости минералов при напряжениях, приближающихся к разрушающим.

Г и д р а т а ц и я — явление поглощения минералами воды, приводящее к образованию кристаллогидратов, цеолитов и гидрогелей. К особому виду

поглощения воды относится осмотическое впитывание воды высокодисперсными минеральными системами — глинами.

Гидролиз. Гидролитическое разложение свойственно силикатам и алюмосиликатам. Оно носит многостадийный характер. Так, при гидролизе полевые шпаты вначале превращаются в промежуточные слабоустойчивые минералы (гидрослюды), которые в дальнейшем распадаются на каолинит, опал и растворенные в воде карбонаты и бикарбонаты. В жарких, но влажных климатических условиях наблюдается последующее разложение каолинита на гидроокислы алюминия и кремния. С образованием промежуточных глинистых минералов (монтмориллонита, бейделлита и др.) протекает гидролиз также железомагнезиальных силикатов. Из конечных продуктов гидролитического разложения силикатов в тропических зонах формируется кора выветривания латеритного типа. Для продуктов химического выветривания характерен пелитоморфный облик (пелитовая структура и глинистый состав). На них развивается почвенный покров, в формировании которого решающую роль играют биохимические процессы.

Интенсивность химического выветривания зависит от: 1) климатических и тесно связанных с ними биохимических условий и 2) геолого-петрографической природы самих горных пород.

В тропических и субтропических условиях химическое выветривание протекает в 2—4 раза интенсивнее, чем в сухих и холодных областях. Кора выветривания в данных условиях представлена исключительно продуктами химического и биохимического выветривания. В полярных и приполярных поясах следы химического выветривания обнаруживаются только в самой верхней части коры выветривания, представленной зонами физической дезинтеграции горных пород. В умеренно влажных и теплых климатических условиях за счет дресвяной зоны физического выветривания получает развитие пелитоморфная зона химического выветривания и почвенный слой.

Процессы выветривания вообще и химического в частности протекают наиболее интенсивно в толщах горных пород, находящихся на начальных и средних ступенях регионального метаморфизма и особенно в условиях регрессивного метаморфизма. Процессы гипергенеза в коре выветривания являются по сути дела естественным развитием регрессивного метаморфизма.

Существенно способствуют процессам выветривания кливажная трещиноватость и ориентированные текстуры, а также повышенное содержание минералов слоистой и ленточной структуры и минералов с ясно выраженной спайностью вообще.

Так, каолинизация полевых шпатов в метаморфических породах (например, в гнейсах и гранито-гнейсах) начинается вдоль плоскостей гнейсования и сланцеватости, скрытой (кливажной) трещиноватости и пронизывает сами минеральные зерна вдоль плоскостей спайности. С макротрещиноватостью связано появление каймы выветривания отдельностей, глыб и щебня, а также глинистых примазок на их контактах.

Стойкость магматических пород против агентов выветривания выше, чем метаморфических. Среди них более высокой стойкостью, как правило, отличаются эффузивные породы и мелко-тонкозернистые разности интрузивных пород массивного сложения. При прочих равных условиях стойкость магматических пород снижается с их основностью и по мере повышения степени раскристаллизованности и пустотности (трещиноватости и пористости). Осадочные породы наиболее чувствительны к воздействию воды (высокая растворимость галогенидов и карбонатных пород, размягчаемость глинистых пород). С повышением содержания инертных по отношению к воде минеральных компонентов (главным образом кварца и его модификаций) и упрочнением структурных связей стойкость осадочных пород возрастает. Она достигает максимальных значений в песчаниках с кремнистой цементацией.

Количественной характеристикой стойкости горных пород против агентов выветривания может служить (по П. Н. Панюкову) показатель изменчивости

некоторых физических параметров (например, временного сопротивления сжатию) за единицу времени — один год.

$$K_{\text{В}} = \frac{\sigma_{\text{сж}_1} - \sigma_{\text{сж}_2}}{\sigma_{\text{сж}_1}},$$

где $K_{\text{В}}$ — коэффициент выветриваемости;

$\sigma_{\text{сж1}}$ — временное сопротивление сжатию пород в начальном невыветрелом состоянии;

$\sigma_{\text{сж2}}$ — временное сопротивление сжатию той же породы после годичного цикла воздействия агентов выветривания.

$K_{\text{В}}$ является показателем, характеризующим скорость изменения данного физического параметра за данный отрезок времени. Известный интерес представляет та же характеристика изменчивости $K_{\text{В}}$ с глубиной, по мере перехода из поверхностной зоны во все более и более глубинные зоны коры выветривания, т. е.

$$K_{\text{В}} = f(h),$$

где h — глубина отбора проб для определения величины $K_{\text{В}}$.

Мощность кор выветривания зависит от многих факторов, но в основном определяется: 1) глубиной проникновения факторов выветривания; 2) общей продолжительностью периода формирования коры выветривания и 3) скоростью развития процессов выветривания, т. е. $K_{\text{В}}$.

Положение нижней границы физического выветривания определяется мощностью пояса переменных температур и влажности горных пород. Поэтому мощность зон физической дезинтеграции пород, как правило, не превышает 10—15 м и зависит при прочих равных условиях от континентальности климата. Агенты химического выветривания проникают на значительно большие глубины, измеряемые в современных и верхнечетвертичных корах выветривания первыми десятками метров. В древних корах выветривания, формирование которых протекало на протяжении целых геологических или даже нескольких геологических эпох, мощность коры химического выветривания нередко измеряется сотнями метров.

Представление о скорости развития коры химического выветривания можно получить по продолжительности формирования почвенного слоя. По современным данным, на формирование слоя почвы в 2—3 см требуется столетие. Поскольку скорость процессов выветривания снижается с глубиной, эту величину следует признать за максимально возможное значение скорости формирования и древних кор выветривания. Однако в зонах активного водо-, газо- и теплообмена (выше регионального и особенно местного базиса дренирования подземных вод) следует ожидать значительного ускорения процессов химического выветривания.

Различают два типа кор выветривания — площадной и линейный. Последний приурочивается большей частью к зонам тектонического дробления. Мощность древних кор выветривания достигает максимального для данного района значений на отрицательных элементах рельефа почвы. На положительных приподнятых площадях кора выветривания обычно полностью денудирована.

При инженерно-геологических исследованиях процессов выветривания выясняются: 1) мощность и зональность коры выветривания; 2) геолого-петрографические особенности и физико-механические свойства пород по зонам выветривания; 3) скорость выветривания ($K_{\text{В}}$) пород при вскрытиях их в искусственных и естественных обнажениях; 4) изменения интенсивности и характера процессов выветривания в зависимости от местных геологических, геоморфологических и гидрогеологических условий.

Данные исследования процессов выветривания используются при определении: 1) участков, благоприятных для размещения сооружений; 2) зоны съема

выветрелых пород под основаниями сооружений и земляных масс отвалов и терриконов; 3) степени устойчивости выветрелых пород на склонах и откосах искусственных выемок; 4) сроков допустимого открытого стояния обнажений в легковыветриваемых породах; 5) характера защитных средств, обеспечивающих устойчивость откосов.

Основными методами изучения процессов и явлений выветривания горных пород служат визувиальные наблюдения в естественных и искусственных обнажениях и лабораторные исследования пород. Скорость выветривания пород изучается на специальных разрезах и расчистках, с различной экспозицией по странам света и по отношению к направлению господствующих ветров. Изучение скорости выветривания обычно сочетается с поисками способов защиты от него.

Для борьбы с выветриванием применяются различные способы, среди которых получили применение следующие: 1) устройство защитных покрытий из песка, суглинка и дресвяных материалов и синтетических пленок; 2) пропитывание пород жидким стеклом, гудроном и эпоксидными смолами; 3) искусственная нейтрализация некоторых агентов выветривания путем введения в породу солей, уменьшающих растворимость пород; 4) планировка территорий, осушение породного массива и отвод поверхностных вод.

3. ТРЕЩИНОВАТОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Степень и характер трещиноватости горных пород в массиве определяют в общем случае решение ряда важнейших задач инженерной геологии, а именно оценки: 1) деформируемости и устойчивости массива; 2) водопроницаемости; 3) блочности; 4) разрабатываемости; 5) горного давления.

Ни одна из этих задач не может быть решена без учета данных по трещиноватости.

Трещины в горных породах могут различаться по геометрии, морфологии и генезису.

Множество трещин, совместно развитых в той или иной части массива, образуют пространственную сеть (или решетку) трещиноватости. Сеть трещин может быть охарактеризована набором параметров трещиноватости, описывающих различные простейшие свойства сети трещин в конкретных геологических условиях. По геометрическим особенностям М. В. Рац и С. Н. Чернышев выделяют три основных типа сетей трещин: 1) системные; 2) хаотические и 3) полигональные *. Наибольшее практическое значение имеют системные сети.

Системой трещин называется множество трещин, примерно параллельных друг другу. Системная сеть, как правило, образуется не менее чем тремя системами трещин, каждая из которых может быть охарактеризована следующими основными параметрами: 1) азимут падения плоскостей трещин ($\alpha°$); 2) их угол падения ($\beta°$); 3) расстояние между соседними трещинами (a); 4) ширина (раскрытие) трещин (δ); 5) протяженность следов трещин в плоскости обнажения (l м).

Традиционные геометрические классификации трещин позволяют расчленить множество различно ориентированных в пространстве систем трещин на характерные группы. Геометрическая классификация может осуществляться по одному параметру (например, по углу падения: вертикальные трещины с углами падения 72—90°, крутые — 45—72°, пологие — 6—45°, горизонтальные — 0—6°) или по двум параметрам (например, по величине углов пересечения трещин со слоистостью и осью складки и т. п.).

---

* Другие типы сетей (например называемые структуры конского хвоста) встречаются очень редко.

Морфологическим типом трещин называется множество трещин, обладающих сходным обликом. Морфологический тип может включать несколько различно ориентированных систем трещин, реже одна система может включать трещины разных морфологических типов.

Генетическим типом трещин называется множество трещин, сформировавшихся под действием одних и тех же геологических причин. Генетический тип трещин по объему может совпадать с морфологическим. Различают 3 основных генетических типа трещин: 1) литогенетические; 2) тектонические и 3) экзогенные.

Литогенетические трещины подразделяются по условиям их образования на глубинные и поверхностные. К глубинным относятся контракционные трещины в интрузиях, диастромы (трещины «напластования») и так называемые «общие» трещины в осадочных породах.

Характерной особенностью глубинных литогенетических трещин является взаимная ортогональность их систем. В отличие от них поверхностные литогенетические трещины (остывания в эффузивах и усыхания в осадочных породах) чаще образуют полигональную 5—6-угольную отдельность. По механическому типу все литогенетические трещины относятся к трещинам отрыва.

Тектонические трещины могут быть разделены по приуроченности к складчатым структурам или разрывам и по механическому типу на трещины отрыва и трещины скалывания. Согласно данным большинства исследователей, трещины отрыва характеризуются неровными, шероховатыми стенками и значительной шириной. В отличие от них трещины скалывания часто сомкнуты и несут на стенках следы скольжения (борозды, штрихи, зеркала скольжения). К тектоническим трещинам скалывания условно может быть отнесена группа трещин кливажа, характеризующихся очень большой густотой и региональным развитием в некоторых районах.

Экзогенные трещины делятся на две основные группы: естественных и искусственных трещин, сформировавшихся в результате инженерной деятельности человека. Естественные экзогенные трещины включают трещины выветривания, разгрузки (в частности, трещины «бортового отпора»), трещины, связанные с просадочными явлениями и оползнями. Искусственные экзогенные трещины объединяют два основных вида трещин: трещины разгрузки вблизи карьеров и строительных котлованов и трещины взрывов.

Распределение в плане и в разрезе трещин различного происхождения подчинено различным факторам: а) распределение литогенетических трещин формируется литологическими особенностями массива: мощность и состав слоев определяют густоту и раскрытие трещин, от состава пород зависит также их ориентировка; б) распределение тектонических трещин определяется структурно-тектоническими особенностями строения участка, но литологический фактор все же играет существенную роль, в особенности применительно к трещинам отрыва и кливажу. Состав пород заметно влияет на густоту и ориентировку этих трещин; в) распределение экзогенных трещин контролируется прежде всего экзогенными факторами, но тектонический и литологический факторы и в этом случае играют немаловажную роль. Известно, например, что различные породы в разной степени устойчивы по отношению к выветриванию, что интенсивное избирательное выветривание (с образованием экзогенных трещин) приурочивается к тектоническим зонам, слабым прослоям и т. д.

По степени трещиноватости горные породы условно могут быть разделены на ряд классов по величине объемной трещинной пустотности и блочности. Классы обозначаются индексами: А-1, А-2, Б-1, Б-2 и т. д. Буква в индексе класса соответствует определенному интервалу значений пустотности, а цифра — определенному интервалу значений блочности.

Основой инженерно-геологического изучения трещиноватости является геологическая документация обнажений, горных выработок и керна скважин со специальными измерениями параметров сети трещин. Наряду с этим полезные дополнительные сведения о трещиноватости могут дать геофизические методы,

специальная интерпретация фотоснимков, геоморфологических особенностей района и т. д.

Для выявления систем трещин по результатам замеров горным компасом строят круговые диаграммы на сетках Вальтера-Шмидта или Каврайского. Ввиду значительной трудоемкости аналитической обработки диаграмм на практике обычно ограничиваются графической обработкой замеров.

Замеры индивидуальных трещин производятся раздельно по типам и системам, т. е. сначала замеряются параметры одной системы данного морфологического типа трещин, затем другой системы того же типа и, покончив с одним типом трещин, переходят к другому.

Замеры индивидуальных трещин данной системы производятся в следующем порядке. Сначала замеряется ориентировка трещин. Когда число замеров будет достаточным и ориентировка системы очевидна, переходят к замерам остальных параметров с помощью металлического метра или стальной линейки с миллиметровыми делениями. Расстояние между соседними трещинами и их ширина замеряются подряд — для всех трещин данной системы, выходящих на поверхность обнажения, начиная от произвольной точки: ширина первой трещины, расстояние между первой и второй; ширина второй трещины, расстояние между второй и третьей и т. д. Протяженность трещин измеряется либо параллельно с замерами ширины, либо отдельно, по окончании замеров ширины и густоты.

Следует особо подчеркнуть, что замеры расстояний между соседними трещинами желательно производить по перпендикуляру к плоскостям трещин, чтобы избежать введения тригонометрических поправок или влияния экспозиции обнажения на результаты замеров.

Число замеров густоты и ширины трещин может колебаться от 30 до 50. Максимальное число замеров не должно превосходить 50—60 на систему. Снижение числа замеров ниже 25—30 отрицательно влияет на надежность результативных данных, а повышение сильно затрудняет камеральную обработку.

Текущая камеральная обработка состоит в вычислении средних и среднеквадратических отклонений значений параметров трещиноватости по каждому типу и системе трещин для каждого обнажения в отдельности по формулам:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{i} a_i}{n}, \tag{115}$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\Sigma (a_i - \bar{a})^2}{n-1}} \tag{116}$$

В приведенных формулах:

a_i — единичные замеры параметров;

n — число замеров.

Принципы обобщения параметров трещиноватости по площади определяются геологическими условиями района. Прежде всего выделяется фон трещиноватости, характерный для данной геологической формации. Затем производится обобщение параметров ориентировки и параллельно районирование территории с выделением участков, обладающих единообразной пространственной сетью трещин (одинаковой геометрией систем). Для каждого такого участка составляется сводная диаграмма трещиноватости.

Следующий этап состоит в обобщении количественных характеристик трещиноватости с параллельным делением на участки, обладающие устойчивой густотой трещин. Для каждого такого участка составляется таблица осредненных параметров. При этом следует учитывать, что априорное осреднение может впоследствии привести к ошибкам в расчетах. Так, априорное осреднение значений ширины трещин существенно занижает оценки водопроницаемости.

В таких случаях (при нелинейных расчетных схемах) расчет надлежит производить по материалам индивидуальных измерений, осредняя результаты расчетов.

При документации горных работ основной задачей исследования должно явиться изучение закономерностей сужения трещин в глубь массива, изменения в характере и состоянии заполнителя. Необходимо учитывать, что трещины сужаются в глубь массива по разным законам, поэтому необходимо раздельное изучение трещин по типам и системам.

При изучении трещиноватости по скважинам следует фиксировать углы падения трещин, число трещин на 1 пог. м керна и характер заполнения. Большую пользу может принести также исследование стенок скважин с помощью фотобурскопа.

Весьма ценными косвенными признаками, позволяющими оценивать относительную трещиноватость пород, являются скорость чистого бурения, размер столбиков и процент выхода керна. Статистическое исследование этих признаков совместно с непосредственными наблюдениями трещиноватости и данными геофизической разведки (сейсмоакустические методы, электрокаротаж, вертикальное электрическое зондирование) позволяют получить достаточно точное для практических целей представление о трещиноватости пород, вскрытых скважиной.

Трещинная пустотность массива может быть оценена по формуле

$$П = \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\overline{a_i} + \overline{\delta_i}} \cdot 100\%, \qquad (117)$$

где $\overline{a_i}$ и δ_i — средние значения ширины и расстояния между соседними трещинами по каждой из систем, совместно развитых в данном массиве.

Величину трещинной пустотности П не следует смешивать с «коэффициентом трещинной пустотности». При хаотическом расположении трещин в массиве они связаны примерным соотношением

$$П \approx 1{,}5K_{тр}.$$

4. ЗОНЫ И ПОВЕРХНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ В МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Деформации в массивах горных пород происходят по линиям наименьшего сопротивления. Ими являются зоны и поверхности ослабления различных типов (табл. 62), включая описанные в предыдущем параграфе различные виды трещиноватости.

Вдоль зон и поверхностей ослабления часто развиваются геохимические и гидрохимические процессы, резко меняющие свойства соприкасающихся пород. Подземная суффозия способствует взаимному проникновению частиц контактирующих пород с разрыхлением, цементацией, кальмотацией, глинизацией и т. д. Поэтому инженерно-геологические свойства зон и поверхностей ослабления часто резко отличаются от окружающих пород. Г. Г. Зубкович доказала, что на контактах однородных песчано-глинистых пород происходит разложение и преобразование глинистых минералов, pH с 8 изменяется на 4,5 и происходит ряд других изменений.

Для прогноза устойчивости откосов решающее значение имеет пространственное соотношение азимута и угла падения откоса, залегания пород и зон и поверхностей ослабления. Оценку его можно определить графическим путем

Таблица 62

Классификация зон и поверхностей ослабления в горных породах (по В. Н. Славянову)

Группы зон и поверхностей ослабления	Типы зон и поверхностей ослабления
Сингенетические, связанные со свойствами и условиями формирования пород (расположенные по определенным стратиграфическим горизонтам и контактам между ними)	Прослои более слабых пород. Поверхности ослабления, связанные с процессами, происходящими на контактах разных пород. Древняя кора выветривания. Трещины послойного отслоения
Эпигенетические, связанные с тектоническими, гравитационными и иными процессами, закономерно секущие слои горных пород (закономерно расположенные)	Тектонические нарушения. Гравитационные нарушения. Подземные пустоты. Поверхностное отслоение зон выветривания. Зона ослабления пород в местах колебаний уровней и кривых депрессии подземных вод. Поверхность ослабления на границе промерзания пород.
Не имеющие выдержанной ориентировки (дробящие породу в различных направлениях)	Зоны выветривания (поверхностное растрескивание). Зоны нарушения, связанные с деятельностью человека.

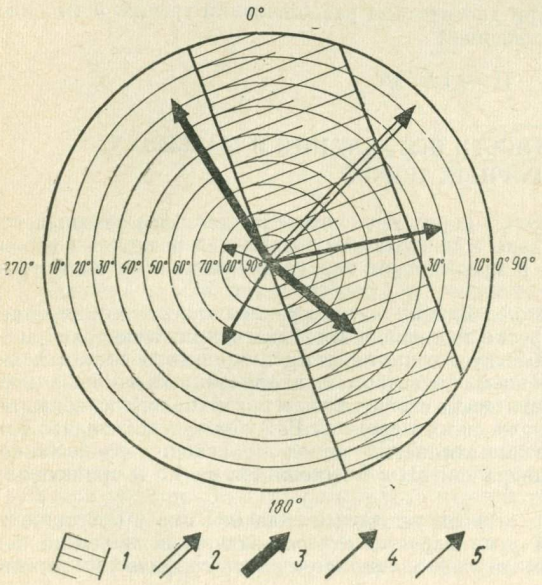


Рис. 54. «Роза устойчивости» откоса (по В. Н. Славянову)

1 — проекция откоса $\frac{80°}{34°}$ $\frac{\text{Азимут падения}}{\text{Угол падения}}$; *2* — падение пород $\frac{45°}{9°}$; *3* — тектонические разломы $\frac{130°}{45°}$ $\frac{330°}{17°}$, *4* — тектонические трещины $\frac{80°}{20°}$ $\frac{220°}{55°}$; *5* — гравитационные трещины $\frac{290°}{70°}$

построения круговой диаграммы «Розы устойчивости» по методу В. Н. Славянова (рис. 54).

Окружность делится на 360° для построения азимутов, а радиус — на 90° для углов падения (от окружности к центру). Через центр проводится линия простирания бровки откоса и от нее строится проекция откоса на круговую диаграмму. Стрелками наносятся проекции азимутов падения пород, зон и поверхностей ослабления. Длина стрелок при этом соответствует углам падения. Стрелки, пересекающие проекцию откоса, соответствуют наиболее опасным зонам или поверхностям ослабления пород, подсекающим склон. Расположение стрелок по отношению к проекции откоса характеризует условия дробления или подсечения откоса зонами или поверхностями ослабления. При криволинейном откосе вместо проекции откоса строится веер падения откоса.

V. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Сейсмические процессы подразделяются на естественные и искусственные. Первые вызываются тектоническими процессами, вулканическими извержениями, горными обвалами и карстовыми провалами. Вторые связаны с промышленными и иными взрывами, например ядерными. Последние делятся на воздушные, наземные и подземные, все они сопровождаются сейсмическими процессами.

По месту проявления различают землетрясения и моретрясения. Последние сопровождаются крупными океаническими волнами — цунами. Землетрясения и цунами опасны по своим разрушительным последствиям.

Область зарождения землетрясения, находящуюся на некоторой глубине от поверхности земли, называют очагом, или гипоцентром, а область, лежащую над ним на поверхности земли, — эпицентром, или эпицентральной областью. Различают очаги нормальные, расположенные на глубине до 70—80 км, промежуточные, находящиеся на глубине 70—300 км, и глубокие— на глубине более 300 км. Область проявления разрушительных землетрясений называется плейстосейстовой областью.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Из сейсмического очага, или эпицентра, где зарождается сейсмическая энергия, по всем направлениям распространяются упругие волны — сейсмические волны нескольких видов. Глубинные волны делятся на продольные — объемные волны, вызывающие расширение и сжатие пород, и поперечные, вызывающие в них деформации сдвига — изменение формы. Продольные волны распространяются во всех средах — твердых, жидких и газообразных, поперечные — только в твердых средах ,они не распространяются в воде. Те и другие волны, доходя до поверхности земли, вызывают появление поверхностных волн— волн Рэлея и Лява.

Отношение скоростей распространения продольных (a_0) и поперечных (b_0) волн в скальных грунтах составляет: $a_0 : b_0 = 1{,}73$.

В рыхлых породах это отношение может быть большим. Скорость волн Рэлея меньше скорости поперечных волн.

Значения коэффициента затухания упругих волн (m) существенно изменяются в зависимости от характера геологических структур и от направления, по которому в них распространяются волны (табл. 63, 64).

Таблица 63

Скорости распространения продольных a_0 и поперечных b_0 волн в различных породах и в воде (км/сек)

Породы	a_0	b_0
Скальные		
Граниты, диориты, базальты	5,6	2,9—3,6
Известняки, сланцы, гнейсы плотные	3,5—4,5	1,6—2,8
Песчаники, конгломераты плотные	2,4—3,0	1,2—1,8
Известняки, сланцы, песчаники нарушенные	1,5—2,3	0,9—1,35
Полускальные		
Гипсы	2,4—3,0	1,4—1,8
Мергели	2,0—2,6	1,1—1,5
Глинистые сланцы	1,4—1,9	0,9—1,45
Крупнообломочные		
Щебенистые и галечниковые	1,3—2,1	0,7—1,1
Гравийные (из кристаллических пород)	1,2—1,9	0,6—1,0
Гравийные (из осадочных пород)	1,1—1,7	0,5—0,95
Песчаные		
Пески гравелистые и крупные	1,1—1,6	0,5—0,85
Пески средней крупности	1,0—1,4	0,5—0,7
Пески мелкие и пылеватые	0,7—1,2	0,35—0,65
Глинистые		
Глины	0,9—1,5	0,48—0,8
Суглинки	0,8—1,4	0,45—0,75
Супеси	0,7—1,2	0,35—0,65
Супеси и суглинки лёссовидные пористые (с коэффициентом пористости $\varepsilon = 0{,}7$)	0,5—0,8	0,25—0,45
Насыпные, почвенные и мерзлые		
Насыпные	0,2—0,5	0,15—0,27
Почвенные	0,2—0,3	0,1—0,16
Мерзлые песчано-глинистые	1,0—2,5	0,5—1,25
Вода и лед		
Вода морская и подземная минерализованная	1,48	—
Вода речная и подземная пресная	1,43	—
Лед	2,0	1,0

Таблица 64

Затухания (m) упругих волн в зависимости от геологических структур

Направление распространения сейсмических волн в структурах	Коэффициент затухания	
	продольных волн a_0	поперечных волн b_0
По простиранию	1,5—2,5	1,3
Вкрест простирания	3,5—4,5	1,7

ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Характерными параметрами сейсмических волн помимо скорости их распространения a_0 и b_0 являются (табл. 65, 66) длина волны λ, амплитуда колебаний A, период колебаний T и частота колебаний f ($f = \frac{1}{T}$).

Таблица 65

Периоды колебаний T для различных пород (с)

Породы	T	Породы	T
Граниты, диориты, базальты	0,0005—0,1	Галечники, гравий	0,01—0,35
		Пески, пеплы	0,02—0,5
Известняки, песчаники, конгломераты	0,003—0,2	Супеси, суглинки, глины, лёссы	0,04—0,7
Туфы вулканические, ракушечники	0,007—0,3	Водонасыщенные пески, супеси, суглинки	0,05—1,0

Таблица 66

Частоты колебаний для разных пород (1/сек)

Породы	f	Породы	f
Граниты, диориты, базальты	200—3000	Пески, пеплы	25—250
		Супеси, суглинки, глины, лёссы	20—400
Известняки, песчаники, конгломераты	100—2000		
		Водонасыщенные грунты (пески, супеси, суглинки)	10—100
Туфы вулканические, ракушечники	70—1000		
Галечники, гравий	30—300		

Для сооружений опасны ускорения, возникающие в породах, слагающих основание сооружения. Сейсмические ускорения выражают через амплитуду A и период колебаний T:

$$\xi = A\frac{4\pi^2}{T^2}.$$

ШКАЛА СЕЙСМИЧЕСКОЙ БАЛЛЬНОСТИ

Интенсивность землетрясений выражают в баллах, определяющих силу землетрясения на поверхности Земли. В табл. 67 приведена шкала сейсмической интенсивности MSK — 1964, составленная в 1963—1964 гг. С. В. Медведевым (СССР), В. Шпонхойером (ГДР) и В. Карником (Чехословакия).

Для определения по шкале интенсивности землетрясения в баллах используется поведение построек и грунтов при землетрясении, ощущения людей и т. д.

Таблица 67

Сейсмическая шкала MSK-1964

Интенсивность, баллы	ξ, см/сек$^{-2}$	V, см/сек$^{-1}$	X_0, мм	Краткая характеристика землетрясений
1	—	—	—	Колебания почвы отмечаются приборами
2	—	—	—	Ощущаются в отдельных случаях людьми, находящимися в спокойном состоянии
3	—	—	—	Колебания отмечаются немногими людьми
4	—	—	—	Землетрясение отмечается многими людьми. Возможно дребезжание стекол
5	12—25	1,0—2,0	0,5—1,0	Качание висячих предметов, многие спящие просыпаются
6	25—50	2,1—4,0	1,1—2,0	Легкие повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке
7	50—100	4,1—8,0	2,1—4,0	Трещины в штукатурке и откалывание отдельных кусков, тонкие трещины в стенах
8	100—200	8,1—16,0	4,1—8,0	Большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб
9	200—400	16,1—32,0	8,1—16,0	В некоторых зданиях обвалы: обрушение стен, перекрытий, кровли
10	400—800	32,1—64,0	16,1—32,0	Обвалы во многих зданиях. Трещины в грунтах до метра шириной
11	—	—	—	Многочисленные трещины на поверхности земли, большие обвалы в горах
12	—	—	—	Изменение рельефа в больших размерах

Примечание: ξ—ускорение почвы для периодов от 0,1 до 0,5 с; V—скорость колебаний почвы для периодов от 0,5 до 2,0 с; X_0—амплитуда смещения центра массы маятника с периодом собственных колебаний 0,25 с и логарифмическим декрементом затухания 0,5.

КЛАССИФИКАЦИЯ, ПРИНЯТАЯ В ШКАЛЕ

I. Типы сооружений (здания, возведенные без необходимых антисейсмических мероприятий).

Тип А — здания из рваного камня, сельские постройки, дома из кирпича-сырца, глинобитные дома.

Тип Б — обычные кирпичные дома, здания крупноблочного и панельного типов, фахверковые строения, здания из естественного тесаного камня.

Тип В — каркасные железобетонные здания, деревянные дома хорошей постройки.

II. Количественные оценки числа разрушенных сооружений.
Разрушены отдельные — около 5% от общего числа сооружений.
Разрушены многие — около 50% от общего числа сооружений.
Разрушено большинство — около 75% от общего числа сооружений.
III. Классификация повреждений.
1-я степень. Легкие повреждения: тонкие трещины в штукатурке и откалывание небольших кусков штукатурки.
2-я степень. Умеренные повреждения: небольшие трещины в стенах, откалывание довольно больших кусков штукатурки, падение кровельных черепиц, трещины в дымовых трубах, падение частей дымовых труб.
3-я степень. Тяжелые повреждения: большие и глубокие трещины в стенах, падение дымовых труб.
4-я степень. Разрушения: сквозные трещины и проломы в стенах, обрушения частей зданий, разрушение связей между отдельными частями зданий, обрушение внутренних стен и стен заполнения каркаса.
5-я степень. Обвалы. Полное разрушение зданий.
IV. Группировка признаков шкалы.
Люди и их окружение.
Сооружения.
Природные явления.

ИНТЕНСИВНОСТЬ (В БАЛЛАХ)

1. НЕОЩУТИМОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

Интенсивность колебаний лежит ниже предела чувствительности людей; сотрясения почвы обнаруживаются и регистрируются только сейсмографами.

2. ЕДВА ОЩУТИМОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

Колебания ощущаются только отдельными людьми, находящимися в покое внутри помещений, особенно на верхних этажах.

3. СЛАБОЕ СОТРЯСЕНИЕ

Землетрясение ощущается немногими людьми, находящимися внутри помещений; под открытым небом — только в благоприятных условиях. Колебания схожи с сотрясением, создаваемым проезжающим легким грузовиком. Внимательные люди замечают легкое раскачивание висячих предметов, несколько более сильное на верхних этажах.

4. ЗАМЕТНОЕ СОТРЯСЕНИЕ

Землетрясение ощущается внутри зданий многими людьми, под открытым небом — немногими. Некоторые спящие просыпаются, но никто не пугается. Колебания схожи с сотрясением, создаваемым проезжающим тяжело нагруженным грузовиком. Дребезжание окон, дверей, посуды. Скрип полов и стен. Начинается дрожание мебели. Висячие предметы слегка раскачиваются. Жидкость в открытых сосудах слегка колеблется. В стоящих на месте автомашинах толчок заметен.

5. ПРОБУЖДЕНИЕ

а. Землетрясение ощущается всеми людьми внутри помещений, под открытым небом — многими. Большинство спящих просыпается. Немногие люди выбегают из помещений. Животные беспокоятся. Сотрясение зданий в целом. Висячие предметы сильно качаются. Картины сдвигаются с места. В редких случаях

останавливаются маятниковые часы. Некоторые неустойчивые предметы опрокидываются или сдвигаются. Незапертые двери и окна распахиваются и снова захлопываются. Из наполненных открытых сосудов в небольших количествах выплескивается жидкость. Ощущаемые колебания схожи с колебаниями, создаваемыми падением тяжелых предметов внутри здания.

б. Возможны повреждения 1-й степени в отдельных зданиях типа А.

в. В некоторых случаях меняется дебит источников.

6. ИСПУГ

а. Землетрясение ощущается большинством людей как внутри помещений, так и под открытым небом. Многие люди, находящиеся в зданиях, пугаются и выбегают на улицу. Некоторые теряют равновесие. Домашние животные выбегают из укрытий. В отдельных случаях может разбиться посуда и другие стеклянные изделия; падают книги. Возможно движение тяжелой мебели; может быть слышен звон малых колоколов на колокольнях.

б. Повреждения 1-й степени в отдельных зданиях типа Б и во многих зданиях типа А. В отдельных зданиях типа А повреждения 2-й степени.

в. В немногих случаях в сырых грунтах возможны трещины шириной до 1 см; в горных районах наблюдаются отдельные случаи оползней. Отмечаются изменения дебита источников и уровня воды в колодцах.

7. ПОВРЕЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ

а. Большинство людей испуганы и выбегают из помещений. Многие люди с трудом удерживаются на ногах. Колебания отмечаются лицами, ведущими автомашины. Звонят большие колокола.

б. Во многих зданиях типа В — повреждения 1-й степени, типа Б — повреждения 2-й степени, типа А — повреждения 3-й степени, в отдельных зданиях этого типа — повреждения 4-й степени. В отдельных случаях оползни проезжих частей дорог на крутых склонах и трещины на дорогах. Нарушения стыков трубопроводов; трещины в каменных оградах.

в. На поверхности воды образуются волны, вода становится мутной вследствие поднятия ила. Изменяется уровень воды в колодцах и дебит источников. В немногих случаях возникают или пропадают существующие источники воды. Наблюдаются отдельные случаи оползней на песчаных или гравелистых берегах рек.

8. СИЛЬНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ

а. Испуг и паника; испытывают беспокойство даже лица, ведущие автомашины. Кое-где обламываются ветви деревьев. Сдвигается и иногда опрокидывается тяжелая мебель. Часть висячих ламп повреждается.

б. Во многих зданиях типа В повреждения 2-й степени, в отдельных зданиях этой группы — повреждения 3-й степени. Во многих зданиях типа Б повреждения 3-й степени, в отдельных — 4-й степени. Во многих зданиях типа А повреждения 4-й степени, в отдельных — 5-й степени. Наблюдаются случаи разрыва стыков трубопроводов. Памятники и статуи сдвигаются с мест. Надгробные камни опрокидываются. Каменные ограды разрушаются.

в. Небольшие оползни на крутых откосах выемок и насыпей дорог; трещины в грунтах достигают нескольких сантиметров. Возникают новые водоемы. Иногда пересохшие колодцы наполняются водой или существующие колодцы иссякают. Во многих случаях изменяются дебит источников и уровень воды в колодцах.

9. МАССОВОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ ЗДАНИЙ

а. Всеобщая паника; большие повреждения мебели. Животные мечутся и издают крики.

б. Во многих зданиях типа В повреждения 3-й степени и в отдельных — 4-й степени. Во многих зданиях типа Б повреждения 4-й степени и в отдельных 5-й степени. Во многих зданиях типа А повреждения 5-й степени. Памятники и колонны опрокидываются. Значительные повреждения искусственных водоемов; разрывы части подземных трубопроводов. В отдельных случаях искривление железнодорожных рельсов и повреждения проезжих частей дорог.

в. На равнинах возникают наводнения, часто заметны наносы песка и ила. Трещины в грунтах достигают ширины 10 см, а по склонам и берегам рек — свыше 10 см; кроме того наблюдается большое количество тонких трещин в грунтах. Скалы обваливаются; частные оползни и осыпания грунта. На поверхности воды большие волны.

10. ВСЕОБЩИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ

а. Во многих зданиях типа В повреждения 4-й степени, а в отдельных — 5-й степени. Во многих зданиях типа Б повреждения 5-й степени, в большинстве зданий типа А повреждения 5-й степени. Опасные повреждения плотин и дамб, серьезные повреждения мостов. Легкие искривления железнодорожных рельсов. Разрывы или искривления подземных трубопроводов. Дорожные покрытия и асфальт образуют волнообразную поверхность.

б. Трещины в грунтах достигают ширины нескольких дециметров, а в некоторых случаях 1 м. Параллельно руслам водных потоков появляются широкие разрывы. Наблюдается осыпание рыхлых пород с крутых склонов. Возможны большие оползни на берегах рек и крутых морских побережьях. В прибрежных районах перемещаются песчаные и илистые массы. Отмечается выплескивание воды в каналах, озерах, реках и т. д. Возникают новые озера.

11. КАТАСТРОФА

а. Серьезные повреждения даже зданий хорошей постройки, мостов, плотин и железнодорожных путей; шоссейные дороги приходят в негодность; разрушение подземных трубопроводов.

б. Значительные деформации почвы в виде широких трещин, разрывов и перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях; многочисленные горные обвалы. Определение интенсивности сотрясения (балльности) требует специального исследования.

12. ИЗМЕНЕНИЕ РЕЛЬЕФА

а. Сильное повреждение или разрушение практически всех наземных и подземных сооружений.

б. Радикальные изменения земной поверхности.

СЕЙСМИЧЕСКОЕ МИКРОРАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ В ИНЖЕНЕРНЫХ ЦЕЛЯХ

Для строительных целей пользуются картой сейсмического районирования территории СССР, составленной Институтом физики Земли АН СССР (рис. 55).

С карты сейсмического районирования территории СССР получают исходный сейсмический балл, отнесенный к «средним» грунтовым условиям — песчано-глинистым и гравелистым породам с низким (на глубине 6 м и более от

поверхности земли) уровнем грунтовых вод. По отношению к этому баллу определяют приращение сейсмической балльности ΔB и вычисляют сейсмическую интенсивность для данных пород Δx, сравниваемых с эталонными породами $1_э$:

$$\Delta x = T_э \pm \Delta B.$$

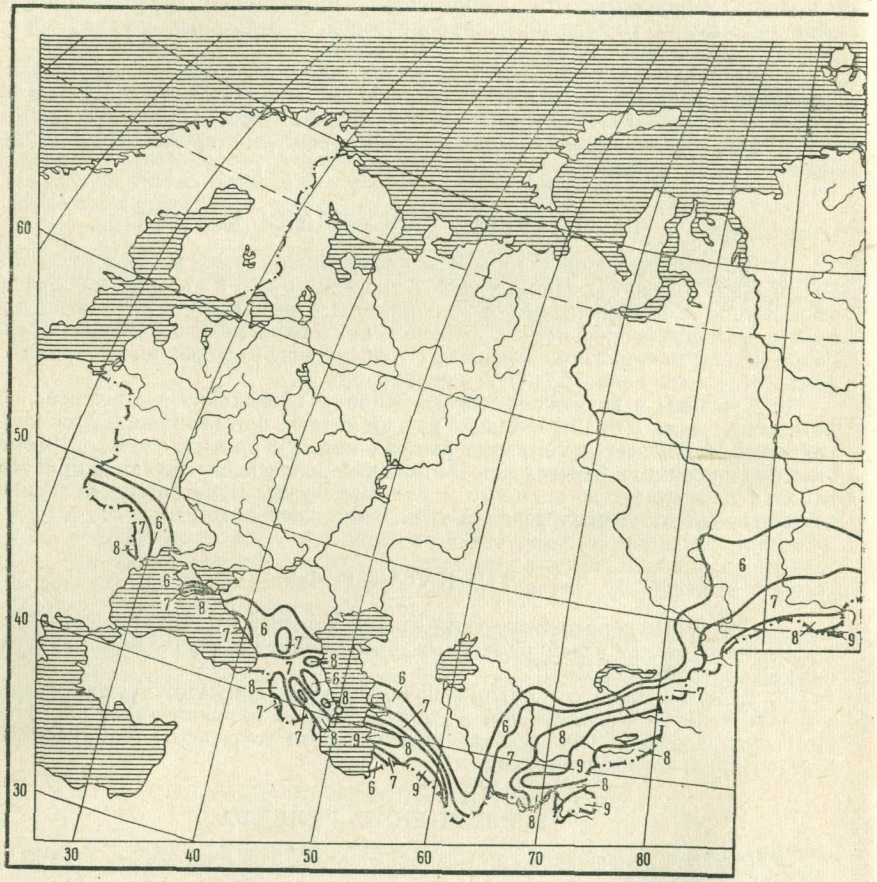
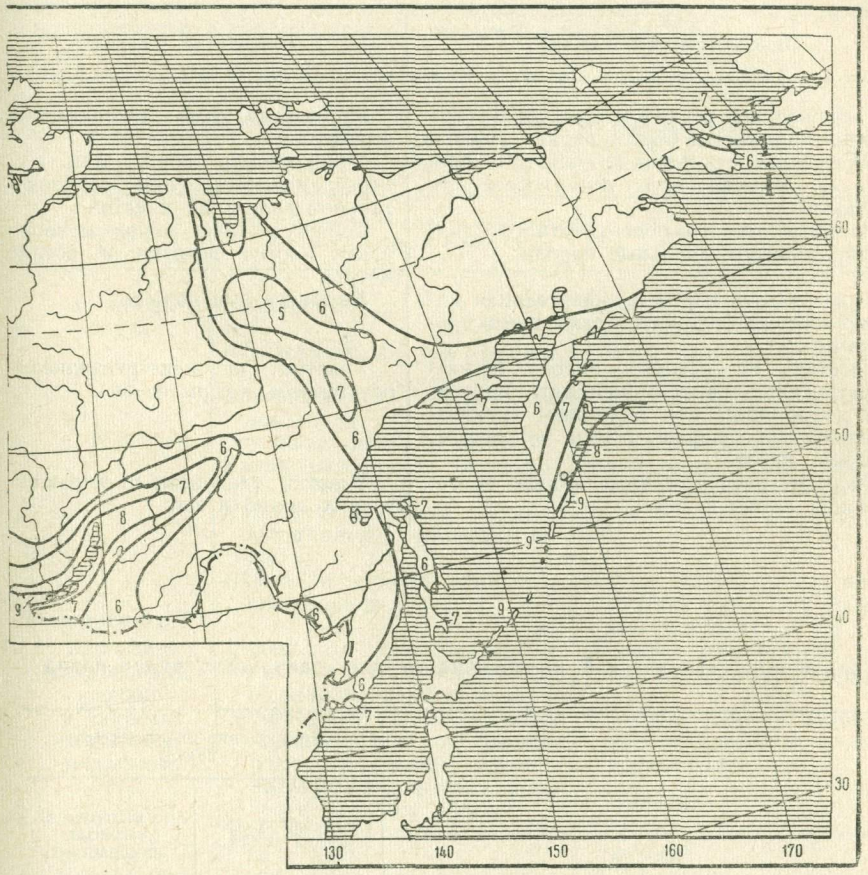


Рис. 55. Схематическая карта сейсмического районирования территории СССР

Сейсмическое районирование, выполняемое для обоснования строительства городов, промышленных предприятий, гидроэнергетического и других видов строительства, получило название сейсмического микрорайонирования, которое обычно ведется в масштабе 1 : 5000—1 : 10 000, в отдельных случаях — 1 : 25 000.

Оно основывается на следующих данных: 1) сейсмостатистических — сведениях о положении очагов, распределении эпицентров и т. п.; 2) инструментальных сейсмических наблюдений — графиках повторяемости землетрясений, картах активности, сотрясаемости и т. д.; 3) инженерно-геологических, определяющих состав грунтов, особенности их залегания, положение уровня грунтовых вод, характер развития физико-геологических явлений и остаточных деформаций грунтов, возникающих при сильных землетрясениях; 4) инструментальных определений приращения сейсмической интенсивности.



ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ

На величину сейсмической балльности помимо двух главных факторов — литологического состава и обводненности пород — в той или иной степени влияют особенности рельефа, сочетание и условия залегания пластов, выветрелость пород, близость линий разрывных нарушений, оползни, осыпи, карст

и т. п. В табл. 68, 69 приведена общая характеристика сейсмических условий участков строительства в зависимости от названных выше природных факторов.

Таблица 68

Оценка сейсмогеологических условий

Неблагоприятные условия	Благоприятные условия
Расчлененный рельеф местности: крутые склоны, обрывистые берега, овраги, ущелья	Горизонтальность поверхности территории
Многослойность пород при значительном наклоне пластов или поверхности их контакта	Однородность пород или их переслаиваемость при горизонтальном залегании пластов
Наличие тонкого поверхностного слоя, перекрывающего скальные породы	Толщи рыхлых пород мощностью многие десятки и сотни метров
Выветрелость пород и значительная нарушенность их физико-геологическими процессами	Невыветрелые породы
Участки, на которых порода (грунт) от сотрясения может приобретать остаточные деформации под действием гравитационных сил (обвалы, осыпи, оплывины, оползни, карст)	Участки, не подвергающиеся остаточным деформациям
Участки, расположенные вблизи тектонических линий и зон	Участки, удаленные от тектонических линий и зон

Таблица 69

Приращение сейсмической интенсивности для главнейших видов пород

Породы	Приращение интенсивности, баллы	
	по неинструментальным данным	по инструментальным измерениям
Граниты	0	0
Известняки, песчаники	0—1	0,2—1,3
Гипсы, мергели, сланцы	1	0,6—1,4
Галечники, гравий	1—2	1—1,6
Пески, лёссы	1—2	1,2—1,8
Глинистые грунты	1—2	1,2—2,1
Насыпные грунты	2—3	2,3—3
Обводненные рыхлые грунты	3—4	1,7—2,8
Обводненные насыпные и заболоченные грунты	4	3,3—3,9

VI. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

1. ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ВОДООТЛИВОМ (ИСКУССТВЕННОЕ ПОНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД)

При строительных и горных работах, при откачках подземных вод для водоснабжения и при дренировании земель резко снижаются уровни подземных вод, что существенно влияет на развитие физико-геологических процессов и меняет инженерно-геологические условия строительства (табл. 70).

Таблица 70

Основные процессы, связанные с водопонижением

(В. Н. Славянов, 1963 г.)

Процесс	Физико-геологические и инженерно-геологические процессы	Методы прогноза
Осушение пород	Оседание пород	Расчет оседания пород при осушении
	Образование трещин оседания	Анализ зон и поверхностей ослабления
	Поверхностное растрескивание пород	Изучение условий выветривания
	Осушение поймы и болот	Изучение водоупоров под ними
	Уменьшение роста оврагов	Определение роли подземных вод в развитии оврагов
	Изменение объемной массы и взвешенного состояния пород	Расчеты изменения состояния
	Общее укрепление устойчивости склонов	Определение улучшения свойств пород при уменьшении влажности
Изменение направления, режима и скорости движения подземных вод	Переход от пластового движения воды к движению по подземным ложбинам стока	Изучение гипсометрии кровли подстилающего водоупора
	Кольматация речного аллювия (при переходе от питания реки подземными водами к питанию водоносного горизонта речными водами)	Изучение режима водообмена между рекой и водоносными горизонтами
	Изменение зон развития активного карста	Анализ развития кривых депрессий
Уположение кривых депрессии	Уменьшение гидродинамического давления	Расчет гидродинамического давления
	Уменьшение процессов суффозии	Определение критических градиентов для суффозии
	Уменьшение подвижности плывунов	(См. разделы о суффозии и плывунах)
	Изменение напряженного состояния пород	Моделирование
	Нарушение водоснабжения. Осушение колодцев	Режимные наблюдения, гидрогеологические расчеты воронки депрессии

Уменьшение влажности глинистых и некоторых других пород часто сопровождается уменьшением их объема — у с а д к о й. Величина возможного оседания определенного участка поверхности в результате усадки пород в природных условиях определяется по формуле

$$\Delta = \sum_{1}^{n} \sigma_{\text{ус}\,i} \cdot h_i,$$

где $\sigma_{\text{ус}\,i}$ — удельная усадка каждого слоя (i) породы;
h_i — толщина того же слоя породы.

Удельную усадку определяют на компрессионных приборах и на приборах для определения набухания пород (прибор А. М. Васильева и др.). Величину возможного оседания поверхности земли при осушении обычно определяют с помощью выявления удельной усадки на образцах, доведенных не до полного высушивания, а до реально возможной влажности, соответствующей остаточной влажности породы в естественных условиях после понижения уровня подземных вод. В противном случае полученные показатели окажутся завышенными.

Для простейшего определения удельной усадки в течение 2—3 дней наблюдают осадку образца ненарушенной породы в кольце или рамке. Удельную усадку рассчитывают по формуле

$$\sigma_{\text{ус}} = \frac{h - h_1}{h},$$

где h — первоначальная высота образца;
h_1 — его высота после высушивания.

Известны случаи, когда при дренировании склона, сложенного породами, резко изменяющими свой объем при изменениях влажности, вместо его укрепления происходило расчленение и развитие оползней. Например, дренирование склонов в районе Вольских цементных заводов вызвало их оседание и активизацию оползней.

Наблюдения за усадкой территории при развитии воронки депрессии производят точным нивелированием реперных знаков или наблюдениями за глубинными реперами. Глубинный репер представляет собой буровую скважину с обсадными трубами, в которой свободно располагается труба или штанга, закрепленная нижним концом в породе ниже уровня возможного развития воронки депрессии. При опытной откачке на Яковлевском месторождении КМА такие реперы обнаружили оседание земли на несколько сантиметров.

Уменьшение объемной массы породы при снижении уровня подземных вод можно вычислить по формуле

$$\nu_{\text{вз}} = \frac{\nu_y - 1}{1 - E},$$

где ν_y — плотность породы
E — коэффициент пористости.

Резкие колебания уровня воды в карьерах и строительных котлованах, разрабатываемых способами гидромеханизации, могут привести к развитию суффозии и вымыванию пород. При наличии дренажного кольца вокруг котлована целесообразно поддерживать уровни воды в дренажных устройствах ниже, чем в котловане, тогда как вода будет давить на откос и не снизит его устойчивости. При необходимости понижения воды в котловане следует проверить допустимые скорости фильтрации воды через откос.

2. ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ И СДВИЖЕНИЕ ПОРОД НАД ГОРНЫМИ ВЫРАБОТКАМИ

Горные породы в земной коре до проведения выработок находятся в естественном напряженном состоянии, вызванном гравитационными силами. Силы, действующие на элементарный кубик породы, залегающей на глубине H, соответственно равны:

$$\sigma_x = -\gamma H, \quad \sigma_y = \sigma_z = -\mu\gamma H,$$

где γ — средняя объемная масса налегающих пород;

μ — коэффициент бокового распора, характеризующий величину передачи в бока вертикального давления.

Для твердых пород

$$\mu = \frac{m}{1-m};$$

для рыхлых пород

$$\mu = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right),$$

где m — коэффициент Пуассона.

Некоторые исследователи считают, что распределение напряжений в массиве подчинено гидростатическому закону, согласно которому $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$, т. е. коэффициент μ равен единице. В районах, характеризующихся современными тектоническими движениями, могут существовать дополнительные напряжения регионального тектонического характера.

Проходка горных выработок вызывает в массиве пород перераспределение напряжений, причем на одних участках возникает повышенное сжатие, а на других — растягивающие силы.

В зависимости от глубины горных работ, прочности и других свойств пород, окружающих выработки, неоднородности этих пород, размеров выработок и видов крепления возникшее перераспределение напряжений может вызвать деформации пород и выработок.

Под горным давлением, по Л. Д. Шевякову, понимают силы, существующие в породах, окружающих горные выработки. При проявлении этих сил для устранения деформации выработок требуется возведение крепи. П. Н. Панюков относит к горному давлению силу давления на крепь, вызванную движением горных пород в сторону выработки.

В настоящее время нет единого метода расчета величины горного давления на крепь. Различные исследователи предлагают для его определения целый ряд формул, основные из которых приведены в главе третьей «Механика грунтов».

Наблюдение за проявлением горного давления в шахтах входит в обязанность шахтных служб — геологической и маркшейдерской. Измерение величины горного давления проводится с помощью мессдоз, измерительных стоек и других приборов.

Для управления горным давлением применяется полная или частичная закладка выработанного пространства и оставление целиков полезного ископаемого. В некоторых случаях горное давление используется для повышения эффективности горных работ путем разрушения полезного ископаемого в массиве и отжимания его в выработку с целью облегчения разработки.

С горным давлением связаны многие инженерно-геологические (или горно-геологические) явления, возникающие в подземных горных выработках, — горные удары, выбросы пород, пучение, обрушение и куполение пород, их сдвижение и др.

Наибольшую опасность представляют горные удары, которые относятся к наименее изученным явлениям, происходящим на большой глубине (обычно более 500 м) и преимущественно в породах высокой прочности. Горные

удары возникают в случаях мгновенного перехода потенциальной энергии упругих деформаций в кинетическую. Практически это явление представляет собой быстрый катастрофический выброс большого количества породы в выработку, сопровождающийся сильным гулом, сотрясением окружающего массива пород и воздушным ударом.

В выработках угольных шахт наблюдаются также внезапные выбросы угля и газа. Подобно горным ударам, это явление характерно для углей, залегающих среди довольно крепких пород (песчаников, крепких глинистых сланцев) преимущественно на глубине более 200—300 м. На меньшей глубине выбросы могут происходить в сильно дислоцированных породах. В крепких породах наблюдается также стреляние пород, под которым в горной практике понимается отскакивание от стенок выработок отдельных кусков породы, сопровождающееся резким звуком, напоминающим выстрел.

Таблица 71

Величина коэффициента разрыхления для глинистых сланцев

Мощность вынимаемого пласта, м	Крепость сланцев	Коэффициент разрыхления K
До 1	Слабые	1,15—1,20
	Крепкие	1,20—1,25
От 1 до 2	Слабые	1,25—1,30
	Крепкие	1,30—1,35
От 2 до 3	Слабые	1,30—1,35
	Крепкие	1,35—1,40

Пучение (поддувание) заключается в выдавливании пород в горные выработки из стенок и почвы. Это явление связано в основном с горным давлением и лишь в некоторой степени с увеличением объема пород при их набухании или изменении свойств в результате выветривания. Пучение иногда бывает настолько значительным, что усиленное деревянное, а иногда даже металлическое и железобетонное крепление ломается, и полость выработки заполняется породой.

Наиболее интенсивное пучение наблюдается в глинах, для которых характерны деформации пластического типа. Однако оно может происходить и в глинистых породах с высокой степенью литификации (аргиллиты, глинистые сланцы и др.), вызывая их хрупкое разрушение.

Для расчета среднего давления d (кгс/см^2) на единицу площади почвы, сложенной глинами, предложена А. П. Максимовым формула

$$d=\frac{\pi}{4}(\mu\gamma H-\gamma H\operatorname{tg}\varphi-C)-\frac{3\beta V_{ср}}{2a},$$

где $V_{ср}$ — средняя скорость течения породы в выработку;
β — коэффициент вязкости.

Под сдвижением понимают деформации пород, залегающих над выработанным пространством. В общем случае (по С. Г. Авершину) для сдвижения характерно образование нескольких зон. Непосредственно в кровле выработанного пласта породы провисают и обрушиваются, образуя зону беспорядочного обрушения. Высота h этой зоны ориентировочно равна:

$$h=\frac{m}{K-1},$$

где m — мощность вынимаемого пласта;
K — коэффициент разрыхления пород при обрушении.

Величина коэффициента разрыхления изучена пока недостаточно. Она зависит (по С. Г. Авершину) от физико-механических свойств пород, мощности вынимаемого пласта, размеров обнаженной при обрушении площади, скорости

подвигания забоя и изменяется в пределах от 1,0 до 1,5. Например, для глинистых сланцев В. Д. Слесарев принимает следующие величины этого коэффициента (табл. 71).

При большой крепости и монолитности пород обрушения может не происходить даже при довольно больших пролетах над выработками. Такие «мосты» бывают устойчивы до определенной величины пролета выработки, свойственной данной породе. Если в кровле выработки залегают мощные слои глин, способные к пластическим деформациям, то может произойти плавная посадка кровли, без разрыва сплошности пород. В сильнотрещиноватых слоистых породах в кровле выработки наблюдаются отдельные в ы в а л ы пород и к у п о л е н и е, т. е. образование над выработкой естественных сводов-куполов. Куполение может происходить также и в рыхлых породах, рыхлых рудах или песчано-глинистых толщах. Зоны и углы сдвижения зависят от условий залегания пород.

Участок земной поверхности, подвергшийся сдвижению в результате проходки горных выработок, называют мульдой сдвижения. Для определения размеров мульды и углов сдвижения проводят специальные инструментальные наблюдения с установкой на поверхности реперов (станций наблюдений). Для расчета величины деформаций применяют метод построения профилей по данным оседания реперов и траекторий их смещения в плане.

Расчет величины наибольшего оседания поверхности в условиях полной подработки и пологого залегания слоев производят также по следующим эмпирическим формулам:

$$\eta_0 = \frac{a}{a + \sqrt{H}} \cdot m,$$

где η_0 — наибольшее оседание поверхности;
H — средняя глубина разработок;
m — мощность вынимаемого пласта;
a — эмпирическая величина, принимаемая, например, для Донбасса, равной 25.

$$\eta_0 = 2te\,m,$$

где t и e — коэффициенты, определяемые по формулам:

$$t = \frac{\operatorname{ctg}\psi}{\operatorname{ctg}\psi + \operatorname{ctg}\sigma}; \quad e = \frac{P}{m \cdot S},$$

где P — площадь сечения мульды по главному направлению;
S — сечение выработанного пространства;
ψ — угол полной подработки;
σ — угол сдвижения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. М., Госгеолтехиздат, 1962, 608 с.
2. Голов А. Е., Коломенский Н. В., Смирнов Л. Н. Вопросы унификации инженерно-геологических исследований. М., «Недра», 1964, 43 с.
3. Емельянова Е. П. Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогнозы оползней. М., «Недра», 1971, 104 с.
4. Коломенский Н. В. Инженерная геология. М., «Высшая школа», 1964, 320 с.
5. Костомаров В. М. Противооползневые мероприятия в городах М., Стройиздат, 1967, 11 с.
6. Маккавеев А. А. Руководство по гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям в связи с осушением болот. М., «Недра», 1967, 248 с.

7. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М., Стройиздат, 1962, 284 с.
8. Минделиэ. О. Буровзрывные работы при проведении горных выработок. М., Госгортехиздат, 1960, 555 с.
9. Панюков П. Н. Инженерная геология. М., Госгортехиздат, 1962, 342 с.
10. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М., «Недра», 1970, 160 с.
11. Родионов Н. В. Карст Европейской части СССР, Урала и Кавказа. М., Госгеолтехиздат 1963, 175 с.
12. Сели в СССР и меры борьбы с ними. М., «Наука», 1964, 250 с.
13. Скворцов Г. Г., Фромм В. В. Инженерно-геологическое изучение глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых при разведке. М., «Недра», 1970, 105 с.
14. Славянов В. Н., Фандеева В. И. Влияние горных работ на природные условия КМА. — В кн.: Инженерно-геологические процессы и явления, их значение для строительства. М., 1963, с. 75—82.
15. Славянов В. Н. Инженерно-геологические прогнозы устойчивости откосов. М., Госстройиздат, 1964, с. 85—100.
16. Трепетцов Е. В. Временные методические указания по инженерно-геологическим исследованиям и прогнозам переработки оползневых береговых склонов водохранилищ. М., 1962, 63 с. (ВСЕГИНГЕО).

Глава пятая

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

I. ЗАДАЧИ, ВИДЫ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Инженерно-геологические исследования проводятся главным образом для обоснования проектирования различных видов строительства, разведки и эксплуатаций месторождений полезных ископаемых, а также для осуществления других различных инженерных мероприятий. Основными задачами инженерно-геологических исследований являются: изучение геоструктурных, геоморфологических и гидрогеологических условий, современных геологических процессов; определение свойств горных пород, обосновывающих рентабельное проектирование строительства и нормальную эксплуатацию инженерных сооружений. К числу важнейших факторов, изучаемых при инженерно-геологических исследованиях, относятся: распространение, условия залегания, генезис, возраст, мощность, инженерно-геологические свойства горных пород, состав и свойства приуроченных к ним подземных вод, все виды современных геологических и инженерно-геологических процессов. Явления и процессы, явившиеся результатом взаимодействия геологической среды с инженерным сооружением, носят название инженерно-геологических.

Как отмечает Г. Н. Каменский (1959), «... взаимодействие сооружения с геологической обстановкой очень разнообразно, а характер и степень проявления его зависит как от геологической обстановки, так и от особенностей сооружения и его эксплуатации». И. В. Попов полагает (1965), что «...инженерное сооружение должно быть вписано в природные условия местности так, чтобы в дальнейшем оно могло жить единой жизнью в данной природной обстановке или изменить течение природных процессов в нужном направлении и в нужной степени».

При инженерно-геологических исследованиях должны быть получены необходимые геологические данные для оценки места строительства и размещения на нем сооружений, для выбора и расчета конструкций сооружения и для установления режима его эксплуатации. Для проектирования защитных мероприятий необходимо выявить современные геологические процессы, угрожающие сооружению или хозяйственной жизни района. Результаты инженерно-геологических исследований должны обеспечивать возможность количественного прогноза взаимодействия сооружения со средой, т. е. возможных величин осадки зданий и фильтрационных потерь воды из каналов и водохранилищ, размеров разрушения (переработки) берегов водохранилищ и др. Следует учитывать также возможную эффективность мероприятий, защищающих территорию, на которой расположено сооружение, и само сооружение от разрушительного действия современных геологических процессов.

Характерной особенностью изучения горных пород в инженерно-геологических целях является оценка их способности сопротивляться механическому, физическому и другим видам воздействия (давлению, сдвигу), определение

водопроницаемости пород, их способности сохранять и соответственно менять свои свойства, когда они становятся объектом инженерной деятельности человека.

Процесс проектирования делится на ряд последовательных стадий, различных при разных видах строительства в зависимости от сложности сооружения и возможности использования при проектировании типовых конструкций. И. В. Попов рекомендует пользоваться инженерно-геологическими данными при проектировании сооружения для того, чтобы обосновывать: 1) выбор места, наиболее благоприятного по геологическим условиям для размещения строительства и сооружения; 2) соответствующие принципиальные требования в отношении типов конструкций и методов работ при возведении сооружений и их эксплуатации; 3) мероприятия, которые могут улучшить инженерно-геологические использования местности.

Для решения этих вопросов производят инженерно-геологические подготовительные, полевые и камеральные работы.

Подготовительные работы включают изучение района по имеющимся архивным, фондовым и литературным материалам, а также организацию работ и подготовку к выезду в поле.

В полевые работы входят: инженерно-геологическая съемка, буровые и горно-разведочные работы в сочетании с геофизическими, ландшафтно-геологическими, радиоактивными и другими методами исследований; опытные полевые и лабораторные работы и обработка полевых материалов. Лабораторные работы предусматривают изучение состава, состояния и свойств горных пород, определение агрессивности и коррозийности подземных вод по отношению к металлическим и бетонным конструкциям.

Камеральные работы заключаются в обработке материалов полевых исследований и в составлении отчетов (заключений).

При инженерно-геологической характеристике горных пород очень важно установить их принадлежность к геологическим формациям, структурным этажам, геолого-генетическим комплексам, инженерно-геологическим группам и более мелким подразделениям пород (в зависимости от степени детальности масштаба), а также выявить приуроченность к ним подземных вод и современных геологических процессов.

II. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ СЪЕМКА И КАРТЫ

Региональная инженерная геология изучает закономерности территориального распределения инженерно-геологических условий применительно к различным строительным и хозяйственным целям. Под инженерно-геологическими условиями понимается вся совокупность геологической обстановки, имеющая значение для проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

Основной задачей при изучении региональных инженерно-геологических условий считается выявление существующего и возможного взаимодействия природных явлений с инженерными сооружениями. Региональные инженерно-геологические исследования проводятся для сравнительно крупных территорий с целью установления всех важнейших геологических факторов, определяющих инженерно-геологические условия. Изучение региональных закономерностей необходимо для правильного планирования и размещения разных видов строительства.

По мнению И. В. Попова (1965), региональная инженерно-геологическая характеристика СССР требует оценки территории, зависящей от различных геологический явлений, как факторов инженерно-геологических условий. Последние будут зависеть от тектонического развития земной коры и климатических условий. Взаимосвязь тектонического развития территории с формированием

слагающих пород является основной региональной закономерностью распространения в земной коре пород с различными инженерно-геологическими свойствами.

Инженерно-геологические свойства пород изменяются в зависимости от условий их формирования, т. е. под влиянием различных процессов: диагенеза, эпигенеза, сингенеза, гипергенеза и метаморфизма.

К важнейшим геологическим факторам, определяющим региональные инженерно-геологические условия, относятся: *геологическое строение территории* (с выделением формаций, геолого-генетических комплексов и инженерно-геологических групп горных пород), структура, условия залегания и состав пород, гидрогеологические и геоморфологические условия, современные геологические процессы.

Выделение геологических формаций, отражающих общие закономерности формирования и распространения определенных сочетаний горных пород, производят с учетом структурно-тектонических условий (платформенные, геосинклинальные и переходные зоны) и истории геологического развития территории. В каждой формации выделяют геолого-генетические комплексы горных пород, учитывая их состав и сочетания различных петрографических типов. Характеризуя комплексы осадочных пород, необходимо обращать внимание на соподчиненность и соотношение различных петрографических видов пород в каждом комплексе, на гранулометрический состав пород, их цвет, слоистость, влажность и карбонатность, а также на характер выветривания, выщелачивания и трещиноватости.

При региональном инженерно-геологическом изучении территории большую роль играет характеристика гидрогеологических условий, в частности глубина залегания водоносных горизонтов, имеющих инженерно-геологическое значение, напоры и режим их уровней, химический состав воды (в частности, ее агрессивность), влияние подземных вод на геологические процессы и явления (карст, оползни, сели и т. д.). В оценке региональных инженерно-геологических условий должны найти отражение и геоморфологические факторы: характер рельефа, связь его с составом горных пород, история формирования и возраст. Очень важны также закономерности распространения и характер развития геологических процессов, особенно современных. Большое значение приобретает выявление площадей их развития.

Региональные инженерно-геологические исследования сопровождаются проведением инженерно-геологической съемки, составлением инженерно-геологических карт и карт районирования с инженерно-геологической характеристикой выделяемых элементов районирования.

Инженерно-геологическая съемка является одним из важнейших видов инженерно-геологических исследований. Она проводится с целью изучения инженерно-геологических условий территории, в пределах которой намечается размещение сооружений или осуществление других инженерно-геологических мероприятий.

Масштаб инженерно-геологической съемки определяется категорией сложности и степенью геологической изученности района, а также задачами исследования и стадиями проектирования. В зависимости от масштаба инженерно-геологические съемки подразделяются на мелкомасштабные — от 1 : 500 000 и мельче, среднемасштабные — от 1 : 200 000 до 1 : 25 000 и крупномасштабные — от 1 : 10 000 и более крупные.

Мелкомасштабные инженерно-геологические съемки, как правило, не проводятся, но при составлении инженерно-геологических карт масштаба 1 : 500 000 и мельче в случае необходимости для увязки имеющегося фактического материала прежних исследований производятся полевые маршруты и рекогносцировки.

Среднемасштабная площадная инженерно-геологическая съемка — масштабов от 1 : 200 000 до 1 : 25 000 — проводится для обоснования технико-экономического доклада — схемы, а в отдельных случаях при простых

геологических условиях и несложном характере проектируемых сооружений для обоснования проектного здания.

Крупномасштабные инженерно-геологические съемки — масштаба 1 : 10 000 и крупнее — проводятся для обоснования проектного задания, а в отдельных случаях при сложных гидрогеологических условиях и своеобразии проектируемых сооружений для обоснования технического проекта. В масштабе инженерно-геологической съемки должна составляться и инженерно-геологическая карта. Инженерно-геологическая съемка сопровождается разведочными и лабораторными работами, а также кратковременными наблюдениями за геологическими и инженерно-геологическими процессами с целью лучшего освещения инженерно-геологических условий местности.

При инженерно-геологической съемке необходимо изучение типов формаций, геолого-генетических комплексов, свит, пачек и слоев, выявление состава, возраста и генезиса горных пород, определение их мощности, изменения по простиранию и установления степени и характера выветривания. Следует также изучать гидрогеологические условия с целью выяснения степени обводненности пород, глубины залегания подземных вод и их напоров, а также химического состава, агрессивности их по отношению к бетонным сооружениям и коррозийности к металлическим конструкциям. С целью изучения характера рельефа, его возраста и генезиса, с учетом состава горных пород, выполняются геоморфологические наблюдения.

Геологические явления и процессы — оползни, сели, обвалы, осыпи, абразии, эрозии — изучаются при инженерно-геологической съемке с целью определения степени их вредного воздействия для проведения мероприятий по борьбе с ними. При изучении инженерно-геологических процессов необходимо обследовать существующие сооружения для выявления их состояния в процессе эксплуатации, т. е. получать сведения о величине и характере осадок оснований под фундаменты, об устойчивости откосов, дорожных выемок, насыпей, карьеров, подпорных стен, мостов, стенок каналов и т. п.

Инженерно-геологические карты, типы инженерно-геологических карт и их назначение. Инженерно-геологической картой называется графическое изображение важнейших инженерно-геологических факторов в пределах изучаемой территории, подлежащих учету при проектировании, строительстве, эксплуатации сооружений и осуществлении других инженерных мероприятий. По данным инженерно-геологической съемки, в процессе которой комплексно изучаются геологические, геоморфологические и гидрогеологические условия, составляются инженерно-геологические карты и разрезы. Они являются основными документами, в которых отражены главнейшие результаты не только съемочных, но и разведочных, опытных, стационарных и других работ.

Как правило, составляют три типа инженерно-геологических карт: карты инженерно-геологических условий, карты инженерно-геологического районирования и инженерно-геологические карты специального назначения. Детальность изучения и масштаб карт определяются требованиями проектирования и сложностью инженерно-геологических условий. В зависимости от этого составляются карты мелкомасштабные, среднемасштабные и крупномасштабные.

Карту инженерно-геологических условий составляют для всех видов наземного строительства, ее используют для общей оценки природных условий, в которых проектируется строительство.

Карту инженерно-геологического районирования составляют как для общих, так и для специальных целей на основе общности инженерно-геологических условий отдельных частей территории с выделением на ней таксономических подразделений — регионов, областей, районов, число которых возрастает по мере увеличения масштаба; при детализации можно выделять подрайоны, участки и т. д.

Специальные инженерно-геологические карты составляют применительно к требованиям конкретного объекта строительства или несколько однородных его видов. На них дается оценка инженерно-геоло-

гических условий территории и прогноз инженерно-геологических явлений. Для районов со сложным геологическим строением рекомендуется составлять вспомогательные карты, характеризующие отдельные элементы инженерно-геологических условий, например: оползневые, карстовые, геоморфологические, гидрогеологические и другие, отражающие специфические особенности территории, важные для данного вида строительства.

Инженерно-геологические карты по назначению и детальности содержания (нагрузки) подразделяются на следующие четыре категории: 1) общие обзорные мелкого масштаба; 2) обзорные среднего масштаба; 3) среднемасштабные и 4) детальные крупномасштабные.

Общие обзорные* мелкого масштаба (от 1 : 500 000 и мельче) составляются с целью отражения закономерностей формирования и распространения инженерно-геологических условий на больших территориях. Они используются при планировании и размещении строительства, при проектировании детальных инженерно-геологических работ, как справочное пособие по общим инженерно-геологическим условиям, а также как пособие в высших учебных заведениях.

Карты среднего масштаба подразделяются на обзорные и среднемасштабные.

Обзорные карты среднего масштаба (от 1 : 200 000 до 1 : 100 000) предназначаются для проектирования строительства различных сооружений: населенных пунктов, промышленных предприятий, железнодорожных и автодорожных трасс и линий и т. д.

Среднемасштабные карты (от 1 : 50 000 до 1 : 25 000) предназначаются для обоснования проектного задания при составлении планов застройки городов, дорожных узлов, отдельных гидротехнических сооружений и т. д.

Детальные крупномасштабные карты (от 1 : 10 000 и крупнее) предназначаются для обоснования проектного задания и технического проекта при застройке городских территорий, при размещении конкретных объектов промышленного строительства, гидротехнических узлов, транспортных коммуникаций и т. д.

Каждая инженерно-геологическая карта состоит из собственно карты, условных обозначений, инженерно-геологических разрезов и пояснительной записки. В приложении к тексту пояснительной записки дается каталог опорных выработок, показанных на карте. Записка не должна повторять содержание карты, она призвана служить в основном дополнением к ней и пояснять то, что не отражено на карте.

Для составления инженерно-геологических карт всех масштабов необходимо использовать: 1) топографические, геологические (дочетвертичных и четвертичных образований или совмещенные), тектонические, геоморфологические, гидрогеологические и другие карты, составленные по результатам прежних исследований; 2) результаты работ по геологии, геоморфологии, гидрогеологии, инженерной геологии, метеорологии, гидрологии и др.; 3) заключения по результатам инженерно-геологических исследований отдельных строительных площадей и трасс; 4) материалы о деформации горных пород, происходящей под воздействием зданий и сооружений, а также сведения о состоянии последних.

Инженерно-геологические карты составляют на разгруженной топографической основе, где должны быть показаны горизонталями высотные отметки, гидрографическая сеть, главнейшие населенные пункты, дороги и другие объекты, имеющие инженерно-геологическое значение.

Общие принципы составления инженерно-геологических карт. За основу построения инженерно-геологических карт различных масштабов в настоящее время принимается принцип формационного и геолого-генетического анализа

---

* Согласно решению комиссий СЭВ по геологии, состоявшихся в 1964—1965 гг. в Берлине (ГДР), общие обзорные инженерно-геологические карты именуются схематическими, а карты среднего масштаба — мелкомасштабными.

Таблица 72

Схема инженерно-геологической классификации пород на картах (по И. В. Попову)

Категории пород	Что характеризует	Методы выявления	Значение при исследованиях	Значение при инженерно-геологических исследованиях и проектных работах
Формация	Возможные инженерно-геологические группы пород и геолого-генетические комплексы и основные черты химико-минералогического, структурного и текстурного характера пород формации	Геологическая съемка в мелком масштабе на стратиграфической, формационной и петрографической основе	Определяет характер возможных природных и вызванных строительством геологических процессов; служит основой для разделения пород и их строительной оценки на общих обзорных картах и дает общую основу для выбора методики полевых геологических работ (съемки и разведки)	Совместно с тектоническими данными являются основой для выделения инженерно-геологических регионов
Геолого-генетические комплексы	Тип залежей. Возможные литологические типы, типы их текстур; некоторые структурные черты. Возможность присутствия нестойких компонентов	1. Геологическая и петрографическая съемка 2. Фациальный анализ	Определяет системы разведочных работ (частота и расположение выработок), необходимую частоту отбора образцов и признаки для выделения пород на общих обзорных инженерно-геологических картах	Определяет: 1) степень и характер пестроты комплекса пород; 2) выдержанность свойств отдельных пород; 3) возможные строительные типы пород
Петрографический или литологический тип	Химико-минералогический состав, структуру, текстуру, характер и степень эпигенеза и типы залегания	Химико-минералогический и петрографический анализы	Определяет: 1) комплекс исследований пород—вопросы, требующие лабораторных опытов, их методику, метод отбора образцов; 2) признаки для выделения и строительной оценки пород на специальных обзорных инженерно-геологических картах	Определяет; 1) в первом приближении характер деформаций пород и нужные для расчетов показатели; 2) в первом приближении прогноз химической и физико-химической нестойкости пород и возможность агрессивности пород
Инженерно-геологический или строительный вид	Детально петрографический характер породы, определяющий строительные свойства пород	1. Детальный химико-минералогический и петрографический анализ. 2. Лабораторные определения количественных показателей физико-технических свойств пород для установления расчетных показателей, механических и других свойств косвенными методами. 3. Лабораторные опытные исследования	Определяет: 1) методику прямых определений расчетных показателей свойств пород, уточняющих их характеристику химико-минералогических и физико-технических исследований; 2) признаки для выделения и строительной оценки пород на картах в разрезах средней детальности. Для пород одного вида устанавливаются обобщенные и расчетные показатели свойств пород с коэффициентами вариаций, удовлетворяющими требованиям проектного задания	Позволяет давать расчетные схемы, производить приближенный расчет устойчивости сооружения и давать прогноз инженерно-геологических процессов на стадиях проектирования до проектного задания
Инженерно-геологическая или строительная разновидность	1. Вариации в составе, строении и состоянии породы, вызванные процессами гипергенеза, внешней геодинамики и тектоническими процессами, а также хозяйственной и технической деятельностью человека. 2. Количественные показатели технических свойств пород с точностью, достаточной для всех технических расчетов	1. Уточненные химико-минералогические, литологические и физико-технические исследования. 2. Прямое (экспериментальное) установление показателей для расчета	Служит признаком для выделения и строительной оценки пород на детальных инженерно-геологических картах и разрезах крупного масштаба (от 1 : 2000 до 1 : 1000)	Позволяет производить расчеты для технического проекта
Инженерно-геологические группы *	Механическую и гидравлическую модель комплекса пород, слагающих толщу строительных грунтов (мощность зависит от характера сооружений)	Грубо ориентировочное петрографическое описание	1. Определяет методы горных, буровых и опытных работ при разведке. 2. Служит признаком для выделения и строительной оценки подрайонов на инженерно-геологических картах	Определяет принципы и схему статических, гидравлических и других расчетов при проектировании

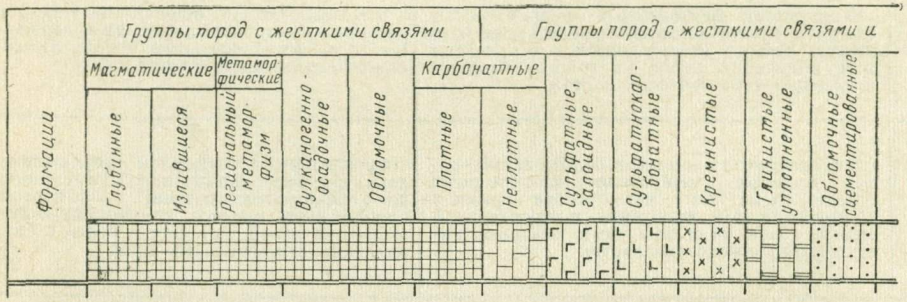
* Выделяются при отсутствии возможности разделения на карте и разрезах и при составлении расчетных схем пород по петрографическим признакам.

строения территории. На карте необходимо отразить инженерно-геологическую характеристику пород до глубины, соответствующей глубине их освещения геологическими картами того же масштаба.

На инженерно-геологических картах в зависимости от масштаба показываются в различном сочетании следующие характеристики: распространение, состав, свойства, возраст, генезис и условия залегания горных пород; характеристика подземных вод; рельеф и геоморфологические данные; современные геологические процессы и явления; инженерно-геологические процессы.

На основе анализа геологического строения и геологической истории района на инженерно-геологических картах выделяются геологические формации, генетические комплексы, петрографические типы и т. д.

Формации, геологогенетические и их инженерногеологичес



Геологические формации и входящие в них геолого-генетические комплексы пород, близкие по составу, объединяются в инженерно-геологические группы, которые характеризуют типы связи между частицами пород, свойства пород — прочность, деформируемость, водопроницаемость, а также возможность возникновения в породах тех или иных современных геологических процессов.

Геолого-генетические комплексы разделяются на петрографические типы, инженерно-геологические виды и разновидности пород (Попов, 1959; табл. 72).

Геолого-генетические комплексы пород, отнесенные к соответствующим инженерно-геологическим группам, дополненные характеристиками подземных вод и современных геологических процессов, приобретают новое инженерно-геологическое содержание, а поэтому могут быть названы инженерно-геологическими комплексами.

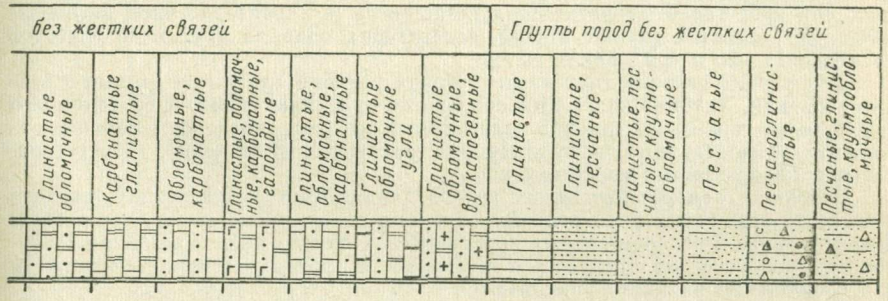
Геолого-генетические комплексы подразделяются на свиты, пачки и слои. Свиты характеризуются сходными условиями образования осадков, их фациально-литологическим составом и возрастом пород. Свита может состоять целиком из однородных пород или, сохраняя преобладание одной породы, включать повторяющиеся прослои других пород (например, сланцы, переслаивающиеся с пачками песчаников), свита, наконец, может иметь пестрый состав. Пачки (подсвиты) характеризуются однородным составом на значительных пространствах, отсутствием перерывов и угловых несогласий. Слои, выделяемые внутри пачки, должны быть однородны по составу слагающих их пород. Выделение формаций дает возможность прогнозировать общие инженерно-геологические особенности слагающих их пород, предусмотреть наиболее вероятные сочетания слагающих формацию комплексов горных пород и их физико-механические свойства, а также характер приуроченных к ним подземных вод и основных геологических процессов.

На карте должны быть отображены показатели гидрогеологических условий: глубина залегания подземных вод от поверхности, напоры водоносных горизонтов, степень и характер агрессивности вод, химический состав и т. д.; геоморфологические условия: уклоны поверхности, ее пересеченность, характер рельефа и его формы (абсолютные высоты, относительные превышения, степень расчлененности, к[illegible]ртизна рельефа, базис эрозии). Современные геологические процессы, важне[illegible]ими из которых являются: оползни, обвалы, карст, сели, просадки, пучени[illegible], мерзлотные проявления, заболоченность, солифлюкция, сейсмичность, эрозия и т. д. Закономерность образования процессов и явлений в основном приурочивается к ландшафтно-географическим зонам и поясам.

Содержание инженерно-геологических карт. На общих обзорных инженерно-геологических картах масштаба менее 1 : 500 000 должны быть отражены: распространение и возраст формаций и комплексов горных пород, их состав

Таблица 73

комплексы дочетвертичных пород
кие группы и подгруппы

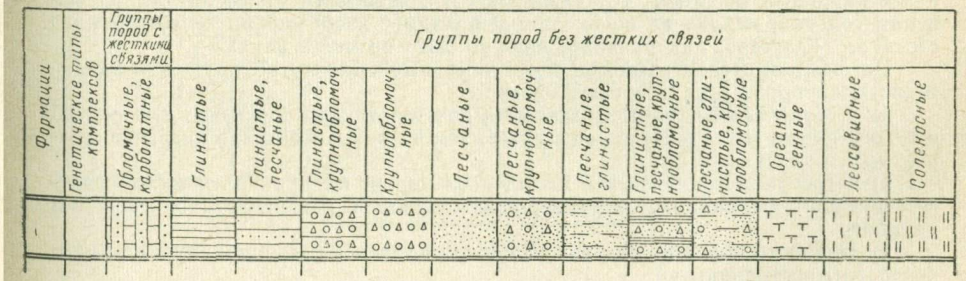


и генезис; принадлежность комплексов пород к различным инженерно-геологическим группам (табл. 73, 74); глубина залегания, напорность и агрессивность подземных вод; площади развития современных геологических процессов, а также главнейшие в инженерно-геологическом отношении региональные и зональные характеристики природных условий.

На инженерно-геологические карты наносятся геолого-генетические комплексы пород, объединенные в инженерно-геологические группы, отличающиеся по характеру связи между частицами входящих в них пород, а следовательно, по их свойствам: прочности, деформируемости, водопроницаемости, возможности возникновения и распространения современных геологических процессов. Указываются условия устойчивости пород в основаниях сооружений. Каждый

Таблица 74

Формации, геологогенетические комплексы четвертичных пород и их инженерногеологические группы и подгруппы



из выделенных геолого-генетических комплексов в зависимости от характера преобладающих пород (скальных, связных, песчаных) относится к той или иной инженерно-геологической группе пород.

На обзорных инженерно-геологических картах среднего масштаба (от 1 : 200 000 до 1 : 100 000) для равнинных территорий рекомендуется показывать верхние и подстилающие геолого-генетические комплексы пород.

Инженерно-геологическое содержание этих карт требует более детального расчленения пород, т. е. разделения геолого-генетических комплексов пород на свиты, пачки и слои, а также и более детального отражения других показателей. При составлении карт этого масштаба используются результаты определений количественных классификационных показателей физико-механических свойств пород, детализации гидрогеологических условий и полевых опытных исследований.

На инженерно-геологических картах масштаба 1 : 50 000—1 : 25 000 должны быть отражены: распространение, генезис, возраст, состав и характер залегания двух или трех геолого-генетических комплексов (с характеристикой петрографических разностей горных пород), залегающих один на другом до глубины не менее 15—20 м (рис. 56).

Для характеристики гидрогеологических условий требуются данные о распространении, глубине залегания первого от поверхности земли безнапорного водоносного горизонта, глубине залегания и высоте напора воды первого напорного горизонта, имеющего инженерно-геологическое значение, об агрессивности и коррозионных свойствах вод.

Описание геоморфологических условий включает характеристику генезиса и возраста различных форм рельефа, строения поверхностей и уступов надпойменных террас и водораздельных пространств. С целью оценки развития современных геологических процессов и возможности прогноза степени их опасности для сооружения на карте указываются площади их развития.

К картам прилагают таблицы, обобщенные графики, разрезы и колонки, содержащие результаты определения инженерно-геологических свойств пород. В таблицах и на графиках приводят состав и физико-механические свойства горных пород по результатам визуальных, опытно-полевых и лабораторных определений.

При составлении инженерно-геологических разрезов для инженерно-геологической карты или для отдельных ее листов строят один или несколько инженерно-геологических разрезов. Такие разрезы составляют через всю площадь карты в меридиональном и широтном направлениях в соответствии со стратиграфической схемой, принятой для данной территории. Инженерно-геологические разрезы должны строго соответствовать карте и отображать особенности стратиграфического подразделения территории.

На разрезах показывают опорные разведочные выработки с нанесением глубины появления воды и установившихся уровней, а также границы элементов инженерно-геологического районирования территории. Горизонтальный и вертикальный масштабы устанавливают в зависимости от амплитуды расчленения рельефа, исходя из необходимости четкого изображения геологического строения. Разрезов, как правило, должно быть не менее двух.

На сводной стратиграфической колонке с инженерно-геологической характеристикой пород (рис. 57) показывают:

а) стратиграфические подразделения дочетвертичных (до яруса или свиты) и четвертичных (до отдела) пород с указанием их наименований и индексов (возрастных и генетических);

б) петрографический состав комплексов пород, их принадлежность к соответствующим формациям, структурным этажам и инженерно-геологическим группам:

в) мощность пород в пределах каждого комплекса (максимальную или наиболее распространенную);

г) описание состава пород каждого подразделения.

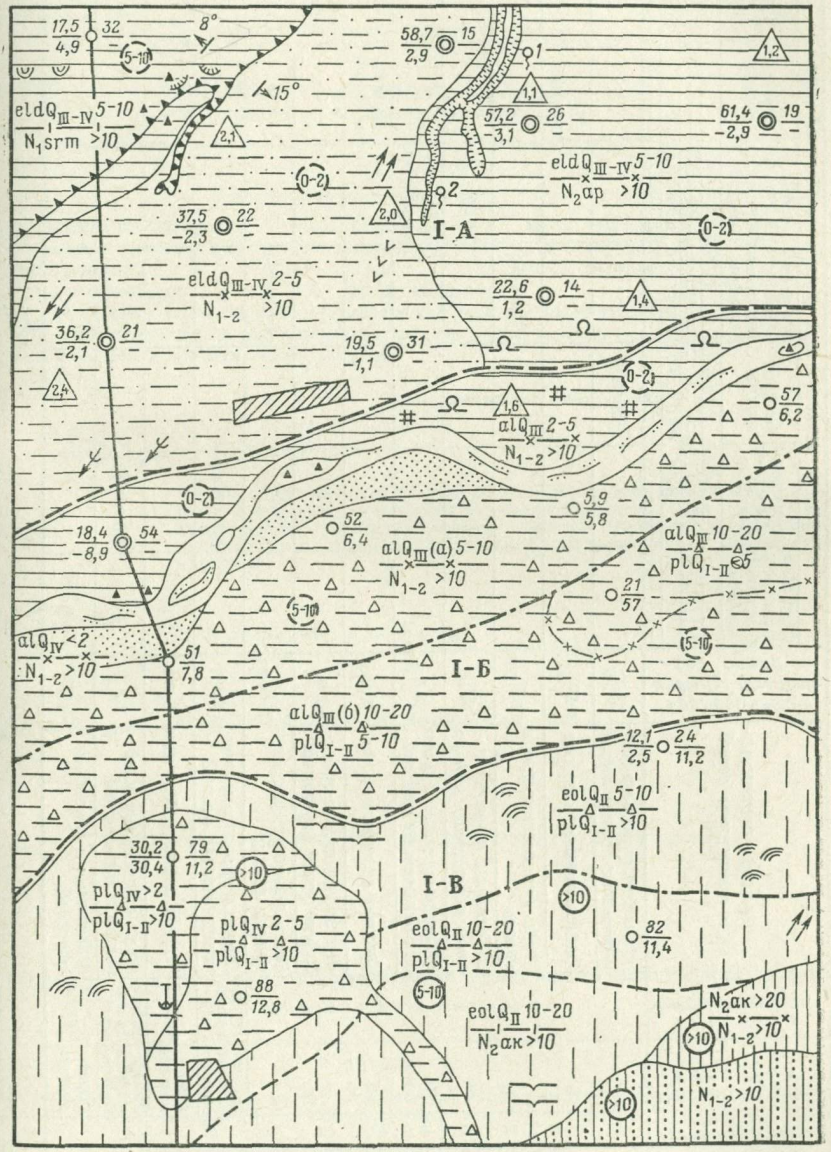
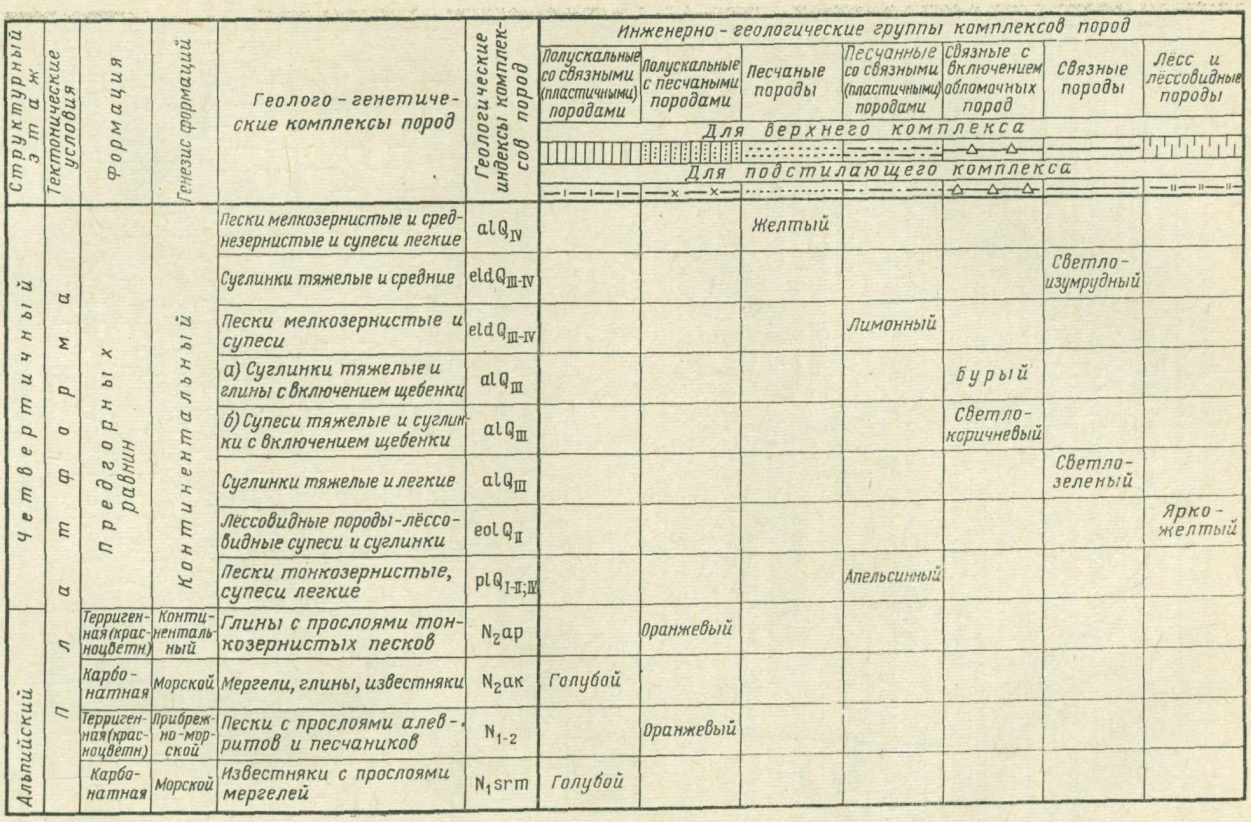


Рис. 56; а



Структурный этаж	Тектонические условия	Формация	Генезис формаций	Геолого-генетические комплексы пород	Геологические индексы комплексов пород	Инженерно-геологические группы комплексов пород: Полускальные со связными (пластичными) породами	Полускальные с песчаными породами	Песчаные породы	Песчаные со связными (пластичными) породами	Связные с включением обломочных пород	Связные породы	Лёсс и лёссовидные породы
						Для верхнего комплекса						
						Для подстилающего комплекса						
Четвертичный	Платформа	Предгорных равнин	Континентальный	Пески мелкозернистые и среднезернистые и супеси легкие	alQ_{IV}			Желтый				
				Суглинки тяжелые и средние	$eldQ_{III-IV}$						Светло-изумрудный	
				Пески мелкозернистые и супеси	$eldQ_{III-IV}$				Лимонный			
				а) Суглинки тяжелые и глины с включением щебенки	alQ_{III}					Бурый		
				б) Супеси тяжелые и суглинки с включением щебенки	alQ_{III}					Светло-коричневый		
				Суглинки тяжелые и легкие	alQ_{III}						Светло-зеленый	
				Лессовидные породы-лёссовидные супеси и суглинки	$eolQ_{II}$							Ярко-желтый
				Пески тонкозернистые, супеси легкие	$plQ_{I-II;III}$				Апельсинный			
Альпийский		Терригенная (красноцветн)	Континентальный	Глины с прослоями тонкозернистых песков	N_2ap		Оранжевый					
		Карбонатная	Морской	Мергели, глины, известняки	N_2ak	Голубой						
		Терригенная (красноцветн)	Прибрежно-морской	Пески с прослоями алевритов и песчаников	N_{1-2}		Оранжевый					
		Карбонатная	Морской	Известняки с прослоями мергелей	N_1srm	Голубой						

Рис. 56, б. Макет инженерно-геологической карты с условными обозначениями (составили М. В. Чуринов, В. П. Лазарева)

Гидрогеологическая характеристика

0-2 2-5 5-10 >10 *глубина залегания подземных вод, м*

Агрессивность (показывается различным типом кружков глубин залегания подземных вод)

общекислотная, pH меньше 7 *агрессивность не изучена*

Геологические явления

оползни действующие *просадки* *заболачивание*
карст (закрытый) *солончаки* *пучение*
суффозия *сели* *талики*
солифлюкция *заовраживание*
площади распространения перелетков мерзлых пород мощностью до 5 м
средняя мощность сезонно-оттаивающего слоя в метрах (по отдельным точкам)
участки развития жильных льдов

Дополнительные обозначения

$\frac{al\ Q_{III}\ 2\text{-}5}{pl\ Q_{I\text{-}II}\ >10}$

Геологические индексы комплексов и интервалы их мощностей: числитель — верхнего, знаменатель — подстилающего. На черте делителя дроби соответствующим знаком указывается инженерно-геологическая группа, к которой принадлежит подстилающий комплекс,

I — граница региона и ее номер,

I-В — граница области и ее показатель,

граница района (инженерно-геологического комплекса),

граница между комплексами пород, залегающими вторыми от поверхности,

граница между комплексами пород различной мощности, залегающими первыми от поверхности,

то же, между вторыми от поверхности,



угол падения (откоса),



линия разреза,



овражно-балочная сеть,



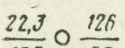
оползни



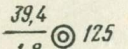
здания деформированные



источник



Опорная скважина. Справа в числителе — ее номер, в знаменателе — глубина залегания первого от поверхности горизонта, грунтовых вод, слева в числителе — глубина залегания первого от поверхности напорного горизонта, в знаменателе — высота напора воды. Закраска значка характеризует третий от поверхности комплекс пород, цифра под значком указывает его пройденную мощность. Значок, закрашенный цветом пород верхнего комплекса, показывает, что третий комплекс выработкой не вскрыт. Величины даны в метрах.



Опорная скважина в многолетнемерзлых породах, справа—ее номер, слева в числителе — мощность мерзлых пород, в знаменателе — их температура

При большом разнообразии четвертичных отложений должна быть составлена принципиальная схема соотношений.

На крупномасштабных инженерно-геологических картах (от 1 : 10 000 и крупнее) приводятся данные о рельефе горных пород, подземных водах и современных геологических процессах. На карте дают обобщенные изображения природных факторов, наиболее важных для всех видов строительства, отобранных и характеризуемых в соответствии с требованиями проектирования. Следует указать распространение, состав и расчетные показатели инженерно-геологических свойств пород, распространение и глубину залегания подземных вод первого от поверхности водоносного горизонта, характер современных геологических и инженерно-геологических процессов, имеющих инженерно-геологическое значение.

Современные геологические процессы характеризуются отображением распространения различных морфологических типов и степени активности их проявления.

В некоторых случаях составляются вспомогательные карты: 1) карта-срез на определенной глубине; 2) карта-срез на определенной отметке, 3) карта-срез по кровле определенного стратиграфического горизонта или определенной стратиграфической поверхности; 4) карта мощностей пород; 5) карты, детализирующие данные о породе, составе и их свойствах, т. е. не подлежащие изображению на карте инженерно-геологических условий; 6) карты, детализирующие сведения о различных геологических процессах; 7) карты, отображающие состояние сооружений, подвергшихся деформации под давлением инженерно-геологических процессов.

На картах инженерно-геологического районирования наиболее крупные единицы территории обычно подразделяют: на регионы — по геоструктурным признакам; на области — по геоморфологическим показателям; на районы — по комплексам горных пород и на участки — по одному из характерных для данной территории факторов. Выделение регионов должно отражать распределение определенных типов формаций, принадлежность последних к соответствующему структурному этажу и участие их в том или ином тектоническом цикле складчатости, т. е. должно показывать основу формирования инженерно-геологических условий территории. Крупные геоморфологические элементы в пределах региона являются областями первого порядка.

На карте масштаба 1 : 1 000 000 (рис. 58) показывают районирование территории для инженерно-геологических целей. В условных обозначениях к карте приводят краткое описание регионов и областей, границы регионов наносят на карту черной линией. Номер региона обозначают римской цифрой черного цвета, границы областей показывают более тонкой пунктирной линией, внутри контура ставят прописную русскую букву, обозначающую данную область.

На карте различной штриховкой показывают инженерно-геологические группы (см. табл. 73, 74). Современные геологические процессы и явления обозначают внемасштабными знаками. Для каждого выделенного на карте геолого-генетического комплекса указывают глубину залегания первого от поверхности земли водоносного горизонта.

В зависимости от масштаба карты, структурных и геоморфологических особенностей региона и области первого порядка территорию можно подразделять на регионы и области второго и третьего порядков. Районы, выделяемые внутри областей, соответствуют площадям распространения инженерно-геологических комплексов горных пород со сходной характеристикой подземных вод, схожими формами рельефа, условиям залегания пород и их мощности, сходством геологических и инженерно-геологических процессов. На картах среднего и крупного масштабов в условных обозначениях приводят рекомендации по инженерно-геологическим мероприятиям, необходимым при подготовке территории для строительства.

Во ВСЕГИНГЕО в 1971 г. на основе инженерно-геологического районирования путем объединения сходных по инженерно-геологическим условиям разобщенных регионов дана типизация территории.

Инженерно-геологическая типизация или типизация инженерно-геологических условий территории СССР представляет собой завершающий этап анализа формирования этих условий, выполняемых при инженерно-геологическом районировании.

Инженерно-геологическая типизация территории СССР выполнена на основе инженерно-геологического районирования по принципу сочетания факторов: преимущественное распространение горных пород определенного состава и свойств, неотектонических и геоморфологических условий и преобладающего развития современных экзогенных геологических процессов с учетом ландшафтно-географических зон.

Карту инженерно-геологического районирования и карту инженерно-геологических условий можно совмещать и показывать на одном листе.

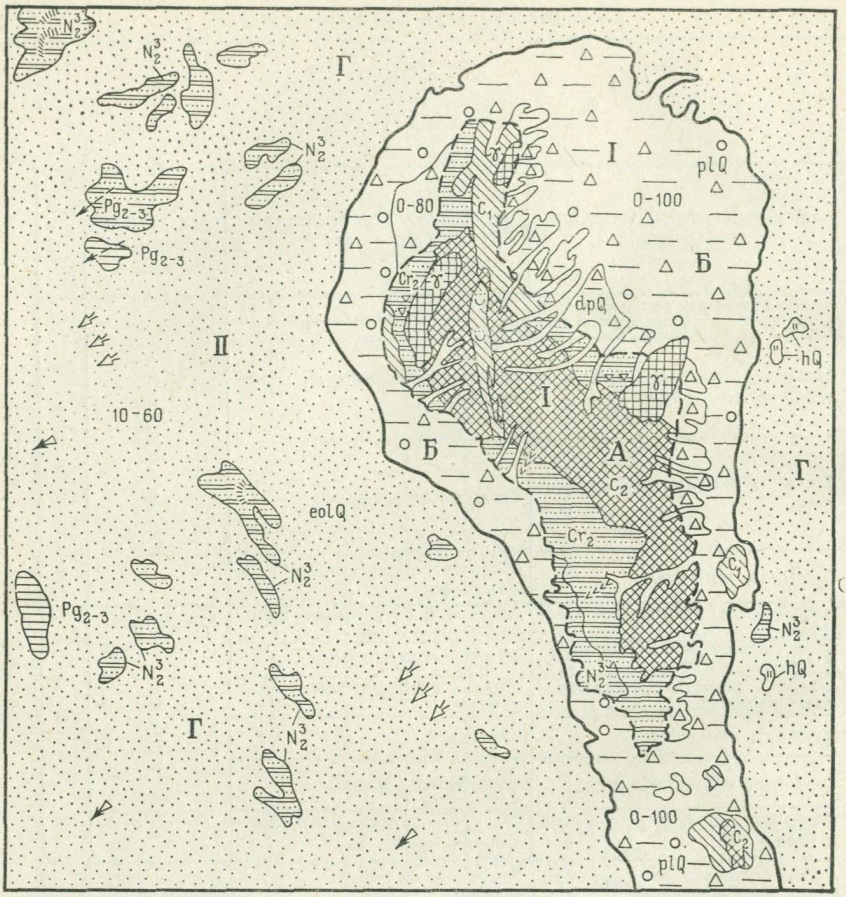
Инженерно-геологические карты специального назначения составляют в соответствии с особенностями инженерно-геологических условий строительства

Группа	Система	Отдел	Ярус	Свита	Стратиграфические индексы	Максимальная мощность	Колонка	Краткое петрографическое описание пород
Кайнозойская	Четвертичная					2-5		Суглинки, глины и пески с супесями
						0-2		
					alQ_{IV}	0-20		Суглинки и глины со щебнем и пески с супесями
					$eldQ$	5-20		
						2-10		
					$dplQ$	2-5		Суглинки со щебнем
					alQ_{III}	5-20		Суглинки и глины с прослоями супесей и песков
					$eolQ_{III}$	5-10		Лёссовидные породы
					plQ_{I}	0-10		Пески, супеси, суглинки и галечники
	Неогеновая	Плиоцен	Апшеронский		N_2ap	>10		Глины с прослоями песков т/з
			Акчагыльский		N_2ak	>20		Мергели, глины, известняки
		Миоцен	Сарматский		N_1srm	>10		Известняки, мергели
				Аральская	N_1ar	2-5		Конгломераты, песчаники с т/з песками и глина
	Палеогеновая	Олигоцен		Чимектанская	Pg_3cm	0-5		Глины с незначительными прослоями мергелей
Мезозойская	Меловая	Нижний	Неоком		Cr_1nc	>20		Известняки с незначительными прослоями глин

Рис. 57. Сводная стратиграфическая колонка з

Геолого-генетические комплексы пород	Инженерно-геологические группы	Геологическая формация	Структурный этаж
Суглинки тяжелые, глины пылеват.	Связные	Полупустынь	Четвертичный
Пески м/з и супеси	Песчаные		
Суглинки тяжелые и глины пылеватые со щебнем	Связные с включением обломочных		
Пески м/з и супеси со щебнем	Песчаные со связными		
Суглинки тяжелые	Связные с включением обломочных		
Суглинки пылеватые со щебнем	Связные с включением обломочных	Предгорная	
Супеси тяжелые и суглинки с прослоями песков	Связные с песчаными	Полупустынь	
Суглинки тяжелые с включением щебенки	Связные с включением обломочных		
Суглинки тяжелые	Связные		
Суглинки лёссовидные	Лёссовидные породы		
Пески т/з, супеси, галечники и пески	Песчаные со связными, галечники и пески		
Глины уплотненные с редкими прослоями г/з песков	Пластичные породы с песчаными	Терригенная (красноцветная)	Альпийский
Мергели глинистые с тонкими прослоями известняка	Полускальные с пластичными	Терригенно-карбонатная	
Известняки слоистые мергелистые с прослоями мергелей	Полускальные	Карбонатная	
Конгломераты с известковым цементом	Полускальные с пластичными	Терригенная (красноцветная)	
Глины с прослоями мергелей	Пластичные		
Известняки массивные рифовые с редкими прослоями глин	Скальные с пластичными	Карбонатная	

инженерно-геологической характеристикой



Современные геологические процессы

Обвалы и осыпи	Овражкообразование	Движение песков
Кора выветривания глинистая	Развевание	Такырообразование
Карст	Выдувание	Засоление

Характер подземных вод

10-60 - крайние пределы глубины залегания, м

Дополнительные знаки

I — Границы региона и его номер

I-А — Границы области и её показатель

Границы района (инженерно-геологического комплекса)

Регион I - Центральное Пятнякское поднятие

Область А - денудационные склоны (различной крутизны), предопределенные препарированием древних антиклинальных и моноклинальных структур

Область Б - пологие поверхности пролювиальных шлейфов

Регион II - Северо-Пятнякская синеклиза

Область Г - пласто-структурно-денудационная перевеянная равнина

Рис. 58. Макет карты инженерно-геологического районирования

и сооружений. Они могут быть разнообразны по своему содержанию. На эти карты наносят основные инженерно-геологические компоненты; породы и их свойства, подземные воды, геологические процессы, рельеф и т. п., учитывая требования конкретного вида строительства или нескольких однородных видов.

Инженерно-геологические карты специального назначения можно составлять в любом масштабе.

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Инженерно-геологические работы проводятся для обоснования и проект ирования гидротехнических сооружений, ирригационных и осушительных мероприятий, промышленного и коммунального строительства, строительства метрополитенов, тоннелей, планировки и реконструкции городов, железных и автомобильных дорог и прочих объектов.

Инженерно-геологические работы на различных этапах проектирования сооружений сочетаются с буровыми, горными, геофизическими, геохимическими, топографо-геодезическими, маркшейдерскими работами.

Инженерно-геологические работы разделяются на инженерно-геологическое картирование, инженерно-геологические съемки, инженерно-геологические изыскания и многолетние стационарные наблюдения, связанные с изучением геологических процессов.

Инженерно-геологические исследования проводятся по программе и проектам работ, составленным в соответствии с техническим заданием на производство исследований. Программу и проект работ составляют руководитель работ и основные исполнители. Непосредственному составлению программ и проектов предшествует сбор и изучение литературных, фондовых и архивных материалов по району работ. В программе и проекте работ в соответствии с заданием должны быть определены сроки, очередность, состав, объемы и методика работ, а также площадь, подлежащая изучению. В программе и проекте указывают масштаб и площадь съемки, определяемые с учетом конкретной задачи, освещают условия проведения съемочных работ, приводят краткую характеристику геологического строения и инженерно-геологических условий района, степень проходимости и обнаженности, а также основные результаты дешифрирования имеющихся аэрофотоматериалов. В проекте определяют также состав и объемы необходимых горно-буровых, опытных геофизических, геоботанических и других работ, а также излагают методику их проведения.

Проект должен быть кратким, четким, ясным и содержать необходимые сведения для составления сметных расчетов. Обязательной частью проекта является смета, ее составляют на весь объем работ по «Справочнику укрупненных норм для проектирования геологоразведочных работ» (Гидротехнические и инженерно-геологические работы, вып. II, 1960).

Для проведения инженерно-геологических работ организуются отряд, партия или экспедиция в зависимости от размеров территории и объема исследований. Основной производственной единицей, исполняющей инженерно-геологические работы, является инженерно-геологическая партия. Многолетние работы по изучению геологических процессов производят оползневые, карстовые, мерзлотные и другие постоянные или временные станции. Для составления сводных региональных инженерно-геологических карт и очерков организуются тематические партии. Инженерно-геологические партии и станции могут объединяться в экспедиции.

При определении нужного количества партий для выполнения того или иного объема разведочных инженерно-геологических изысканий следует учитывать: размеры территории, на которой производятся работы; факторы, определяющие условия передвижения по территории работ, — рельеф, залесенность.

наличие и состояние дорог, средства связи, необходимые для ежедневного контроля и руководства на всех участках работ партии.

В составе инженерно-геологических партий и станций, проводящих несколько видов работ, могут быть организованы отряды в зависимости от объемов работ. При экспедиции обычно организуют лаборатории для изучения физико-механических и химических свойств пород и состава подземных вод, а также ремонтно-механические и материально-транспортные базы. В состав инженерно-геологической экспедиции могут входить также специальные партии: геологическая, гидрогеологическая, геоморфологическая, геофизическая, геоботаническая и др.

При составлении проекта работ по инженерно-геологическим исследованиям для конкретных объектов строительства необходимо изучать имеющийся опыт проектирования и строительства. Основными задачами этого изучения являются: а) выяснение распространения, характера и условий возникновения, а также прекращения различных инженерно-геологических процессов; б) прогноз инженерно-геологических процессов и явлений при перспективных инженерных мероприятиях на исследуемой территории.

Для решения этих задач собирают сведения, характеризующие:

1) типы, материалы, а также обычные предельные глубины заложения фундаментов и других подземных частей разного названия зданий и сооружений, на различных участках исследуемой территории в различных комплексах пород; 2) проектные и фактические напряжения, возникающие в основаниях вышеуказанных зданий и сооружений; 3) применявшиеся способы производства работ при постройке и эксплуатации подземных частей зданий и сооружений, а также сооружений, возводимых из грунта; 4) наличие, характер, размеры деформаций зданий, сооружений, инженерно-геологических коммуникаций и дневной поверхности в процессе строительства и эксплуатации (осадки, просадки, трещины, порча гидроизоляции, засорение дренажей, утечки воды из водопроводной и водосточной сетей, а также из искусственных водоемов и т. п.); 5) поведение отдельных комплексов пород при вскрытии их строительными выработками в различных условиях обводненности и в различные сезоны года; 6) применявшиеся профили и типы укреплений грунтовых откосов, а также кратковременной и долговременной устойчивости последних при различных режимах влажности и нагрузки; 7) случаи агрессивности действия подземных и поверхностных вод на бетонные сооружения, а также случаи коррозии подземных частей металлических сооружений; 8) случаи всякого рода затруднений и осложнений при строительстве и хозяйственном использовании территории, вызванные инженерно-геологическими условиями или расхождениями между проектной оценкой инженерно-геологических условий и фактическими данными.

Сбор этих сведений производится в самых различных организациях, руководящих строительством. Наиболее интересные проявления инженерно-геологических процессов должны быть изучены на месте с проведением необходимых измерений, зарисовок и фотографирования. При этом должны быть по возможности выяснены причины возникновения и прекращения этих явлений. Для каждого отмеченного явления должны быть указаны: а) местоположение с точностью, позволяющей нанести его на план или карту, масштаб которых определяется задачей исследований; б) связь явлений с тем или иным комплексом пород; в) даты возникновения, прекращения и описания явления; г) источники получаемых сведений.

При наличии на том или другом участке групп однородных инженерно-геологических явлений последние в зависимости от конкретной задачи исследований можно описывать по группам, не описывая каждое явление в отдельности, но отмечая количество и густоту расположения явлений каждого типа. Сведения, перечисленные выше, должны заноситься в специальный журнал в порядке поступления.

IV. РАЗВЕДОЧНЫЕ БУРОВЫЕ РАБОТЫ

Задачей разведочных работ при инженерно-геологических исследованиях является изучение геологического строения и свойств горных пород. Разведочные работы осуществляются путем бурения скважин, проходки горных выработок, производства геофизических и некоторых других исследований.

Проходка горных выработок имеет преимущества перед бурением, обеспечивая бо́льшую детальность изучения пород. Однако она является более дорогостоящей, чем бурение, и вызывает затруднения при разведке водоносных, неустойчивых и скальных пород. Геофизическая разведка весьма производительна, но она требует для обеспечения ведения некоторого объема буровых работ необходимой точности.

При бурении применяются следующие основные способы: ударно-канатный, ударно-вращательный, колонковый, вибрационный и шнековый, в редких случаях используется также роторный способ. Во всех этих способах процесс бурения механизирован, лишь при ударно-вращательном бурении применяется в ряде случаев ручной труд, хотя созданы механические станки и для этого способа бурения.

Применение того или иного способа бурения определяется следующими основными условиями:

1. Ударно-канатное бурение рекомендуется применять для разведки различных рыхлых пород, скальных и полускальных, а также в тех случаях, когда не требуется изучать структуру и механические свойства пород.

2. Ударно-вращательное бурение можно применять в тех же случаях, что и ударно-канатное, но только в рыхлых породах; большим недостатком ручного бурения является его низкая производительность и высокая трудоемкость.

3. Колонковое бурение используют преимущественно в скальных и полускальных породах, его можно применять также в плотных связных и в рыхлых породах при условии использования глинистой промывки.

в. Вибрационный метод, как весьма производительный, применяется для проходки рыхлых пород, не содержащих значительной примеси крупнообломочного материала; применение его должно быть ограничено лишь той частью разведки, в задачу которой не входит изучение физико-механических характеристик пород в естественном состоянии.

5. Шнековое бурение также весьма производительно, но оно не обеспечивает точной характеристики разреза, его следует применять в случаях, требующих вскрытия забоя на более или менее значительную глубину без подробного изучения проходимых пород.

6. Роторное бурение имеет в общем те же достоинства и недостатки, что и шнековое, но по экономическим соображениям оно применяется лишь при больших диаметрах скважин (более 250 мм) и их значительной глубине (свыше 100 м).

Ударно-канатное, вибрационное и шнековое ударно-вращательное бурение при необходимости изучения механических свойств пород в естественном состоянии следует сопровождать отбором монолитов пород при помощи грунтоносов.

Начальные диаметры бурения определяются заданной величиной конечного диаметра, а также количеством перемен диаметра по глубине скважины. При необходимости отбора монолитов конечный диаметр скважины должен быть не менее 115 мм, а если отбора не требуется, то 75 мм. При бурении в породах, не обеспечивающих устойчивости стенок скважины, последнее закрепляют обсадными трубами или иным способом, обеспечивающим четкое расчленение пройденной толщи по составу и состоянию пород.

При бурении с обсадкой в породах, содержащих крупнообломочный материал, конечный диаметр скважины в зависимости от крупности обломков должен быть не менее 115—155 мм. При бурении скважин, предназначенных для производства опытных исследований, могут потребоваться конечные диаметры в 300 мм и более. В отдельных случаях для визуального изучения пройденной толщи проходят буровые скважины диаметром 1000—1350 мм.

Согласно приведенным выше соображениям, начальные диаметры бурения обычно принимаются следующие: при неглубоком (до 20—25 мм) бурения 111—131 мм, при глубоком — 151 мм, изредка до 189 мм.

При ударно-канатном бурении, когда разрушение породы на забое производится повторными ударами наконечника, подвешенного на канате, в качестве наконечника применяют в связных породах буровой стакан, в несвязных — желонку, а в скальных и полускальных породах — долото. Обычно наконечник утяжеляют ударной штангой.

Очистку забоя скважины от шлама производят желонкой. Образцы при ударно-канатном бурении отбирают либо из бурового стакана, либо из желонки, в последнем случае структурные свойства пород бывают полностью нарушены.

Процесс ударно-вращательного бурения состоит из разрушения породы на забое путем ударов бурового наконечника или его вращения, удаления продуктов этого разрушения из скважины и дальнейшего продвижения бурового инструмента, с обеспечением устойчивости стенок пройденного участка скважины.

При вращательном бурении в связных породах в качестве наконечника используют либо ложку (преимущественно в связных породах полутвердой и отчасти тугопластичной консистенции), либо змеевик (преимущественно в связных породах мягкопластичной и отчасти тугопластичной консистенции), которые несут вертикальную нагрузку веса колонны штанг. Продуктом разрушения в данном случае являются более или менее значительные по величине элементы породы, обычно в той или иной степени перемятые.

При колонковом бурении разрушение породы на забое производят прорезанием кольцевого канала при помощи вращения коронки колонковой трубы. Причем в центральной части забоя образуется ненарушенный столбик породы — керн. После образования керна достаточной длины его отрывают от массива и поднимают на поверхность.

Промывка скважины глинистым раствором обеспечивает одновременно поддержание устойчивости стенок скважины и вынос шлама, если раствор удовлетворяет следующим требованиям:

1) образовывает тонкую (0,5—1,0 мм) плотную корку на стенках скважины для предотвращения поглощения промывочной жидкости; 2) обеспечивает надлежащий вес столба жидкости в скважине для поддержания в ней равновесия при помощи гидростатического давления; 3) обеспечивает минимальное содержание свободной воды в суспензии с целью предотвращения набухания глин в стенках скважины; 4) имеет надлежащую вязкость и коллоидальный характер с тем, чтобы обеспечивать полный вынос шлама и не допускать осаждения последнего (зашламования) при остановке циркуляции жидкости; 5) обеспечивает получение качественных образцов проходимых пород.

Перечисленные требования бывают удовлетворены в тех случаях, когда глина, использованная для приготовления промывочного раствора, обладает высокой дисперсностью (как, например, бентонитовые глины), тиксотропностью и не содержит значительного количества фракий крупнее 0,005 мм. Контроль за качеством глинистого раствора и за его свойствами во время бурения устанавливают лабораторными методами, определяя его следующие параметры: 1) вязкость; 2) водоотдачу; 3) содержание фракций крупнее 0,005 мм; 4) суточный отстой; 5) толщу глинистой корки; 6) сопротивление сдвигу; 7) стабильность суспензии; 8) плотность; 9) концентрацию водородных ионов (pH); 10) содержание газов; 11) температуру.

Вместо промывки забоя применяется также продувка его сжатым воздухом. Продувка имеет следующие преимущества перед промывкой: 1) исключаются дополнительное увлажнение, а также размыв керна и забоя; 2) исключаются осложнения, возникающие при внезапной потере промывочной жидкости или при перерыве циркуляции (зашламовывание и т. п.); 3) не требуется доставка воды к скважинам; 4) исключается возможность загрязнения и увлажнения шлама, а также смешивание разностей шлама, вынесенных с разных горизонтов.

Продувание забоя наиболее целесообразно проводить в скважинах, не содержащих воду в жидком состоянии. Оно особенно эффективно в следующих условиях: а) в многолетнемерзлых; сильнокавернозных, трещиноватых или легкоразмываемых породах, б) в засушливых и безводных районах; в) при необходимости точной фиксации положения водоносных горизонтов.

При продувке можно применять буровые станки и колонковые трубы любой конструкции, оборудованные контрольно-измерительной арматурой, индикатором веса и манометрами. Буровые штанги берут возможно большего диаметра (50—63,5 мм) с муфто-замковыми соединениями. Штанги диаметром 42 мм применяются в виде исключения и лишь при бурении на глубину не более 100 м, применять штанги с ниппельными соединениями не рекомендуется. При глубине бурения до 300 м в трубах диаметром 91—112 мм давление воздуха не должно превышать 6—7 кгс/см^2.

Вибрационное бурение основано на принципе передачи буровому инструменту направленных колебаний, создаваемых вибропогружателем. Частота колебаний существующих вибропогружателей составляет от 1200 до 2000 в минуту, а амплитуда колебаний от 1,5 до 10 мм. Вибропогружатели применяются в двух вариантах: с жестким креплением к бурильным трубам и со свободным опиранием на специальную плиту — наковальню, в последнем случае вибропогружатель называют вибромолотом.

При шнековом способе бурения разрушение породы на забое производят вращающимся долотом, разрушенная порода транспортируется с забоя на дневную поверхность шнеками, представляющими собой единый винтовой транспортер. Геологическая документация при шнековом бурении затрудняется частичным перемешиванием разрушенной породы в процессе ее транспорта шнеками. Пробы можно отбирать при непрерывной или при периодической углубке скважины; при непрерывной углубке процесс бурения и выдача выбуренной породы совмещаются.

При периодической углубке скважины бурение производят с интервалами, после каждого интервала процесс углубки прекращают и всю выбуренную породу выдают вращающимися шнеками на дневную поверхность. Привязку отобранных образцов пород фиксируют по глубине пройденного интервала.

Проходку буровых разведочных выработок сопровождают тщательным осмотром, опробованием и описанием поднятых образцов пород.

При проходке разведочных выработок необходимо производить систематические наблюдения за временем проявления воды и за отметками ее уровней, а при бурении с промывкой — также за изменением расхода промывочной жидкости. При наличии газопроявлений следует тщательно документировать их глубину и характер.

V. КАМЕРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПОЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Первичную обработку полевых исследований и составление полевого отчета выполняют во время полевых работ, чтобы обеспечить своевременное внесение необходимых изменений в проект исследований, а также разрешить отдельные неясности и противоречия в первичных результатах исследований.

Полевой отчет содержит фактические данные о составе, сроках и объемах полевых исследований, а также о степени выполнения работы в целом и по отдельным видам. Основное внимание в полевом проекте должно быть обращено на освещение геологических результатов и новых данных об инженерно-геологических условиях изучаемой территории. К полевому отчету прилагаются полевые карты и разрезы, а также план и графика камеральных работ.

В процессе окончательной камеральной обработки систематизируют, проверяют и обобщают все материалы, полученные в результате полевых и лабораторных работ. При этом производятся детально визуальные и лабораторные исследования образцов горных пород, фауны, микрофауны и палеоботанического

материала, если таковые отбирались. Результаты лабораторных исследований каждого петрографического типа горных пород подвергаются надлежащему анализу и статистической обработке с выводом обобщенных характеристик.

Полевые журналы проверяют и дополняют краткими сведениями о результатах лабораторных исследований горных пород и воды, а также ссылками на картировочные выработки. Далее журналы оформляют, перепечатывают на машинке и разделяют по маршрутам. В журнале приводят номер маршрута и название, определяющее его направление.

Результаты проходки картировочных и используемых опорных выработок, выполненных для других целей, оформляют в виде каталогов, журналов и разрезов-колонок. Используемые аэрофотоматериалы подвергают дополнительному дешифрированию. Карту фактического материала окончательно сверяют и увязывают с данными полевых журналов.

На карте должны быть показаны: номера и линии выполненных маршрутов, обнажения, пункты наблюдений, опорные выработки и т. п. Нумерацию объектов на карте строго согласуют с полевыми журналами. Использованные исходные геологические, геоморфологические и гидрогеологические карты дополняют данными, полученными в результате выполненных исследований. Содержание отчетных материалов определяется условиями и целевым назначением инженерно-геологических работ и их детальностью (масштабом съемки).

К отчету прилагаются следующие основные документы: 1) обзорная карта исследуемой территории; 2) сводный стратиграфический разрез (колонка) дочетвертичной толщи, дополненный инженерно-геологическими характеристиками; 3) схема строения четвертичного покрова; 4) карты в масштабах проводимой съемки или генерального плана обосновываемого проекта: а) фактического материала исследований, б) геологическая (дочетвертичных пород), в) четвертичных отложений, г) геоморфологическая, д) инженерно-геологическая, е) карта инженерно-геологического районирования (при необходимости). В зависимости от нагрузки те или иные карты могут быть совмещены; 5) инженерно-геологические профили по характерным направлениям; 6) геологические разрезы (колонки) разведочных выработок и обнажений; 7) прочие графические документы, необходимые для обоснования или пояснения положений и выводов отчета. При крупных масштабах на основных картах должен быть показан план расположения проектируемых сооружений.

VI. ОПРОБОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Общие положения. Инженерно-геологическое опробование горных пород — это комплекс последовательных операций по определению состава, состояния и свойств пород.

Схема операций опробования отражена на рис. 59.

Опробование ведут при инженерно-геологических поисках и при разведке мест, выбранных для строительства сооружений. В первом случае опробование сосредоточивают на «ключевых» участках, а во втором — на площадках намечаемого строительства. Опробование проводят в несколько этапов (табл. 75).

В результате осуществления операций этапа рекогносцировочных работ должны быть получены данные для ориентировки системы опробования и для расчета ее параметров, т. е. расстояний между точками опробования (рис. 60).

При опробовании пород на ключевых участках системы опробования ориентируют по главным направлениям изменчивости *, а на площадках предпола-

* См. Г. К. Бондарик «Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород». М., «Недра», 1971.

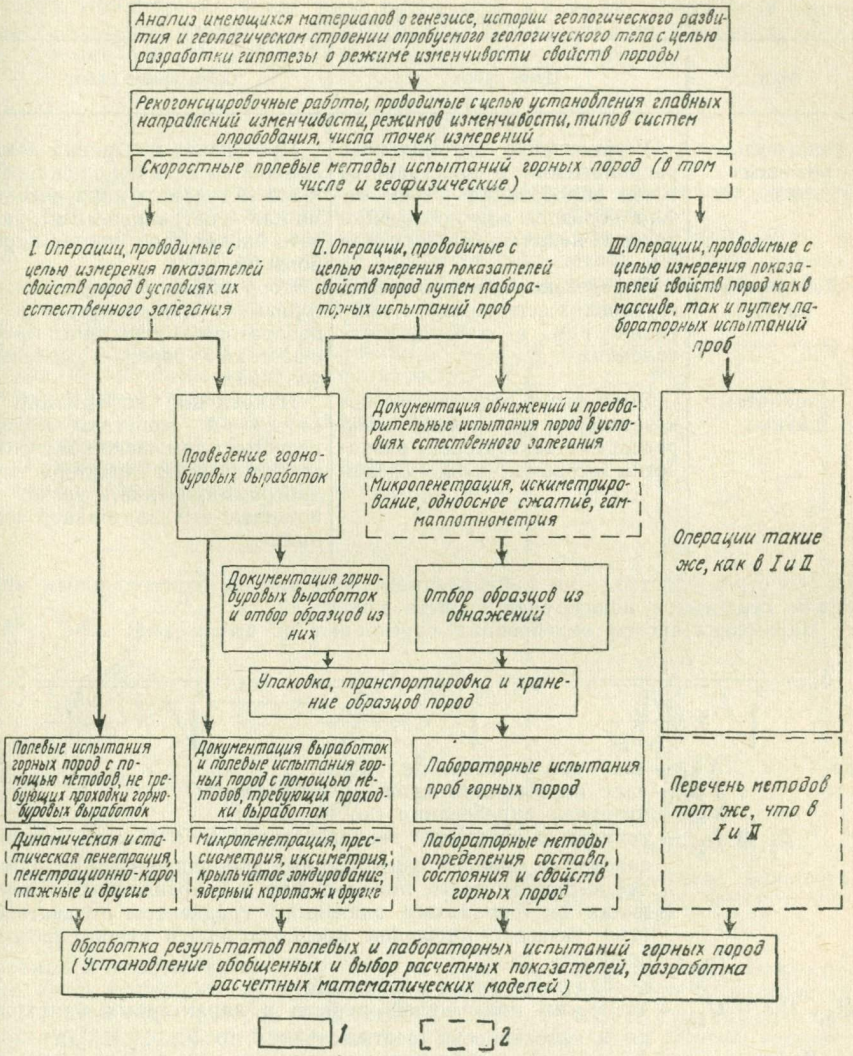


Рис. 59. Схема последовательных операций, выполняемых в процессе инженерно-геологического опробования

1 — название операций по опробованию; *2* — название методов, с помощью которых выполняют операции

Таблица 75

Этапы опробования

Этап	Цель работ	Содержание работ
Рекогносцировочных работ	Установление оптимального расположения в пространстве точек опробования (точек отбора образцов или проведения полевых испытаний) и их числа	Проведение измерения показателей свойств пород скоростными методами (геофизическими или пенетрационными), расчеты параметров систем опробования
Детальных работ	Определение свойств пород в условиях естественного залегания или в лабораторных условиях	Отбор образцов пород, консервация, транспортировка и лабораторные испытания проб; испытания пород в полевых условиях
Обработки данных	Вычисление обобщенных показателей и их оценок, выбор расчетных показателей, разработка математических моделей	Накопление информации о составе и свойствах пород, расчеты, в том числе получение статистических характеристик, программирование, расчет с помощью вычислительной техники

гаемого строительства — по направлениям, отвечающим экстремальным значениям градиентов показателей свойств пород.

Параметры систем опробования определяют из выражений:

$$\Delta\xi_1=\frac{L_{\xi_1}}{\sqrt[3]{n\frac{D^2_{\xi_1}}{D_{\xi_2}D_{\xi_3}}}},\quad \Delta\xi_2=\frac{L_{\xi_2}}{\sqrt[3]{n\frac{D^2_{\xi_2}}{D_{\xi_1}D_{\xi_3}}}},\quad \Delta\xi_3=\frac{L_{\xi_3}}{\sqrt[3]{n\frac{D^2_{\xi_3}}{D_{\xi_1}D_{\xi_2}}}},$$

где $\Delta\xi_1$ — шаг опробования по сносу;

$\Delta\xi_2$ — шаг опробования вдоль фронта сноса;

$\Delta\xi_3$ — интервал опробования (по глубине);

L_{ξ_1} и L_{ξ_2} — размеры опробуемого геологического тела (пласта, линзы, залежи) в главных направлениях изменчивости (при инженерно-геологических поисках) или в направлениях, отвечающих экстремальным значениям градиентов показателей (при разведке площадок предполагаемого строительства);

L_{ξ_3} — мощность тела;

n — необходимое число испытаний;

D_{ξ_1}, D_{ξ_2} и D_{ξ_3} — дисперсии показателей свойств в характерных направлениях изменчивости (соответственно по ξ_1, ξ_2 и ξ_3).

Число испытаний n устанавливают методом доверительных пределов по таблицам и номограммам достаточно больших чисел (рис. 61) или аналитически по формуле

$$n=\frac{t^2_\alpha\sigma^2}{\Delta^2},$$

где σ^2 — дисперсия показателя;

t_α — показатель, определяемый по таблице в зависимости от принятой вероятности α;

Δ — величина предельного отклонения выборочного среднего от генерального.

Для установления числа проб в процессе испытаний используют также последовательный анализ *, метод оптимальной выборки и др. По методу оптимальной выборки число испытаний определяют по формуле

$$n = \frac{max\ |\Delta R_n|}{E},$$

где max $|\Delta R_n|$ — наибольшее по абсолютному значению отклонение частного значения показателя от выборочного среднего;

E — заданная разность между математическим ожиданием и оценкой среднего значения (абсолютная точность, с которой получают оценку среднего значения показателя свойств по n определениям).

Н. В. Коломенский и И. Н. Иванова рекомендуют производить для получения обобщенных показателей состава и свойств глинистых пород 10—15 испытаний, а для параметров прочности — 20—25 опытов (при доверительной вероятности 0,75—0,99).

После расчета параметров системы опробования проводят детальные работы на об

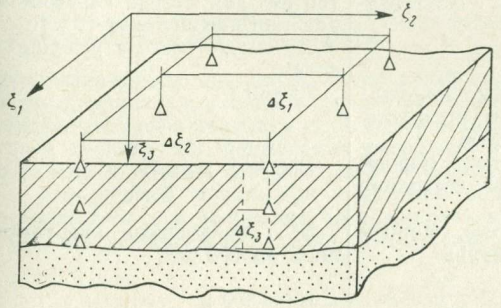


Рис. 60. Трехмерная система опробования

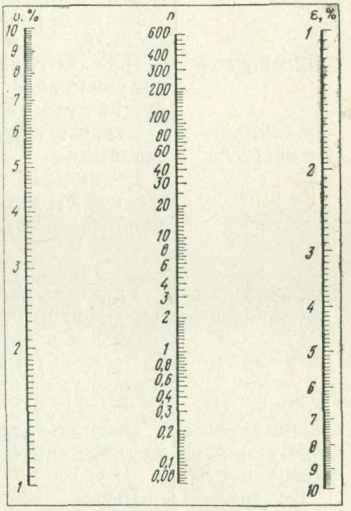


Рис. 61. Номограмма достаточно больших чисел при величине вероятности $P = 0{,}99$

нажениях и в выработках. При этом следует руководствоваться приводимыми ниже правилами: 1) опробование следует вести послойно; 2) опробуется каждый слой (линза) пород мощностью не менее 50 мм; 3) при опробовании в максимальной степени должны быть учтены геологические данные: генезис, геологическое строение, структурно-текстурные особенности пород и др.; 4) требования к надежности данных опробования повышаются для тех слоев, которые оказывают наибольшее влияние на несущую способность и устойчивость основания.

Отбор образцов пород нарушенного сложения и монолитов. При отборе образцов горных пород для инженерно-геологических целей рекомендуется применять три способа отбора: точечный, бороздовый, валовой.

Основным способом отбора проб является точечный способ. Бороздовый и валовой способы применяются для отбора образцов с нарушенным сложением,

* См. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению пород. Т. I. Изд во МГУ, 1968.

Таблица 76

Объем и масса инженерно-геологических проб

Показатели состояния и физико-механических свойств пород	Состав и состояние породы	Количество (масса или объем) породы
	Физические свойства	
Гранулометрический состав	Глинистые породы нарушенной структуры, не сохранившие естественной влажности, в воздушно-сухом состоянии	10—20 г, полученные квартованием из объема 250 см³
	Супесчаные породы, не сохранившие естественных влажности и структуры	10—20 г, полученные квартованием из объема 250 см³
	Пески в воздушно-сухом состоянии	100 г, полученные квартованием из объема 1000 см³
Плотность	Песчано-глинистые породы нарушенной структуры в воздушно-сухом состоянии	20—30 г, полученные квартованием из объема 200—300 см³
Объемная масса *	Пески в воздушно-сухом состоянии	250—300 см³
	Глинистые породы ненарушенной структуры с естественной влажностью	Кусочек породы объемом до 150 см³ для метода парафинирования или монолит 10×10×10 см для метода режущих колец
Естественная влажность	Глинисто-песчаные породы нарушенной структуры с естественной влажностью	20—30 г
Гигроскопическая влажность	Песчано-глинистые породы в воздушно-сухом состоянии	10—20 г
Максимальная молекулярная влагоемкость	Песчано-глинистые породы нарушенной структуры	50 г, полученные квартованием из 500 см³
Полная влагоемкость	Пески	200—300 г
Граница раскатывания	Глинистые породы, супеси нарушенной структуры в воздушно-сухом состоянии	20—30 г
Граница текучести	То же	60—100 г
Набухание	Глинистая порода ненарушенной структуры с естественной влажностью	Монолит 10×10×10 см
Размокание	Глинистая порода ненарушенной структуры с естественной влажностью	Монолит 5×5×10 см
Усадка	Глинистая порода нарушенной и ненарушенной структуры с естественной влажностью или в воздушно-сухом состоянии	Монолит 10×10×10 см и 150—200 см³ грунта нарушенного сложения, полученного квартованием
Коэффициент	Пески и супеси	300 см³

* Объемную массу определяют в рыхлом и плотном сложениях.

Продолжение табл. 76

Показатели состояния и физико-механических свойств пород	Состав и состояние породы	Количество (масса или объем) породы
фильтрации	Глинистая порода ненарушенной структуры с естественной влажностью	Монолит 10×10×10 см
Липкость	Глинистая порода нарушенной структуры	50—100 г
	Механические свойства	
Сжимаемость	Глинистая порода ненарушенной структуры с естественной влажностью	Монолит 25×25×25 см
Сопротивление сдвигу	Глинистая порода ненарушенной структуры с естественной влажностью	Монолит * 20×20×20 см
Угол естественного откоса песка	Песок с естественной влажностью в воздушно-сухом состоянии	1200—1500 см³

* Монолита размером 10×10×15 см достаточно только для одного испытания (на сдвиговом приборе или в стабилометре).

предназначенных для определения гранулометрического состава, минералогических анализов и анализов засоленности. Эти способы дают возможность после обработки пробы получать образцы, обладающие средними значениями показателей свойств. Их применение позволяет значительно сократить количество образцов и объемы лабораторных исследований.

Бороздовый способ при вырезании борозды специальным ножом может применяться для получения среднего значения объемной массы породы с естественной влажностью δ, которая вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{P}{L\omega},$$

где P — масса породы, извлеченной из борозды, г;

L — длина борозды, см;

ω — площадь поперечного сечения борозды, см².

В табл. 76 показано, для определения каких показателей свойств пород требуются образцы с нарушенной структурой или образцы, сохранившие естественную структуру (монолиты), и необходимое количество породы (по массе или объему).

При точечном опробовании образцы с ненарушенной структурой отбирают из шурфов и скважин вырезанием, вдавливанием, забивкой или обуриванием. Последние три способа требуют применения грунтоносов, в том числе и грунтоносов для отбора пород из шурфов (например, таких, как грунтоносы в комплекте лаборатории ЛИГП-1).

При вдавливании, забивке и обуривании наблюдается нарушение естественной структуры образца вблизи его поверхности (табл. 77). В связи с этим минимальный диаметр монолита должен превышать внутренний диаметр кольца лабораторного прибора, по крайней мере, на удвоенную толщину зоны нарушенного сложения.

Отбор образцов пород производится в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 12071-66 «Грунты. Отбор, упаковка, хранение и транспортирование

Таблица 77

Оптимальные размеры образцов пород ненарушенной структуры, отбираемых из буровых скважин*

Породы	Высота образца, мм	Минимальный диаметр образца, мм	Средняя толщина нарушенной зоны образца с нарушенным сложением, мм
Скальные	700—1500	80	2
Глинистые:			
а) твердые, полутвердые	700	90	9
б) тугопластичные, мягкопластичные	400—700	100	10
в) текучепластичные, текучие	300—500	80	3
Песчаные:			
а) плотные	500	90	7
б) рыхлые	500	90	5
в) водонасыщенные	700	90	3

* Рекомендации по отбору, упаковке, транспортированию и хранению образцов грунтов при инженерно-геологических изысканиях для строительства. М., Госстройиздат, 1970.

образцов», а также в «Рекомендациях по отбору, упаковке, транспортированию и хранению образцов грунтов при инженерно-геологических изысканиях для строительства». Документацию отбора ведут по ГОСТ 12071-66.

Порядок вскрытия монолита и отбор породы для анализов. Существует следующий порядок отбора породы для анализов:

1. Монолит вскрывается в верхней части (где находится этикетка). Для этого срезается с верхней грани марля, пропитанная парафином, и освобождаются боковые грани.

2. Ножом срезается верхний слой породы (около 1 см), пропитанный изоляционным веществом.

3. Породу для анализов отбирают из монолита немедленно после его вскрытия.

4. После отбора породы для анализов монолит парафинируется в целях дальнейшего его использования. Для этого: а) выравниваются верхняя и частично боковые грани в местах отбора пробы; б) на породу кладется сверху этикетка, завернутая в кальку; в) монолит обертывается марлей, пропитанной парафином; при этом используется марля, которой порода изолировалась первоначально при взятии образца; г) на верхнюю грань монолита, обернутого марлей, помещается этикетка, на которой указываются данные о породе и дата вскрытия монолита.

Таблица 78

Сроки хранения монолитов

Состояние породы	Сроки хранения монолитов, месяцы
Породы в текучем и пластичном состоянии ($W_e > W_p$)	1,5
Породы в полутвердом состоянии ($W_e \leqslant W_p$) .	6

Примечание. W_e – естественная влажность (в %); W_p – влажность предела раскатывания (в %).

5. При дальнейших вскрытиях монолита перечисленные операции повторяются.

6. Образцы пород нарушенной структуры с естественной

влажностью, сохраняемые в герметически закрывающихся банках, вскрываются и используются один раз.

Условия и сроки хранения образцов. Помещение, в котором хранятся монолиты, должно иметь температуру воздуха не ниже 0° и не выше 20° и абсолютную влажность не менее 80%. Образцы пород нарушенной структуры, потерявшие естественную влажность, хранятся в помещении при положительной температуре. Сроки сохранения естественной влажности и структуры глинистых пород в указанных условиях приведены в табл. 78.

Образцы пород нарушенной структуры, не сохранившие естественной влажности (в воздушно-сухом состоянии), могут находиться в указанных условиях в течение неопределенного срока.

VII. ОПЫТНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Характеристики свойств пород, определяемые полевыми методами, перечень методов, а также горные породы, для исследования которых они могут применяться, приведены в табл. 79.

Опытные нагрузки в шурфах и скважинах. Испытания статической нагрузкой при инженерно-геологической разведке участков предполагаемого строительства ответственных сооружений производятся в шурфах и скважинах, а в процессе возведения сооружений — в строительных котлованах. Испытания осуществляются с помощью штампов, размеры которых приведены в табл. 80.

Схемы испытаний пород опытными нагрузками в шурфах и в скважинах приведены на рис. 62—63.

В процессе опытов нагрузку увеличивают ступенями до стабилизации осадки от каждой ступени нагрузки. Считается, что стабилизация достигнута в том случае, если приращение осадки за 1 сутки не превышает 1 мм.

Величины максимальных нагрузок на штампы даны в табл. 81, примерные интервалы нагрузок — в табл. 82, а данные о режиме наблюдений за осадкой приведены в табл. 83.

В отдельных случаях (по специальному заданию) нагрузку увеличивают до достижения предельного (критического) значения, фиксируемого: 1) по появлению валика выпирания или трещин вокруг штампа; 2) по деформированию породы с постоянной скоростью, продолжающемуся в течение не менее суток; 3) по резкому увеличению осадки при незначительном увеличении нагрузки (в 5 раз и более по сравнению с осадкой от предыдущей ступени).

Разгрузку ведут теми же ступенями. После снятия каждой ступени нагрузки в течение 1 часа наблюдают за разуплотнением породы. По результатам опытных нагрузок составляют график $S = f(P)$.

Зависимость осадки от нагрузки в пределах пропорциональности выражается уравнением

$$S = C(P - P_0),$$

где S — осадка штампа, см;

P — удельное давление на штамп, кгс/см²;

P_0 — начальное давление уплотнения (нагрузка, соответствующая отрезку, отсекаемому прямой $S = f(P)$ на оси абсцисс);

$C = \operatorname{ctg} \alpha$.

По графику находится поправочное значение осадки S_0, в котором учтены: величина осадки от веса незагруженного штампа и первичное обмятие неровностей грунта. Значения осадки, полученные по данным наблюдений, исправляют на величину S_0.

Таблица 79

Основные методы полевых исследований свойств горных пород при проведении инженерно-геологических работ

Изучаемые характеристики	Полевые методы	Породы, для исследования которых применяются методы
Динамическое и статическое сопротивление пенетрации, предельное напряжение сдвига, сопротивление резанию и другие показатели свойств, используемые для характеристики геологического строения пород и пространственной изменчивости их свойств	Динамическое зондирование	Песчано-глинистые
	Статическое зондирование	
	Пенетрационно-каротажный	
	Искиметрия	
	Микропенетрация	
Деформационные характеристики горных пород	Опытные нагрузки в шурфах и скважинах	Песчано-глинистые крупнообломочные и трещиноватые скальные
	Прессиометрия	
	Крыльчатое зондирование	Песчано-глинистые
Прочностные характеристики горных пород	Опытные сдвиги на полевых приборах и установках	Трещиноватые скальные и полускальные, обломочные, песчано-глинистые
	Опытные обрушения и выпирания в шурфах	Обломочные с глинистым заполнителем, полускальные и выветрелые скальные
	Прессиометрия	То же
	Крыльчатое зондирование	Песчано-глинистые
Водопроницаемость горных пород *	Опытные откачки из скважин	Трещиноватые, скальные, несвязные
	Опытные наливы в шурфы	Песчано-глинистые
	Опытные нагнетания в скважины	Трещиноватые, несвязные

* Необходимые данные о полевых методах исследования водопроницаемости можно найти в справочнике по гидрогеологии (см. например, Справочник гидрогеолога под ред. М. Е. Альтовского).

Таблица 80

Основные размеры штампов

Тип штампа	Размеры штампа		Тип выработки и ее размеры по дну
	площадь, см²	диаметр или длина стороны, мм	
Круглый	5000	798	Шурф сечением 225×225 см
Квадратный	5000	707	
Круглый штамп для скважин	600	277	Скважина диаметром 325 мм

Примечание. В таблице даны размеры минимального по площади штампа, могут применяться и большие по площади штампы.

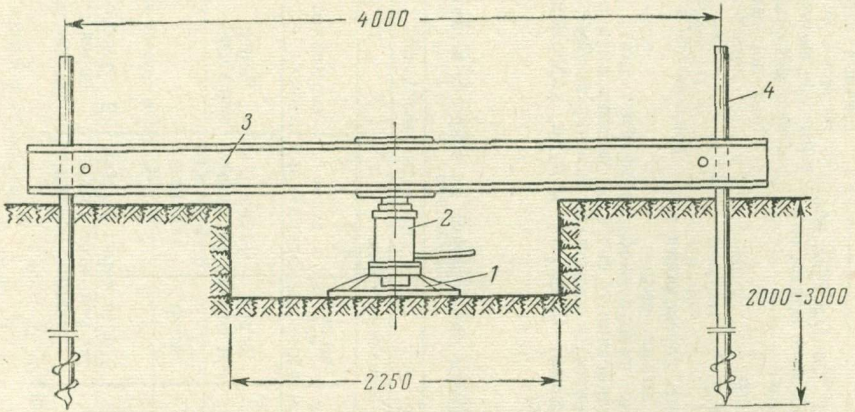


Рис. 62. Схема установки для испытания грунтов в шурфе статической нагрузкой
1 — круглый штамп площадью 5000 см²; *2* — гидравлический домкрат; *3* — продольная упорная балка; *4* — винтовые анкерные сваи

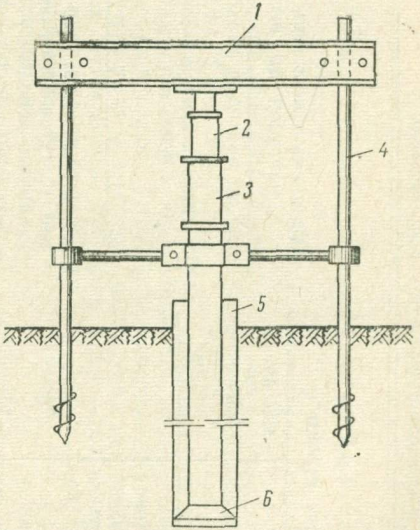


Рис. 63. Схема установки для испытания грунтов в скважине пробной нагрузкой
1 — упорная балка; *2* — динамометр; *3* — домкрат; *4* — винтовая анкерная свая; *5* — обсадная труба; *6* — штамп

Таблица 81

Нагрузки на штамп

Характеристика породы	Максимальная нагрузка на штамп, кгс/см²
Породы с плотным сложением (ε не более 0,5—0,6) или с влажностью, близкой к W_p, но не более $1{,}4W_p$	3,0—5,0
Порода менее плотная и более влажная . . .	1,0—3,0

Таблица 82

Примерные величины ступеней нагрузок на штампы

Характеристика пород	Величина первых * (3—4) ступеней нагрузки, кгс/см²
Плотные, песчаные, твердые и тугопластичные глинистые породы . .	1,0
Песчаные породы средней плотности и мягкопластичные глинистые породы	0,5
Рыхлые песчаные и текучепластичные глинистые породы	0,2

* Последующие ступени нагрузки принимаются в половинном размере.

При испытаниях в скважинах вводится поправка на обмятие штанг, определяемая по формуле

$$\Delta = \frac{L \cdot P}{F \cdot E},$$

где L — длина штанг, передающих нагрузку на штамп, см;
P — нагрузка на погрузочной платформе, кгс;
F — площадь поперечного сечения штанг, см²;
E — модуль упругости материала штанг, кгс/см².

Модуль деформации. Значения модуля деформации пород определяют по одной из формул.

Таблица 83

Режим наблюдений за осадкой штампов *

Породы	Периоды наблюдений					
	I ступень нагрузки			II ступень нагрузки		
	первый час	второй час	далее	первый час	второй час	далее
Глинистые	Через 15 мин	Через 30 мин	Через 1 ч до условной стабилизации осадки	Через 30 мин	Через 30 мин	Через 1 ч до условной стабилизации осадки
Песчаные	4 отсчета через 10 мин	Далее через 30 мин до условной стабилизации осадки		2 отсчета через 15 мин	Далее через 30 мин до условной стабилизации осадки	

* Точность определения осадки должна быть не менее 0,1 мм.

1. Формула Буссинеска для круглого штампа:

$$E = (1 - \mu^2) \frac{P}{S \cdot d},$$

где E — модуль деформации, кгс/см²;
P — полная нагрузка на штамп; берется по прямолинейному участку графика $S = f(P)$, кгс;
d — диаметр штампа или круга, равновеликого площади штампа, если испытания велись квадратным или прямоугольным штампами;
S — конечная осадка, отвечающая нагрузке P, см;
μ — коэффициент поперечного расширения (для песков и супесей — 0,30, для суглинков — 0,35, для глин — 0,42).

2. Формула для расчета E при наличии на графике $S = f(P)$ участков с разными наклонами:

$$E = (1 - \mu^2) \frac{P_{n+1} - P_n}{(S_{n+1} - S_n) \cdot d},$$

где P_n и P_{n+1} — начальная и конечная нагрузки на рассматриваемом участке; S_n и S_{n+1} — отвечающие им деформации.

3. Формула Шлейхера:

$$E = (1 - \mu^2) \frac{\omega P \sqrt{F}}{S},$$

где F — площадь штампа;
ω — коэффициент, зависящий от формы подошвы штампа, имеющий следующие значения (табл. 84).

4. Формула НИИОСП:

$$E = ak \frac{P}{S},$$

где a — поправочный коэффициент, учитывающий различие деформаций при испытаниях в шурфах и скважинах;
F — площадь штампа, см²;

$$k = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{\sqrt{F}}.$$

Таблица 84

Значения коэффициента ω

Форма загруженной площади	Значение ω	Форма загруженной площади	Значение ω
Круг	0,96		
Квадрат	0,95	Прямоугольник с отношением сторон:	
Прямоугольник с отношением сторон:		10	0,71
1,5	0,94	50	0,45
2,0	0,92	100	0,37
5,0	0,82	1000	0,16

Коэффициенты a и k имеют следующие значения (табл. 85).

Таблица 85

Значения коэффициента a и k

Условия испытания и размер штампа	Песок		Глина	
	a	k	a	k
В шурфах квадратным штампом площадью 5000 см²	1,0	0,0115	1,0	0,0103
В скважинах круглым штампом площадью 600 см²	0,7	0,0331	0,7	0,297

Прессиометрия. Прессиометрию применяют для определения деформационных и прочностных свойств песчано-глинистых и щебнисто-глинистых пород * в буровых скважинах.

Метод заключается в измерении осадки грунта, вскрытого в стенке скважины, под действием давления.

Техническая характеристика скважинных прессиометров

Давление в газовом баллоне, кгс/см²	До 120
Минимальное давление, передаваемое камерами на породу, кгс/см²	До 25
Точность измерения деформаций, мм	±1
Точность измерения давлений от верхнего предела измерений, %	±4
Диаметр скважин при использовании различных камер давления, мм	От 50 до 220
Максимальная глубина проведения испытаний, м	50
Производительность опытов в смену	До 20
Масса приборов, кг	До 100

Схема прессиометра представлена на рис. 64.

В скважину на требуемую глубину опускают снаряд прессиометра с эластичными стенками, разделенный на три камеры: рабочую и две вспомогательные. Затем прикладывают нагрузку на эластичные стенки снаряда и измеряют деформации породы. Измерение деформаций проводят: при испытаниях по схеме быстрого нагружения — через 10 с, по схеме медленного нагружения — через 1 мин до наступления условной стабилизации.

Величину ступеней нагружения принимают в зависимости от консистенции пород (табл. 86).

Таблица 86

Зависимость величины нагружения от консистенции пород

Консистенция	Показатель консистенции	Величина ступени давления, кгс/см²
Мягкопластичная	$1 > B > 0{,}5$	0,25—0,5
Полутвердая	$0{,}5 > B > 0{,}8$	0,5—1,0
Твердая	$0{,}8 > B > 0$	1,0—2,0

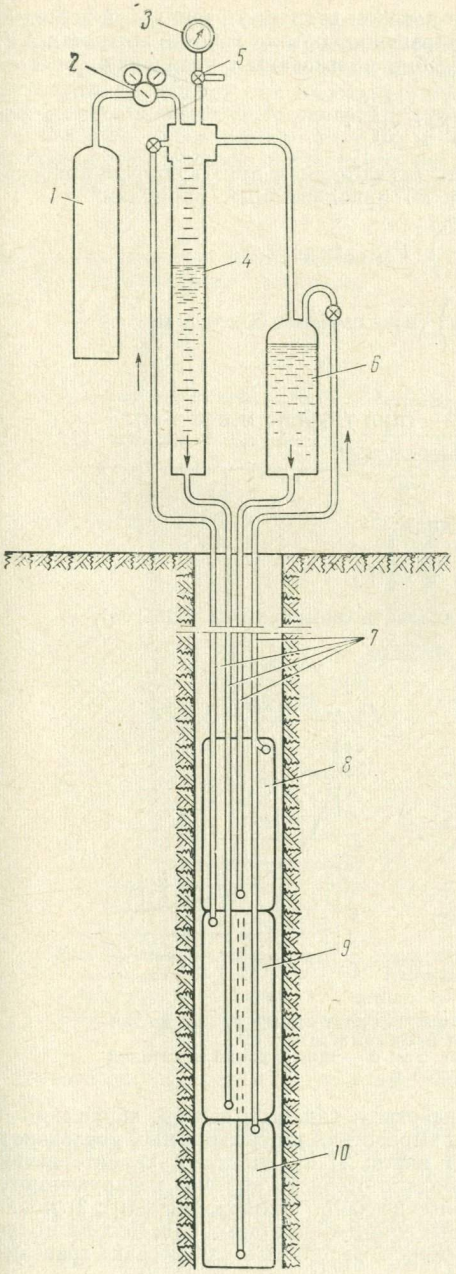
Общее число ступеней нагружения должно быть не менее 6—8; конечная ступень должна быть на 25—50% меньше предыдущей, при которой был получен резкий скачок в приросте деформаций.

По данным испытаний пород составляют график (рис. 65). Модуль деформации E определяют по формуле Лямэ:

$$E = (1+\mu) r_0 \frac{dP}{dr},$$

где dP — приращение давления на участке пропорциональных деформаций;
dr — соответствующие приращения радиальных деформаций;
r_0 — начальный радиус скважины;
μ — коэффициент Пуассона.

* С содержанием щебенки не более 30%.



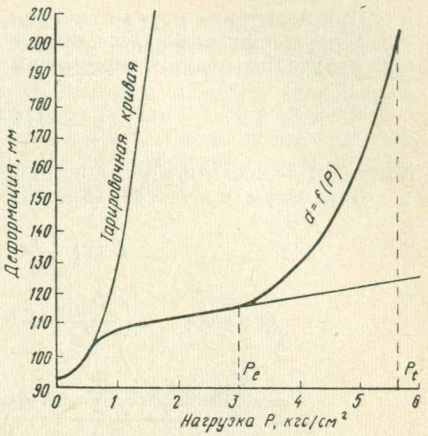


Рис. 65. График испытания пород прессиомегро

Рис. 64. Схема прессиометра

1 — газовый баллон; *2* — редуктор; *3* — манометр; *4* — измерительный цилиндр; *5* — кран-тройник; *6* — бачок; *7* — шланги; *8*, *10* — вспомогательные камеры; *9* — рабочая камера

При испытании пород прибором, в котором величину радиальной деформации камеры получают пересчетом по приращению объема рабочей жидкости ΔV, для получения модуля деформации удобно пользоваться уравнением

$$E = (1+\mu)\,\lambda\,\frac{\Delta P}{\Delta V},$$

где λ (см) — постоянная для установки, определяемая при тарировке прибора.

Параметры прочности определяют по приближенным формулам*

$$C = \left(\frac{P_t}{P_e} - 1\right) \cdot P_{быт} \cdot \operatorname{tg}\varphi;$$

$$\varphi + \operatorname{ctg}\varphi = \pi\left(\frac{P_{быт}}{P_e} + 0{,}5\right) \text{ (при глубине более 5 м)}$$

и

$$\frac{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg}^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)\pi} = \frac{P_{быт}}{P_e} \text{ (при глубине менее 5 м),}$$

где C — сцепление, кгс/см²;
φ — угол внутреннего трения, радиан;
$P_{быт}$ — природное давление, кгс/см²;
P_e — предел пропорциональности, кгс/см²;
P_t — предел прочности, кгс/см².

Для определения φ можно использовать номограммы (рис. 66).

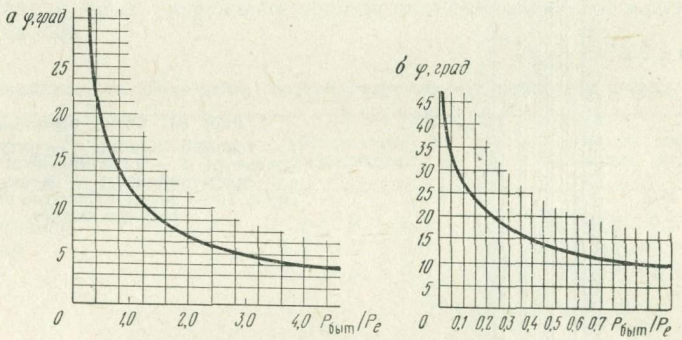


Рис. 66. Номограмма для определения угла внутреннего трения по данным испытаний пород прессиометром
а — при глубине испытаний более 5 м; *б* — при глубине испытаний менее 5 м

Испытания прочности пород в выработках. Опытные сдвиги, обрушения и выпирания целиков породы в горных выработках и строительных котлованах выполняются с целью определения на месте: 1) прочностных характеристик неоднородных пород, из которых невозможно отобрать образцы ненарушенного сложения (трещиноватые или слабосвязные песчано-глинистые породы); 2) показателей прочности тех пород, для которых при лабораторных способах их получения эти показатели недостоверны (глинисто-щебнистые или песчано-гравели-

* Предложены С. Л. Кореневой.

стые отложения, плотные трещиноватые глинистые породы с ясно выраженной структурой, сильно неоднородные песчано-глинистые породы с ясно выраженной структурой, сильно неоднородные песчано-глинистые отложения). Показатели прочности применяют при проектировании фундаментов зданий и сооружений для расчета нормативного давления; расчет проводят по СНиП II-Б.1-62.

Сдвиг целиков породы в шурфах. Схема установки для целика породы в шурфе приведена на рис. 67. После проведения испытаний при разных вертикальных нагрузках строят диаграмму сдвига.

$$\tau = f(P),$$

где τ — сдвигающее напряжение;
P — вертикальная нагрузка.

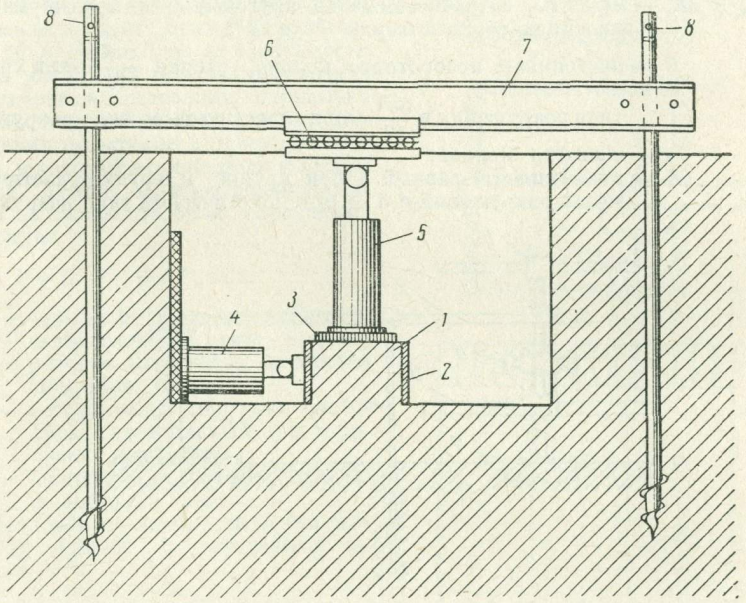


Рис. 67. Схема установки для определения величины сдвига целика породы в шурфе

1 — целик; *2* — обойма; *3* — штамп; *4* — горизонтальный домкрат с динамометром; *5* — вертикальный домкрат с динамометром; *6* — плоская шариковая обойма; *7* — упорная балка; *8* — винтовые сваи

Величину сцепления и угол внутреннего трения находят по диаграмме сдвига.

Круговой срез целиков пород в шурфах и на поверхности земли (метод ВСЕГИНГЕО) *. Схема установки для кругового среза пород приведена на рис. 68. Стойку-анкер ввинчивают в породу, используя упорную балку как рычаг. С помощью нагрузочного устройства вдавливают поворотное кольцо в испытуемую породу и при нормальном давлении P' срезают ее по торцу поворотного кольца, фиксируя общий момент M'_0, затрачиваемый на срез по круговой поверхности и на трение между кольцом и породой. После среза

* Предложен Г. К. Бондариком.

снимают крышку поворотного кольца, извлекают из него срезанную породу (кольцо оставляют на месте), снова устанавливают крышку на кольцо и поворачивают кольцо, измеряя момент, затрачиваемый на трение породы по кольцу $M_т$. Затем на том же месте снова вдавливают кольцо в породу и повторяют срез при вертикальном давлении P'', фиксируя M''_0.

Момент, реализуемый на круговой срез при нормальном давлении P', будет:

$$M'_к = M'_0 - M_т.$$

Параметры прочности находят по формулам:

$$C = \frac{M''_к P' - M'_к P''}{B(P' - P'')}, \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{A(M'_к - M''_к)}{d(P' - P'')},$$

где $M'_к$ и $M''_к$ — моменты, затрачиваемые на круговой срез при нормальных давлениях соответственно P' и P'';

B — постоянная поворотного кольца, равная $\frac{\pi d^3}{16}$ — при хрупком типе разрушения и $\frac{\pi d^3}{12}$ — при пластическом типе разрушения;

d — диаметр кольца;

A — коэффициент, равный 4 при хрупко- и хрупко-пластическом типах разрушения и 3 — при пластическом типе разрушения.

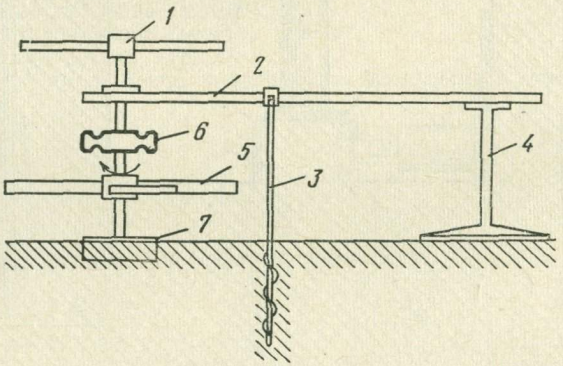


Рис. 6 . Схема установки кругового среза

1 — нагрузочное приспособление; *2* — упор; *3* — анкер; *4* — аутригер; *5* — рычаг с динамометром; *6* — динамометр; *7* — поворотное кольцо.

Обрушение целиков пород. Схема установки для обрушения целиков породы в шурфах приведена на рис. 69. После обрушения целика в масштабе 1/5 или 1/10 строится кривая обрушения. Целик разбивается на блоки и составляется уравнение равновесия.

Аналогично строится кривая обрушения для второго обрушенного целика породы. В результате двух испытаний получают систему уравнений:

$$\sum_1^n T = \sum_1^n \cdot N \cdot f + C \cdot A_1.$$

$$\sum_{1'}^{n'} T = \sum_{1'}^{n'} \cdot N \cdot f + C \cdot A_2,$$

где N — нормальное давление;
T — сдвигающее усилие;
f — коэффициент внутреннего трения;
C — сцепление;
A_1 и A_2 — площади поверхностей скольжения первого и второго целиков.

Решив систему уравнений, получают значения параметров прочности C и $f = \operatorname{tg} \varphi$.

Обрушение и сдвиг призм пород (метод ВНИМИ). Обрушение и сдвиг призм пород размером 50 × 50 × 70 см в зависимости от цели испытаний можно производить по плоскости напластования, нормально к ней или под различными углами. Для проведения испытаний в породе делают прорез, в который закладывают плоский домкрат. Усилие P, передаваемое домкратом на плоскость среза, определяют по формуле

$$P = D \cdot S \cdot t + \Delta P, \text{ кгс},$$

где D — удельное давление жидкости в домкрате при срезе, кгс/см²;
S — рабочая плоскость цилиндра домкрата, см²;
t — коэффициент передачи давления, определяемый при тарировке домкрата;
ΔP — поправка за счет веса призмы и домкрата, кгс.

Сцепление по плоскости среза (обрушения) призмы C определяют по формуле

$$C = \frac{P}{F} (\sin \alpha - \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi),$$

где F — площадь среза, см²;
α — угол между плоскостью плиты домкрата и плоскостью среза;
φ — угол внутреннего трения породы по плоскости среза (определяется методом одноплоскостного среза в лабораторных условиях).

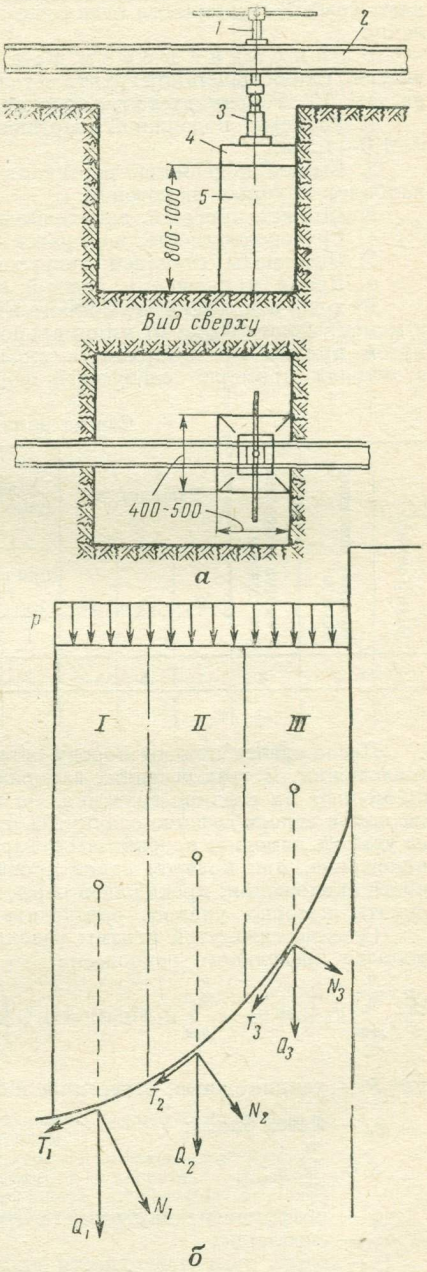


Рис. 69. Установка для обрушения целика шурфе

а — схема установки; *1* — нажимной винт; *2* — упорная балка; *3* — динамометр; *4* — штамп; *5* — целик породы; *б* — схема усилий, развивающихся при обрушении призмы грунта

Обычно в поле проводят два-три испытания, по результатам которых составляют график зависимости сдвигающего усилия от величины нормального давления.

В ы п и р а н и е п р и з м п о р о д (метод НИИ по строительству в Свердловске). Схема испытаний грунта методом выпирания призмы в шурфе приведена на рис. 70. Рекомендуется выдерживать следующие характеристики:

1. Размеры подвижной вертикальной стенки: $H = 0{,}35—0{,}5$ м, $A = 1{,}0—1{,}5$ м.
2. Высота подвижной вертикальной стенки H в 5 раз больше размера наиболее крупных включений.
3. Ширина прорезей, заполненных перемятым грунтом, равна 0,05—0,1 м.
4. Грузоподъемность домкратов — 3—5 т.
5. Интервалы ступеней нагрузок 0,5 т.
6. Время приложения каждой ступени 15—30 мин.

В ходе испытаний по динамометрам отмечают: а) максимальное усилие в момент сдвига Q_{max}; б) минимальное усилие, отвечающее перемещению сдвинутой призмы по поверхности скольжения. Результаты испытаний заносят в журнал примерно следующей формы (табл. 87).

Таблица 87

Форма заполнения журнала

Номер шурфа	Краткое описание породы	Отметка поверхности призмы	Размеры, м			Усилия, регистрируемые динамометрами, m				Схема выпирания и координаты поверхности скольжения			Примечания
						при сдвиге		при перемещении призмы					
			H	A	B	I	II	I	II	1 сечение	2 сечение	3 сечение	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

После сдвига призмы породу осторожно снимают и обнажают поверхность скольжения. В трех сечениях замеряют координаты поверхности скольжения, вычисляют их средние значения, по которым на миллиметровке в выбранном масштабе строят сечение сдвинутой призмы с поверхностью скольжения. Если не удалось измерить координаты поверхности скольжения, то принимается такое положение, при котором сдвиг произошел по круглоцилиндрической поверхности скольжения, проходящей через точки M, N и какую-либо точку K, координаты которых удалось определить.

Сечение сдвинутой призмы разбивают на блоки и для призмы составляют условие предельного равновесия

$$\frac{P}{G}\sum_{1}^{n} g_i \cdot \cos\alpha_i - \sum_{1}^{n} g_i \sin\alpha_i = \operatorname{tg}\varphi\left(\frac{P}{G}\sum_{1}^{n} g_i \sin\alpha_i + \sum_{1}^{n} g_i \cos\alpha_i\right) + C\sum_{1}^{n} l_i,$$

где P — усилие сдвига, отнесенное к единице длины призмы $\left(P = \dfrac{Q_{max}\,1\text{ см}}{A}\right)$;

g_i — масса блока;

$G = \sum_{1}^{n} g_i$;

$\operatorname{tg}\varphi$ — коэффициент внутреннего трения;

C — сцепление;

l_i — длина дуги поверхности скольжения в пределах блока.

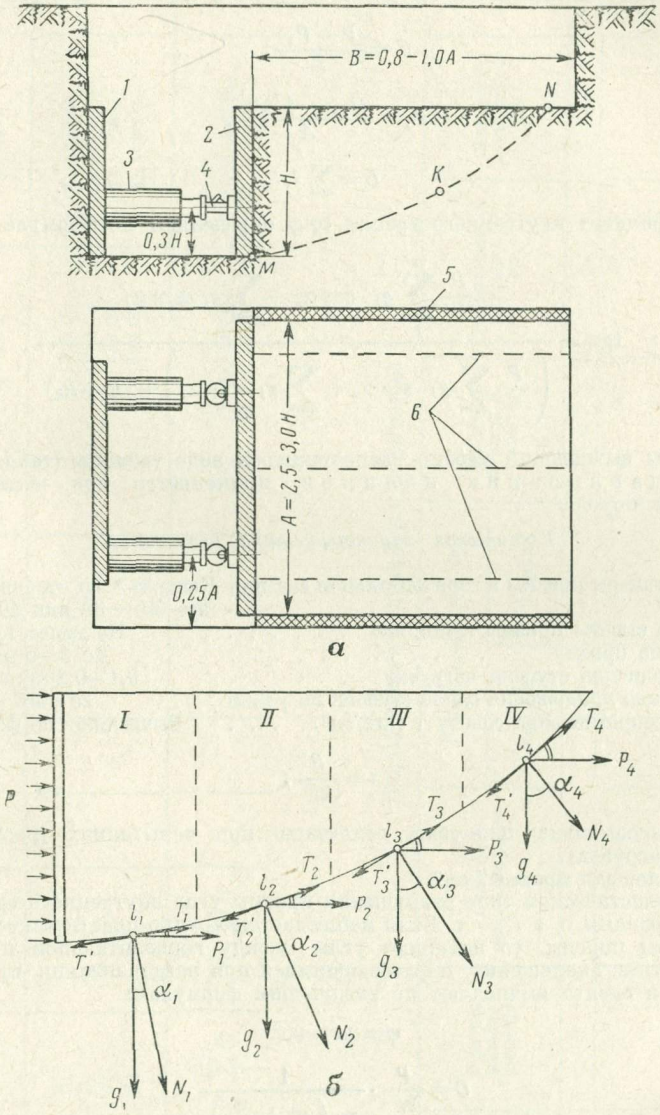


Рис. 70. Установка для испытаний прочности грунта методом выпаривания призмы

а — схема установки: *1* — упорная стенка; *2* — подвижная вертикальная стенка; *3* — домкрат; *4* — динамометр; *5* — прорези; *6* — плоскости сечения, по которым строится поверхность скольжения. *б* — схема усилий, действующих при выпирании грунта

Сцепление определяется по разности усилий сдвига P и перемещения P_1

$$C=\frac{P-P_1}{L},$$

где

$$P_1=\frac{Q_{min}\cdot 1\text{ см}}{A},$$

$$L=\sum l_i.$$

Коэффициент внутреннего трения tg φ определяют по формуле

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{\frac{P}{G}\sum_1^n g_i\cdot\cos\alpha_i-\sum_1^n g_i\cdot\sin\alpha_i}{\left(\frac{P}{G}\sum_1^n g_i\cdot\sin\alpha_i+\sum_1^n g_i\cdot\cos\alpha_i\right)+(P-P_1)}.$$

Результаты вычислений удобно расположить в виде таблицы (табл. 88).

Раздавливание целиков применяется при исследованиях глинистых пород.

Техническая характеристика испытаний

Форма и размеры призмы в горизонтальном сечении	Квадрат * со стороной не менее 30 × 30 или 40 × 40 см
Отношение высоты призмы к ширине	Не менее 1,5
Нагрузка на призму	До 3—5 тс
Средняя величина ступени нагрузки	0,1—0,2 кгс/см²
Среднее время приложения одной ступени нагрузки	20 мин
Удельное сопротивление сдвигу τ (кгс/см²) . . .	Вычисляют по формуле

$$\tau=\frac{P}{2F},$$

где P — максимальная нагрузка, отмеченная при испытаниях (разрушающая нагрузка).

F — площадь призмы, см².

При пластическом типе разрушения призмы угол внутреннего трения принимается равным 0, а $C = \tau$. Если наблюдается хрупко-пластическое разрушение призмы породы, то измеряют углы между горизонтальной плоскостью и плоскостями скольжения, образовавшимися при раздавливании призмы (α). Показатели сдвига вычисляют по следующим формулам:

$$\varphi=2\alpha-90°$$

$$C=\frac{P}{2F}\cdot\frac{1}{\operatorname{tg}\left(45+\frac{\varphi}{2}\right)}$$

Для получения достоверных значений показателей проводят несколько раздавливаний (три-четыре) и подсчитывают средние значения C и φ. Результаты испытаний записывают в журнал примерно следующей формы (табл. 89).

* Сторона квадрата должна в 5—6 раз превышать наибольший размер крупных включений.

Таблица 88

Форма записи результатов вычислений

P, кгс	P_1, кгс	Номер блока	g, кг	l, см	α, град	$\sin\alpha$	$\cos\alpha$	$g\cdot\sin\alpha$	$g\cdot\cos\alpha$	Примечания
	g_1 g_2 g_i g_n	l_1 l_2 l_i l_n						$g_1\cdot\sin\alpha_1$ $g_2\cdot\sin\alpha_1$ $g_i\cdot\sin\alpha_i$ $g_n\cdot\sin\alpha_n$	$g_1\cdot\cos\alpha_1$ $g_2\cdot\cos\alpha_2$ $g_i\cdot\cos\alpha_i$ $g_n\cdot\cos\alpha_n$	
	$G=\sum_1^n g_i$	$L=\sum_1^n l_i$						$\sum_1^n g_i\cdot\sin\alpha_i$	$\sum_1^n g_i\cdot\cos\alpha_i$	

Таблица 89

Форма записи результатов испытаний

Номер выработки	Краткое описание породы	Отметка верха призмы	Размеры призмы, см		Площадь штампа F, см²	Разрушающая нагрузка P, кг	Удельное сопротивление	Примечания
			высота	ширина				
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Срез монолитов на стендовых установках. Схема одной из подобных установок приведена на рис. 71. На монолит породы ставят обойму, круглую или прямоугольную в зависимости от конструкции стенда, и монолит осторожно подрезают по ее размерам. После того как обойма надета, торцевые поверхности монолита выравнивают и зачищают, затем обойму устанавливают в прибор. Методика проведения испытаний по схеме быстрого сдвига принципиально не отличается от методики лабораторных испытаний на срезных приборах. Выполняется три-четыре испытания при различных вертикальных нагрузках. По их результатам строят диаграмму сдвига, по которой определяют показатели φ и C.

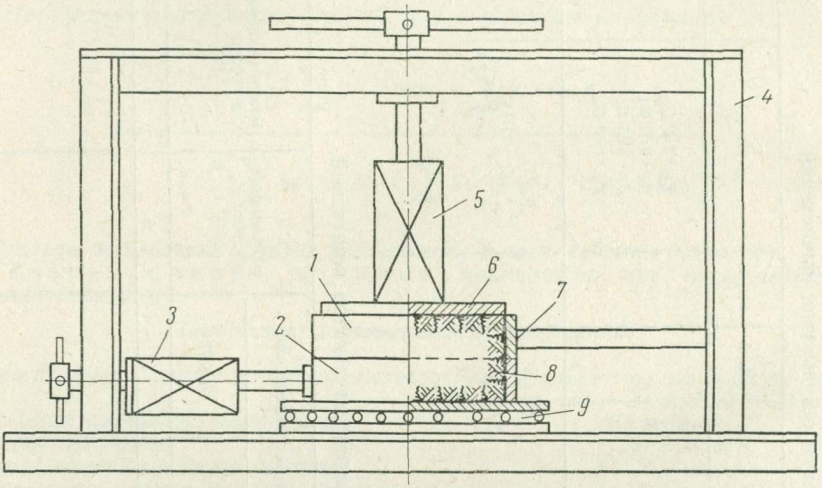


Рис. 71. Схема полевого прибора для испытаний на срез (прибор конструкции ДИИТ)

1 — верхняя неподвижная обойма; *2* — нижняя подвижная обойма; *3* — горизонтальный домкрат с динамометром; *4* — упорная силовая рама; *5* — вертикальный домкрат с динамометром; *6* — штамп; *7* — упор для неподвижной обоймы; *8* — проба грунта; *9* — плоская обойма с шариками

Крыльчатое зондирование.

Метод применяется для изучения сжимаемости и прочности иловатых и пластичных глинистых пород, не содержащих крупных включений и залегающих на глубине до 20 м. Схема крыльчатого зонда приведена на рис. 72.

Рабочим наконечником служит крыльчатка, состоящая обычно из 4 лопастей, которую вдавливают в испытуемый грунт, а затем поворачивают. При повороте крыльчатки измеряют приложенный крутящий момент M и угол поворота верхнего конца штанг $\alpha_{шт}$. По результатам измерений строят график $M = f(\alpha_{шт.})$ (рис. 73). По графику устанавливают крутящий момент M_e и угол α_e, соответствующие пределу пропорциональных деформаций; крутящий момент M_{max} и угол α_p, соответствующие состоянию среза грунта; крутящий момент M_α после поворота крыльчатки на 90° при медленном ее повороте (с угловой скоростью 0,1—0,2 град/с) и крутящий момент M_{min}, соответствующий состоянию быстрого вращения (с угловой скоростью 5—10 град/с) срезанной части грунта в массиве. Для получения углов поворота α_e и α_p строят поправочную прямую, выражающую зависимость угла закручивания штанг и стержня крыльчатки — $\Delta\alpha_к$ от приложенного крутящего момента M. Отношение величины сопротивления сдвигу породы с ненарушенной структурой (τ_s) к величине сопротивления сдвигу породы, перемятой лопастями крыльчатки τ_φ, называют *коэффициен-*

том структурности, или *чувствительностью*, *глин*. Величину, обратную этому коэффициенту, называют *показателем структурной прочности* L. По его значениям глинистые породы подразделяются на четыре группы (табл. 90).

Таблица 90

Классификация глинистых пород по прочности структурных связей
(по Г. К. Бондарику)

Значения показателя структурной прочности	Прочность структурных связей
$L = 1$	Отсутствует
$1 > L > 0{,}5$	Низкая
$0{,}5 > L > 0{,}2$	Средняя
$0{,}2 > L \geqslant 0$	Высокая

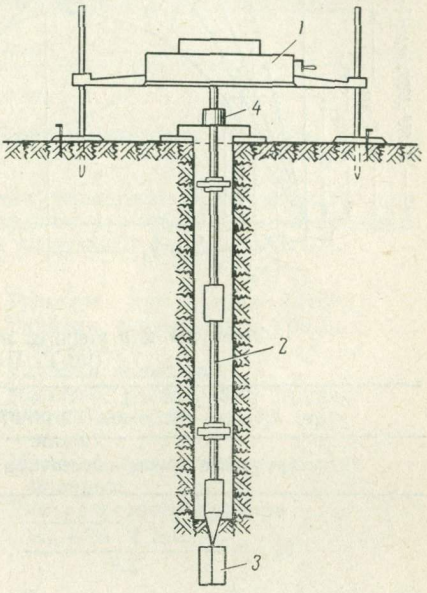


Рис. 72. Схема крыльчатого зонда
1 — оперативный столик; *2* — штанги; *3* — крыльчатый наконечник; *4* —подвеска

Модуль деформации породы E определяют по формулам:

1. Формула Г. К. Бондарика:

$$E = 3w\,(1-\mu^2)\,\frac{M_e - \tau_e\,dl\,(2h+0{,}5d)}{d\,hl} \times \sqrt{\frac{dh}{2}},$$

где w — коэффициент, зависящий от соотношения высоты крыльчатки и ширины ее лопастей (при $h = 2\,d$; $w = 0{,}85$);

μ — коэффициент Пуассона (для глин $\mu = 0{,}42$);

M_e — крутящий момент в первый момент приложения силы, когда угол поворота лопастей близок к нулю, а усилие затрачивается в основном на сжатие грунта, кгс/см;

τ_e — удельное сопротивление сдвигу, кгс/см²;

d — диаметр цилиндра, по образующей которого происходит срез (двойная ширина лопасти), см;

h — высота лопасти крыльчатки, см;

l — величина перемещения лопасти, см. $\left(l = \alpha_e \frac{d}{2}\right)$.

Учитывая, что в большинстве крыльчаток $h = 2\,d$, формулу можно привести к виду

$$E = 1{,}5w\,(1-\mu^2)\,\frac{M_e - \tau_e\,d^2 l}{d^2 l}.$$

2. Формула Г. П. Корчагина:

$$E = K_E\,(1-\mu^2)\,\frac{M_e}{\alpha_e},$$

где K_E — коэффициент, зависящий от параметров крыльчатки;

α_e — угол поворота крыльчатки в градусах; K_E для четырехлопастной крыльчатки равен $\frac{244w}{d^2\sqrt{dh}}$ (w — коэффициент формы, зависящий от соотношения h и d; при $h = 2\,d$ $w = 0{,}85$).

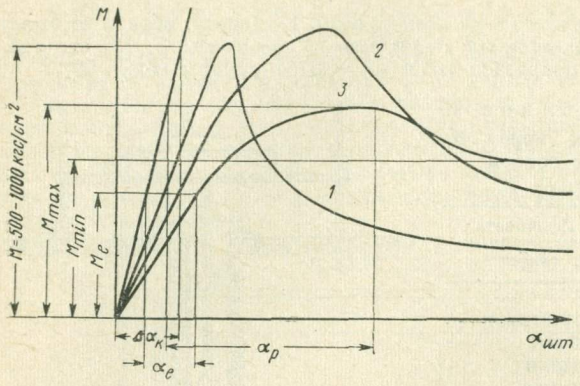


Рис. 73. Графики лопастных испытаний при срезе грунта
1 — по хрупкому типу; *2* — по хрупко-пластическому типу; *3* — по пластическому типу

Таблица 91

Формулы для расчета параметров прочности C и φ (по Г. П. Корчагину)

Тип разрушения породы	
Хрупкий и хрупко-пластичный	Пластичный
$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{-B\pm\sqrt{B^2+4A}}{2A},$$ $$A=-0{,}5\frac{Pb}{\tau_{min}}+2,\qquad B=\frac{Pb}{\tau_{min}}-1,$$ где $$\tau_{min}=\frac{M_{min}}{\frac{\pi d^2h}{2}\left(1+\frac{d}{3h}\right)}=\frac{M_{min}{}^*}{3{,}67\,d^3}$$ $$C=[(m_\alpha-1)+(1-L)(1-\operatorname{tg}\varphi)]\,\tau_s$$ $$m_\alpha=\frac{1-\frac{\alpha_p}{90^\circ}L_p}{1-\frac{\alpha_p}{90}},$$ где L_p — показатель структурной прочности хрупких связей $L_p=\frac{M\alpha}{M_{max}}$, L — показатель структурной прочности (по Г. К. Бондарику) $$L=\frac{M_{min}}{M_{max}},$$ $$\tau_S=\frac{M_{max}}{\frac{\pi d^2h}{2}\left(1+\frac{d}{3h}\right)}=\frac{M_{max}{}^*}{3{,}67\,d^3}$$	$$\cos\varphi=\sqrt{m_\alpha}\,\cos\alpha_p$$ $$C=\tau_c-\sigma_c\operatorname{tg}\varphi,$$ где $\tau_c=m_\alpha\cdot\tau_s$ $$\sigma_c=\tau_c n_c+\xi P_в,$$ $$n_c=\frac{1{,}57-0{,}0175\alpha_p}{\cos^2\alpha_p}-\operatorname{tg}\alpha_p$$ ξ — коэффициент бокового давления

* Для крыльчатки с параметрами $h=2d$.

Формулы для расчета параметров прочности C и φ по данным испытаний пород четырехлопастной крыльчаткой приведены в табл. 91.

Глубину погружения крыльчатки ниже забоя скважины определяют по формулам:

для грунтов средней и повышенной прочности ($\tau_S > 0{,}3$ кгс/см²)

$$S = 0{,}3 + h \text{ м};$$

для слабых грунтов

$$S = 0{,}5 + h \text{ м},$$

где S — глубина погружения нижнего обреза крыльчатки от забоя;
h — высота крыльчатки.

Для контроля получаемых результатов испытания пород каждого слоя проводят дважды — через 1 м в слабых грунтах и через 0,5 м — в прочных. Результаты опытов записывают в журнал следующей формы (табл. 92).

Номер опыта . . . . . .
Дата . . . . . .
Объект (участок) и его местоположение . . . . . .
Тип и номер выработки . . .
Способ проходки выработки
Описание испытываемой породы . . . . . .
Абсолютная отметка устья выработки . . . . . .
Абсолютная отметка глубины испытаний . . . . . .
Размеры крыльчатки ($d \times h$)
Глубина погружения крыльчатки . . . . . .
Глубина испытаний . . . . .
Масштаб регистрации крутящих моментов (номер пружины) . . . . . .
Масштаб регистрации углов поворота . . . . . .
Тип лопастного прибора . .

Таблица 92

Форма записей результатов испытаний

Номера измерений	Отсчет по индикатору усилий	Крутящий момент, кгс·см	Отсчет по индикатору углов поворота	Угол поворота конца штанг, градусы	Примечания *

* Указывают размеры штанг и стержня крыльчатки, уравнение поправочной прямой, условия производства испытаний, способ погружения крыльчатки, скорость вращения штанг, время окончания проходки выработки и производства опыта, погоду.

5. **Динамическое и статическое зондирование.** Метод основан на том, что горные породы в зависимости от их состава, состояния и свойств оказывают различное сопротивление прониканию режущего профиля — наконечника зонда; он применяется для исследований песчано-глинистых пород.

По способу погружения зонда в породу различают динамическую и статическую модификации метода. При динамическом зондировании зонд погружают ударами молота, при статическом — вдавливают с помощью тех или иных приспособлений.

Динамическое зондирование. Сопротивление, оказываемое породой внедрению в нее забивного зонда, называется динамическим сопротивлением пенетрации. Величина его складывается из сопротивления породы забивке наконечника и из сил трения между боковой поверхностью зонда и породой.

Динамическое сопротивление пенетрации выражают в виде:

а) некоторой относительной величины — числа стандартных ударов молота, необходимого для погружения зонда в породу на единицу длины (N);

б) силы, оказывающей ударное воздействие на породу и сообщающей ей силовой импульс (R).

В первом случае в качестве показателя пенетрации используют число ударов молота, необходимое для погружения зонда на 1 дм.

$$N = 10\,\frac{n}{S},$$

где n — число ударов в залоге;

S_3 — осадка зонда от залога.

Величина N нуждается в поправках, учитывающих увеличение веса зонда с глубиной в результате наращивания штанг и возрастание трения по боковой поверхности зонда. С учетом поправок формула для вычисления числа ударов приобретает вид

$$N_1 = 10\,\frac{n}{S_3}\,\frac{1}{\alpha+\beta-1},$$

где N_1 — исправленное число ударов;

α — поправка на трение;

β — поправка на увеличение веса зонда с глубиной (табл. 93).

Таблица 93

Значения коэффициентов α и β для песчаных пород (по В. А. Дуранте)

Номер интервала	Глубина зондирования, м	Интервал глубины зондирования, м	Фактическое число ударов молота в залоге, n	Влияние трения		Влияние веса зонда		Совместное влияние веса зонда и трения	
				поправочный коэффициент, α	исправленное число ударов в залоге $\frac{n}{\alpha}$	поправочный коэффициент, β	исправленное число ударов в залоге, $\frac{n}{\beta}$	поправочный коэффициент $\alpha+\beta-1$	исправленное число ударов в залоге $\frac{n}{\alpha+\beta-1}$
1	3	0—3	5	1,00	5,0	1,00	5,0	1,00	5,0
2	6	3—6	5	1,13	4,4	1,08	4,6	1,21	4,1
3	9	6—9	5	1,26	4,0	1,17	4,3	1,43	3,7
4	12	9—12	5	1,39	3,6	1,24	4,0	1,63	3,3
5	15	12—15	5	1,51	3,3	1,30	3,8	1,81	2,9
6	18	15—18	5	1,64	3,0	1,37	3,6	2,01	2,6
7	21	18—21	5	1,77	2,8	1,42	3,5	2,19	2,4

В соответствии с положениями инструкции РСН-32-70 Госстроя РСФСР рекомендуется определять исправленное число ударов по формуле

$$N_1 = N \cdot k^*,$$

где k — коэффициент, учитывающий приращение веса зонда и трение штанги о породу с глубиной (принимается по табл. 94 или по номограмме рис. 74).

Интенсивность динамического сопротивления пенетрации, т. е. сила, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения наконечника, называется *удельным динамическим сопротивлением пенетрации.*

Динамическое сопротивление пенетрации и его интенсивность подсчитывают по следующим формулам.

1. Формула Н. М. Герсеванова:

$$R = \frac{n \cdot F}{2} + \sqrt{\left(\frac{n \cdot F}{2}\right)^2 + \overleftarrow{+ \frac{k}{S}\left(n \cdot FQH \frac{Q + e^2 q}{Q + q}\right)}},$$

где R — динамическое сопротивление пенетрации, кгс;
F — площадь сечения наконечника, см²;
Q — масса молота, кг;
q — масса зонда, кг;
H — высота падения молота, см;
k — количество ударов в залоге;
S — осадка зонда от залога, см;
n — коэффициент, зависящий от материала зонда, условий передачи удара молота и пр.;
e — коэффициент восстановления удара.

2. Формула Г. К. Бондарика и М. И. Войцеховского для

Таблица 94

Значения коэффициента k

Интервал глубины зондирования, м	1,0–1,5	1.5–3,0	3,0–4,5	4,5–6,0	6,0–7,5	7,5–9,0	9,0–10,5	
k	$\frac{1,0}{1,0}$	$\frac{0,92}{0,98}$	$\frac{0,84}{0,94}$	$\frac{0,79}{0,93}$	$\frac{0,73}{0,90}$	$\frac{0,69}{0,88}$	$\frac{0,65}{0,86}$	
Интервал глубины зондирования, м	10,5–12,0	12,0–13,5	13,5–15,0	15,0–16,5	16,0–18,0	18,0–19,5	19,5–21,0	
k	$\frac{0,62}{0,84}$	$\frac{0,59}{0,83}$	$\frac{0,56}{0,82}$	$\frac{0,54}{0,81}$	$\frac{0,51}{0,79}$	$\frac{0,49}{0,78}$	$\frac{0,47}{0,77}$	

Примечание. В знаменателе даны значения коэффициента, учитывающего только приращение веса зонда, которые используют в случае отсутствия трения по боковой поверхности зонда.

* Условные обозначения унифицированы; $k = \frac{1}{\alpha + \beta - 1}$.

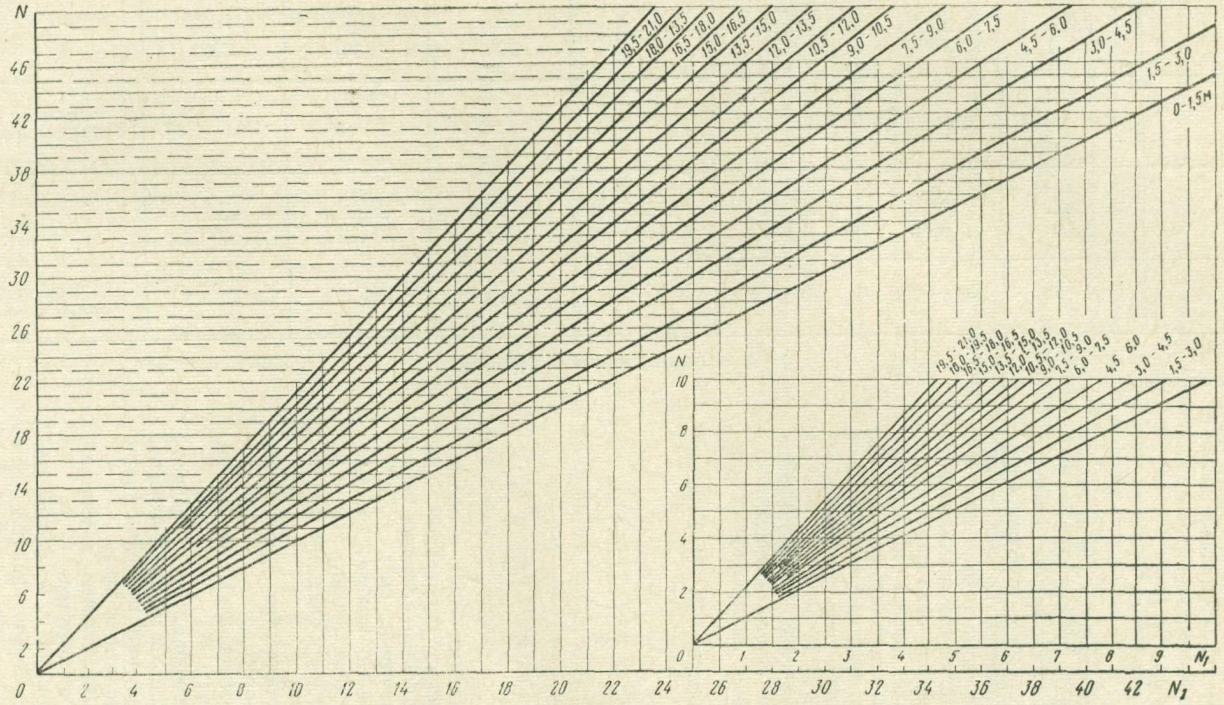


Рис. 74. Номограмма для определения приведенного числа ударов по глубине с учетом поправки на изменение веса зонда и трение

вычисления удельного динамического сопротивления пенетрации песчано-глинистых пород с учетом и без учета влияния трения по боковой поверхности зонда.

$$w=\frac{P_1H}{\left(1+\frac{P_2}{P_1}\right)\pi r^2S}+\frac{P_1+P_2}{\pi r^2}-\frac{F}{\pi r^2},$$

где w — удельное динамическое сопротивление пенетрации, кгс/см^2;
P_1 — вес молота, кгс;
P_2 — вес зонда, кгс;
H — высота падения молота, см;
r — радиус зонда, см;
S — осадка зонда от одного удара, см;
F — трение по боковой поверхности зонда, кг (учитывается при зондировании пластичных, глинистых и водонасыщенных песчаных грунтов).

3. Формула Р. Хейфели, Г. Амберга и А. Мооса:

$$R=\frac{n_1PH}{S_1}+(P+Q),$$

где R — динамическое сопротивление пенетрации, кгс;
P — вес молота, кгс;
H — высота падения молота, см;
Q — вес зонда, кгс;
n_1 — число ударов в залоге;
S_1 — осадка от залога, см.

4. Формулы для подсчета удельного динамического сопротивления пенетрации для случая отсутствия трения и небольшой глубины зондирования (до 7 м), когда весом зонда можно пренебречь, имеют следующий вид:

$$w=\frac{N}{10}\cdot\frac{PH}{F}\ \text{и}\ w=\frac{PH\cdot n}{F\sum S}\ \text{кгс/см}^2\ *,$$

где n — число ударов молота при зондировании литологически однородного слоя пород в пределах некоторого интервала глубины;
ΣS — суммарная осадка зонда от n ударов;
F — площадь поперечного сечения наконечника; другие условные обозначения приведены выше.

5. Эмпирическая формула В. А. Дуранте (для вычисления величины w песков):

$$w=47{,}1\sqrt{7{,}6+N_1}-130.$$

Результаты зондирования обычно выражают в графической форме. По абсциссе откладывают динамическое сопротивление пенетрации (N_1 или R или ΣN_1 (R)) или удельное динамическое сопротивление пенетрации (w), а по оси ординат — глубину погружения зонда. Кривая или ломаная линия, соединяющая экспериментальные точки графика зондирования на некотором расстоянии от оси ординат, соответствующего среднему значению сопротивления в этом интервале, называется *индикационной линией*.

Для определения порядка значений модуля деформации песчаных пород можно использовать эмпирическую формулу

$$E=n\cdot w,$$

где w — удельное динамическое сопротивление пенетрации;
n — безразмерный коэффициент, принимаемый по табл. 95.

* Предложены соответственно А. М. Ароновым и Г. К. Бондариком; условные обозначения унифицированы.

Таблица 95

Безразмерный коэффициент

Песок	Гравелистый крупный и средней крупности природного сложения (независимо от влажности)	Мелкий маловлажный природного сложения	Мелкий водонасыщенный природного сложения	Пылеватый маловлажный	Пылеватый очень влажный	Пылеватый водонасыщенный
Значения n	14—16	10—12	6—8	8—10	5—6	3—4

Таблица 96

Лёссовые породы	Глины, тяжелые и средние суглинки в пластичном состоянии	Легкие пластичные суглинки, средние и тяжелые суглинки в полутвердом состоянии, глины в твердом состоянии	Супеси и суглинки в твердом состоянии
Сопротивление пенетрации w, кгс/см^2	До 20	От 20 до 30	Более 30

Таблица 97

Классификация песчаных пород по числу ударов на 10 см погружения зонда
(по РСН—32—70)

Название видов песков	Исправленное число ударов N_1	Плотность	Граничные значения коэффициента пористости ε
Крупные и средней крупности	Менее 7	Рыхлые	Более 0,70
	7—20	Средней плотности	0,70—0,55
	Более 20	Плотные	Менее 0,55
Мелкие	Менее 4	Рыхлые	Более 0,75
	4—15	Средней плотности	0,75—0,60
	Более 15	Плотные	Менее 0,60
Пылеватые, водонасыщенные	Менее 4	Рыхлые	Более 0,80
	4—15	Средней плотности	0,80—0,60
	Более 15	Плотные	Менее 0,60

Примечание. Определение коэффициента пористости по N_1 путем интерполяции граничных значений ε не допускается.

Г. К. Бондарик следующим образом классифицирует лёссовые породы (табл. 96).

В табл. 97, 98, 99 приводятся различные классификации плотности песков.

При установлении геологического разреза по данным зондирования используют различные способы [4]. Для выделения однородных слоев и определения

Таблица 98

Классификация разнозернистых флювиогляциальных песков по числу ударов на 10 см погружения забивного зонда (по Г. К. Бондарику)

Плотность песка, г/см³	Характеристика	Плотные	Средней плотности	Рыхлые
2,63	Число ударов	Более 9,2	0,4—9,2	Менее 0,4
	Коэффициент пористости	Менее 0,55	0,55—0,70	Более 0,70
2,64	Число ударов	Более 9,4	0,7—9,4	Менее 0,7
	Коэффициент пористости	Менее 0,55	0,55—0,70	Более 0,70
2,65	Число ударов	Более 9,6	0,9—9,6	Менее 0,9
	Коэффициент пористости	Менее 0,55	0,55—0,70	Более 0,70

Таблица 99

Классификация песков по величине удельного динамического сопротивления пенетрации (по И. Оде)

Удельное динамическое сопротивление пенетрации, кгс/см²	Менее 25	25—50	50—100	100—200	200—400
Относительная плотность сложения породы	Очень рыхлое	Рыхлое	От рыхлого до средней плотности	Плотное	Очень плотное

среднего значения показателя пенетрации (N или R) удобно применять способ палетки. Палетка показана на рис. 75. Накладывая палетку на график накопленных сумм показателя пенетрации вида $\Sigma\ (R \text{ или } N) = f(H)$, можно расчленить разрез на слои. Слой считается однородным со средним значением показателя R_{kl}, если характеризующий его график накопленных сумм показателя пенетрации лежит между соответствующей парой параллельных прямых палетки. Точка выхода графика за пределы зоны R_{kl} является границей однородного слоя. Эта точка при последующем наложении палетки принимается за начало графика зондирования. При построении палетки все величины берутся в масштабе графика зондирования.

Статическое зондирование применяют для определения показателей свойств пород и расчленения разреза рыхлых пород на слои. Сопротивление, оказываемое породой вдавливанию зонда, называется *общим сопротивлением пенетрации*. Часть общего сопротивления, обусловленная воздействием сил реакции грунта на внедрение наконечника, представляет собой

статическое сопротивление пенетрации (Q). Вторая часть общего сопротивления представляет собой сумму сил трения, развивающихся при вдавливании зонда между его боковой поверхностью и породой. Суммарная величина этих сил называется трением по боковой поверхности зонда. Статическое сопротивление пенетрации выражается в килограммах; интенсивность статического сопротивления пенетрации, т. е. сила, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения наконечника зонда, называется *удельным статическим сопротивлением* пенетрации q (кгс/см²). По величине q пески классифицируют по плотности (табл. 100).

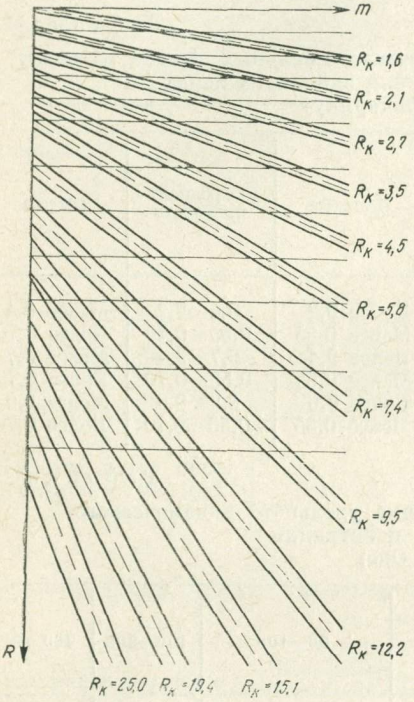


Рис. 75. Палетки для интерпретации результатов скоростных испытаний по графику вида $\Sigma R - f(m)$

Эмпирическая формула де Беера для подсчета модуля деформации песков имеет вид

$$E = 1{,}5q,$$

где q — удельное статическое сопротивление пенетрации.

РСН-33-70 рекомендуется устанавливать нормативное давление $R^н$ по величине удельного статического сопротивления пенетрации:

$R^н$, кгс/см²	q, кгс/см²
1,2	10
1,7	20
2,3	30
3,0	40
3,5	50

Примечание. При промежуточных значениях q допускается определять $R^н$ по линейной интерполяции.

Несущую способность свай по данным статического зондирования определяют в соответствии с п. 6 четвертой главы СНиП II-Б-5-67 «Свайные фундаменты».

Полевое определение величины порового давления. Давление, возникающее в жидкой и газообразной фазах грунта при приложении к нему внешней нагрузки, называется *поровым давлением*. При определении прочности глинистых пород необходимо учитывать поровое давление, которое входит в уравнение прочности в соответствии с принципом эффективных напряжений К. Терцаги.

$$\tau = (\sigma - u)\operatorname{tg}\varphi' + C',$$

где τ — сдвигающее усилие;
σ — нормальное давление;
u — поровое давление;
$\operatorname{tg}\varphi'$ — эффективный коэффициент внутреннего трения;
C' — эффективное сцепление.

При увеличении порового давления снижается эффективное напряжение ($\sigma - U$) и, следовательно, прочность грунта.

Поровое давление измеряют в теле земляных сооружений или в грунтовых основаниях сооружений при их строительстве и в начальный период эксплуата-

Таблица 100

Классификация песчаных пород по величине удельного статического сопротивления пенетрации
(по РСН-33-70)

Название видов песков	Удельное статическое сопротивление пенетрации q, кгс/см²	Плотность	Граничные значения коэффициента пористости
Крупные и средней крупности	Менее 50	Рыхлые	Более 0,70
	50—150	Средней плотности	0,70—0,55
	Более 150	Плотные	Менее 0,55
Мелкие	Менее 30	Рыхлые	Более 0,75
	30—100	Средней плотности	0,75—0,60
	Более 100	Плотные	Менее 0,60
Пылеватые неводонасыщенные	Менее 30	Рыхлые	Более 0,80
	30—100	Средней плотности	0,80—0,60
	Более 100	Плотные	Менее 0,60
Пылеватые водонасыщенные	Менее 15	Рыхлые	Более 0,80
	15—60	Средней плотности	0,80—0,60
	Более 60	Плотные	Менее 0,60

Примечание. Определение q по g путем интерполяции граничных значений не допускается.

ции, когда избыточное поровое давление не рассеялось, а прочность пород понижена.

Для измерения порового давления в полевых условиях применяются: пьезометры, пьезоманометры, приборы с дистанционными манометрами и приборы с электродинамометрами разных типов. Эти приборы закладывают в шурф или в скважину, пройденную в основании сооружения или непосредственно в грунт при отсыпке земляного сооружения. Некоторые приборы задавливают в породу. Основные сведения о некоторых конструкциях полевых приборов для измерения порового давления приведены в табл. 101.

Полевое определение объемной массы грубообломочных пород, содержащих крупные включения. Определение объемной массы песчано-глинистых пород с крупными включениями, а также гравийно-галечниковых пород производится с помощью мерного куба *. Для определения объемной массы используется следующее оборудование: 1) весы технические грузоподъемностью до 50 кг; 2) мерный куб с ребром 20—30 см — ящик с одной стенкой из плексигласа, на которой нанесена шкала объемов; 3) совок.

Работы по определению объемной массы проводят в определенной последовательности.

1. Отрывают шурфик сечением 25 × 25 или 35 × 35 см и глубиной 25—35 см (в зависимости от размеров мерного куба). Извлеченную из шурфа породу

* Предложение Г. К. Бондарика.

Таблица 101

Характеристики приборов для определения порового давления

Название и конструкция прибора	Материал фильтра	Тип датчика	Точность измерения порового давления, кгс/см²	Расход воды, см³ / Давление, кгс/см²
Прибор с дистанционным манометром Днепропетровского института инженеров транспорта (ДИИТ) *	Пористый камень	Дистанционный манометр с сильфоном	0,1	—
Прибор конструкции ДИИТ с индуктивным датчиком **	Пористый камень	Индуктивный дифференциальный	—	—
Прибор со струнным датчиком конструкции Гидропроекта **	Кварцевый песок, склеенный бакелитовым лаком, на латунной сетке	Струнный тензометр	10 мм вод. ст.	0,04 / 3
Приборы конструкции ВНИИГ им Веденеева типа ПТН-1, ПТН-2, ПТН-3 **	Стекловолокно, стекловата на латунной сетке	Струнный тензометр ДГС-118	0,02	0,01 / 1
Прибор с масляным дистанционным манометрическим датчиком Шведского геотехнического ин-та **	Карборундовый камень	Диафрагменный датчик, соединенный с масляным манометром	0,02	—

* Измеряется только положительное давление.
** Измеряется положительное и отрицательное поровое давление.

взвешивают на технических весах грузоподъемностью до 50 кг с точностью до 0,1 кг (P).

2. В мерный куб совком засыпают сухой среднезернистый песок, не содержащий крупных включений. Выравнивают поверхность песка в кубе и по шкале на прозрачной стенке мерного куба отмечают его объем (V_1).

3. Песком из мерного куба выравнивают дно шурфика с таким расчетом, чтобы отметка шкалы, фиксирующая определенный объем, или верхний край куба находились вровень с поверхностью. В шурфик устанавливают мерный куб и пазухи засыпают песком из куба. Песок засыпают совком. Линейкой выравнивают поверхность песка, оставшегося в мерном кубе.

4. Извлекают куб из шурфа и отмечают объем оставшегося песка (V_2).

5. Объем шурфика определяют суммированием объемов мерного куба (V_0) и песка, отсыпанного на дно шурфика и в пазухи между мерным кубом и стенками шурфика ($V_1 - V_2$):

$$V = V_0 + (V_1 - V_2).$$

Если мерный куб был установлен в шурфике так, что его верхний край выдавался над поверхностью, то за V_0 принимают объем части мерного куба, фиксируемый по отметке шкалы, находящейся вровень с поверхностью.

6. Объемный вес породы определяют по формуле

$$\Delta = \frac{P}{V_0 + (V_1 - V_2)}.$$

7. Результаты полевых определений объемной массы записывают в журнал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкатов Д. Н., Васильев А. В. Методические указания по геологической документации скважин шнекового бурения при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., 1964, 34 с. (ВСЕГИНГЕО).

2. Бондарик Г. К. Динамическое статическое зондирование в инженерной геологии. М., «Недра», 1964, 104 с.

3. Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. И. Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., «Недра», 1967, 372 с.

4. Бондарик Г. К., Коренева С. Л., Горячева Д. С. Методические рекомендации по определению деформационных и прочностных свойств глинистых пород методом прессиометрии. Сер. № 163, М., 1971, 71 с. (ВСЕГИНГЕО).

5. Белый Л. Д. Теоретические основы инженерно-геологического картирования. М., «Наука», 1964, 168 с.

6. Винокуров Е. Ф. Строительные свойства моренных грунтов. Минск, 1962, 125 с. (АН БССР).

7. Волков С. А., Волков А. С. Справочник по разведочному бурению. М., «Недра», 1963, 547 с.

8. Николаев Н. И. Неотектонические структурные формы и их распространение на территории СССР. — «Сов. геология», 1962, № 5, 39 с.

9. Попов И. В. Инженерная геология СССР. Ч. I. Общие основы региональной инженерной геологии. Изд-во МГУ, 1961, 178 с.

10. Попов И. В. Инженерная геология СССР. Ч. II. Европейская часть СССР. Изд-во МГУ, 1965, 471 с.

11. Попов И. В. Инженерная геология. Изд-во МГУ, 1959, 510 с.

12. Методика составления инженерно-геологических карт. Госгеолиздат, 1950, 43 с. Авт.: И. В. Попов, Р. С. Кац, А. К. Кориковская, В. П. Лазарева.

13. Пальянов П. Ф., Штейнберг А. М. Бурение скважин. М., «Недра», 1964, 355 с.

14. Ребрик Б. М. Вибротехника для бурения. М., «Недра», 1966, 232 с.

15. Россинус П. Л., Степанов Г. И. Безнасосное бурение. Памятка сменному буровому мастеру. М., Госгеолтехиздат, 1951, 16 с.

16. Чуринов М. В., Цыпина И. М., Лазарева В. П. Принципы и методика составления общих обзорных карт территории Советского Союза м-бов 1 : 1 500 000—1 : 2 500 000. — «Сов. геология», 1962, № 11, с. 112—124.

Глава шестая

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

I. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геофизические методы исследований используются в настоящее время для решения разнообразных задач инженерно-геологического характера. Принято выделять шесть основных геофизических методов исследования: электрометрию сейсмометрию, ядерные методы, термометрию, магнитометрию и гравиметрию. В практике инженерно-геологических изысканий основную роль играют электрометрия (электроразведка) и сейсмометрия (сейсморазведка). При изучении свойств горных пород все большее значение приобретают ядерные методы, которые в связи с их значительной обособленностью в настоящем справочнике рассматриваются в следующем разделе, специально посвященном этому вопросу.

Геофизические методы применяются при проведении наблюдений как с поверхности земли, так и в буровых скважинах. Исследования геофизическими методами можно проводить и в различного рода горных выработках, а также в лабораторных условиях на образцах горных пород и в пробах подземных вод.

Инженерно-геофизические исследования ведутся главным образом при помощи стандартной аппаратуры, серийно выпускаемой промышленностью.

Аппаратура. Электроразведочная аппаратура. В настоящее время при инженерно-геологических исследованиях наибольшее применение находят методы электроразведки постоянным и низкочастотным переменным током, меньшее — высокочастотная электроразведка.

Самым распространенным электроразведочным прибором является электронный стрелочный компенсатор ЭСК-1. Он предназначен для измерения разности потенциалов между приемными электродами и силой тока питающей линии. ЭСК-1 сконструирован по автокомпенсационной схеме.

Для изучения небольших глубин, с которыми приходится иметь дело в инженерной геологии, используются также: электроразведочный потенциометр ЭП-1, аппаратура низкой частоты АНЧ-1 и измеритель кажущихся сопротивлений ИКС-50.

Для лабораторных измерений могут применяться как упомянутые электроразведочные измерительные приборы, так и разнообразная электрорадиотехническая аппаратура.

Сейсмическая, акустическая и ультразвуковая аппаратура. Полевые сейсмические наблюдения проводятся с помощью сейсмических станций, под которыми понимаются комплексы аппаратуры, предназначенной для записи упругих колебаний, искусственно созданных с помощью удара или взрыва.

Существуют многоканальные, одно- и двухканальные станции (под сейсмическим каналом понимается совокупность сейсмоприемника, усилителя и гальванометра). В комплекс многоканальной сейсмостанции входят: 1) собственно сейсмостанция, в состав которой включаются блоки усилителей, панель упра-

вления и регистрирующее устройство (осциллограф в станциях с прямой записью и магнитный регистратор в станциях с магнитной записью); 2) сейсмоприемники, воспринимающие упругие колебания и преобразующие их в электрические импульсы; 3) источники питания; 4) вспомогательное оборудование (соединительные провода, катушки, телефоны, взрывные машинки и инструмент).

По своим параметрам для инженерной сейсморазведки наиболее подходит 24-канальная станция СС-24П (ПСЛ-2), смонтированная на автомашине ГАЗ-69. Эта станция является единственной из многоканальных станций, которую можно переносить вручную, так как она изготовлена в виде отдельных разнообразных блоков весом до 30 кг.

Одно- и двухканальные сейсмические установки отличаются от многоканальных своей портативностью (вес всего комплекта не превышает 20—30 кг) и простотой организации полевых работ. Алма-атинский завод геофизического приборостроения выпускает одноканальную установку под маркой ОСУ-1. Информация, получаемая при помощи этих станций, несколько уступает по своему качеству той, которая может быть получена при помощи многоканальных станций. Акустические установки, серийный выпуск которых осваивается в настоящее время приборостроительными заводами, используются для детального расчленения донных отложений при проведении изысканий на морских и пресноводных акваториях, под строительство портов, молов, мостов и т. п. Станция рассчитана на работу методом отраженных волн по одноканальному варианту. Регистрация упругих импульсов производится автоматически при непрерывном движении судна.

Ультразвуковая аппаратура предназначена для измерения скоростей распространения упругих колебаний на образцах горных пород. Используемые частоты измеряются десятками кгц. Измерения осуществляются с помощью сейсмоскопов. В инженерной сейсмике наиболее широкое применение получил серийно выпускаемый сейсмоскоп ИПА-59 (импульсная переносная аппаратура), который может быть использован как в лабораторных, так и в полевых условиях. В комплект ИПА-59 входит собственно сейсмоскоп, пьезоэлектрический датчик и приемник упругих колебаний, а также приставка для фотографирования волнового процесса с экрана электронно-лучевой трубки. Определение скоростей сводится к измерению времени прихода упругих импульсов в точки, расстояния которых от излучателя известны.

Каротажная аппаратура. При геофизических исследованиях скважин, пробуренных для инженерно-геологических целей, могут применяться как переносные приборы, используемые при наземной геофизической разведке, так и специальные каротажные станции.

Для электрического, ядерного и термического каротажа в скважинах глубиной до 250 м применяется серийно выпускаемая автоматическая каротажная станция АКС-250, смонтированная на шасси легкового автомобиля ГАЗ-69.

В комплект каротажной станции входят: 1) глубинный прибор (каротажный зонд); 2) трехжильный или многожильный кабель с хорошей изоляцией; 3) приборы для регистрации разности потенциалов, пропорциональных измеряемому параметру поля; 4) источники питания; 5) лебедки для спуска в скважину и подъема каротажного кабеля; 6) блок-баланс, устанавливаемый над скважиной и предназначенный для направления кабеля в скважину и синхронной передачи глубины расположения индикатора поля на лентопротяжный механизм регистраторов.

В неглубоких буровых скважинах измерения проводятся иногда в отдельных точках при помощи обычных электроразведочных приборов (ЭСК-1, ЭП-1).

Аппаратура диэлектрического каротажа (ДК-1) состоит из скважинного прибора и пульта управления. В скважинном приборе расположен специальный конденсатор, который является частью колебательного контура генератора. При изменении диэлектрических свойств окружающих пород изменяются емкость конденсатора (а значит, и частота генерации) и амплитуда колебаний генератора. По такому же принципу, как и ДК-1, построены различного рода радиовлагомера

для определения естественной влажности и пористости рыхлых грунтов. Датчиком поля служит конденсатор-зонд специальной конструкции, погружаемый в скважину (шпур) или непосредственно заглубляемый в грунт.

При термических исследованиях вдоль ствола скважин или шпуров изменяются температуры среды. При этом чаще всего применяются электрические термометры разных марок (ЭТС-2, ЭТМИ, ЭТО и др.). Чувствительным элементом или датчиком температуры являются два термочувствительных сопротивления, находящихся в противоположных плечах моста Уитсона. Два других выполнены из таких сплавов, что их сопротивления практически не зависят от температуры. Если температура окружающей среды изменяется, то появляется разница сопротивлений термочувствительных и нечувствительных плеч моста и возникает разность потенциалов. Для получения термограмм применяются как точечные замеры температуры (особенно в шпурах), так и непрерывная регистрация с помощью любой каротажной станции.По способу возбуждения упругих колебаний и их преобладающим частотам различают сейсмический, акустический и ультразвуковой каротаж.

Сейсмический каротаж выполняется с обычной полевой аппаратурой. Упругие колебания сейсмического диапазона частот возбуждаются взрывами близ устья или забоя скважины. При акустическом каротаже возбуждение упругих волн осуществляется с помощью высоковольтных разрядов в заполненных водой скважинах. Частоты генерируемых колебаний измеряются единицами кгц. Для приема волн применяются или группы сейсмоприемников, или одиночный сейсмоприемник, последовательно перемещаемый по стволу скважины.

Для производства ультразвукового каротажа может быть использована установка ИПА-59, комплект которой дополняется скважинным зондом, или каротажная установка УЗК-2.

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

При инженерно-геологических изысканиях возникает необходимость определять прочностные параметры, пористость, трещиноватость, водонасыщенность и другие физико-механические и водно-коллекторские характеристики горных пород. Теоретические и экспериментальные исследования позволили установить связь между этими параметрами и физическими свойствами пород, измеряемыми при геофизических исследованиях.

Статистические методы определения модуля упругости в массиве, основанные на непосредственном измерении величины деформации под действием искусственно создаваемых нагрузок, очень громоздки и позволяют получать значение модуля только в отдельных точках. Сейсморазведка дает возможность определять скорости продóльных и поперечных волн и затем, зная плотность пород, рассчитывать значения динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона. На основании теории упругости выводятся следующие формулы:

$$\sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2\left(V_p^2 - V_{s_2}^2\right)};$$

$$E = \frac{V_s^2 \delta \left(3V_p^2 - 4V_s^2\right)}{V_p^2 - V_s^2};$$

$$E = \frac{V_p^2 \delta (1+\sigma)(1-2\delta)}{1-\sigma}.$$

Здесь V_p и V_s — скорость распространения соответственно продольных и поперечных волн в горных породах;

δ — плотность горных пород;
σ — коэффициент Пуассона;
E — модуль Юнга.

Плотность литологически однородных, особенно скальных, пород меняется в относительно небольших пределах, поэтому ее можно определить или на образцах, или в скважинах и распространить полученные значения на весь подлежащий обследованию массив. Продольную скорость распространения упругих колебаний определяют обычными приемами сейсморазведки. Увеличения интенсивности поперечных волн при изучении небольших глубин можно добиться, возбуждая упругие колебания ударами в горизонтальной плоскости или направляя энергию взрывов по горизонтали. Для этого чтобы сейсмоприемники лучше воспринимали эти волны, их укладывают горизонтально в небольших ямах.

В получаемых величинах модулей автоматически учитываются все неоднородности состава пород, их нарушенность, характер увлажнения и т. д. По значениям скоростей распространения продольных и поперечных волн вычисляют динамические упругие константы пород, они обычно бывают больше констант, получаемых статистическим путем по данным пробных нагрузок. Вопрос о переходе от динамических упругих модулей к статистическим изучен пока недостаточно полно.

Для скальных пород при малой минерализации подземных вод наблюдается почти пропорциональная зависимость между их удельными электрическими сопротивлениями и модулем Юнга.

Пористость, влажность и плотность. В противоположность инженерно-геологическим, геофизические методы позволяют определять пористость, влажность и плотность достаточно большого объема пород, что уменьшает возможность получения случайных результатов. При режимных наблюдениях изучается всегда один и тот же объем пород при минимальном нарушении их естественной структуры.

Емкостной метод изучения влажности и пористости горных пород основан на четко выраженной зависимости их диэлектрической проницаемости от количества находящейся в них воды. Диэлектрическую проницаемость определяют по емкости конденсатора, между пластинами которого помещают изучаемую породу. Для наблюдений в естественных условиях предложены специальные конденсаторы, смонтированные в виде зондов. Обычно для размещения зондов-конденсаторов бурят небольшие скважины или шпуры.

В условиях полного водонасыщения горных пород по значениям удельного электрического сопротивления пород и насыщающих их подземных вод можно определить их пористость. При этом используют зависимость

$$\rho_п = F \cdot \rho_в,$$

где $\rho_п$ — сопротивление породы;
$\rho_в$ — сопротивление воды;
F — так называемый параметр пористости или относительное сопротивление.

Для различных типов горных пород зависимость F от пористости наиболее определенно устанавливается при минерализации насыщающих вод, превышающей примерно 3 г/л. В случаях, когда пористость породы превышает 30%, можно пользоваться каротажными зависимостями и при значительно более низкой степени минерализации. При меньшей пористости и незначительной минерализации подземных вод для каждого района и для каждого типа пород в лабораторных условиях следует выяснить характер зависимости отношения $\frac{\rho_п}{\rho_в} = F$ от пористости. В дальнейшем на основании полевых наблюдений определяется величина пористости.

Для характеристики пористости помимо электрических параметров используют также скорости распространения упругих колебаний, полученные при акустическом каротаже буровых скважин.

Трещиноватость. При изучении трещиноватости, т. е. разрывов сплошности пород без заметного смещения пластов, нашли применение геоэлектрические методы и сейсморазведка, в значительно меньшей степени микромагнитная съемка, термометрия, радиометрия.

Наличие трещин резко изменяет физические свойства массива горной породы. При наблюдениях необходимо учитывать: 1) общий объем трещин по отношению к изучаемому объему горной породы, 2) их распределение и ориентацию, 3) характер вещества, заполняющего трещины. Чаще всего для изучения трещиноватости используют геоэлектрические методы.

В зависимости от соотношений количества воды или воздуха, находящихся в трещинах, электрическое сопротивление соответственно либо падает, либо возрастает. В сильнотрещиноватых породах это дает возможность определять глубину залегания подземных вод, а также намечать уровень, на котором открытая трещиноватость замирает. Однако определить глубину залегания подземных вод в трещиноватых породах можно лишь при условии, если эти породы непосредственно выходят на поверхность или перекрыты наносами незначительной мощности.

При использовании разносов, обеспечивающих изучение горных пород ниже уровня подземных вод, отдельные зоны трещиноватости выражают на профилях и картах сопротивлений минимумами. При использовании разносов, характеризующих геоэлектрические особенности толщи, лежащей выше уровня подземных вод, трещиноватые зоны выделяются минимумами сопротивлений либо максимумами. Последние наблюдаются при глубоком залегании подземных вод, малой мощности четвертичного покрова и значительной открытой трещиноватости. При каротаже по методу сопротивлений ($\rho_к$) трещины проявляются ярко выраженными минимумами.

Трещиноватость горных пород вызывает их электрическую анизотропию, т. е. неодинаковую электропроводность в различных направлениях. Отсюда возникает возможность использования круговых зондирований для определения господствующего простирания трещин и изменения их интенсивности на различной глубине.

При выполнении круговых зондирований кажущееся сопротивление измеряют в одной и той же точке, но при разных азимутах установки. Обычно бывает достаточно произвести наблюдения при четырех азимутах 45°. Значения $\rho_к$, полученные для различных разносов, откладывают по тем азимутам, при которых они были измерены. Отложенные по радиусам точки соединяют линией, которая носит название полярной диаграммы.

Если толща анизотропных пород залегает вертикально или наклонно, то полярные диаграммы представляют собой эллипсы, вытянутые по простиранию анизотропной толщи. Та же картина наблюдается над вертикальными и наклонными трещиноватыми зонами — большая ось полученных диаграмм направлена по простиранию господствующей системы трещин.

Затруднения при интерпретации результатов геоэлектрических исследований в большинстве случаев определяются не тем, что трещины не вызывают аномалий в изучаемых электрических полях, а тем, что получаемые аномалии не удается расшифровать однозначно.

Изучение трещиноватости с успехом проводится также методом сейсморазведки. Большие различия в скоростях распространения упругих колебаний, а особенно волновых картин в трещиноватых зонах и в монолитных породах во многих случаях обеспечивают получение четких результатов. Наиболее характерную волновую картину над трещиноватыми зонами можно получить, используя высокочастотную сейсморазведку. Значительной разрушающей способностью при выделении трещин в разрезах скважин обладает метод акустического каротажа. На диаграммах скоростей распространения упругих колебаний против трещин наблюдаются глубокие минимумы.

При изучении трещиноватости особенно ценные сведения можно получить при совместном использовании геоэлектрических и сейсмических методов с обя-

зательным привлечением всех данных, полученных в результате геологической съемки, проходки горных выработок и гидрогеологического опробования скважин.

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Геофизические методы широко используются для изучения таких физико-геологических явлений, как карст, оползни и многолетняя мерзлота.

Изучение карста. Большое значение для изучения карста имеет выделение в карстующемся массиве пород, устойчивых к агрессивному воздействию окружающей среды и в первую очередь водоупорных пластов. Если карстующиеся пласты значительно отличаются по своим физическим свойствам от вмещающих пород и если мощность их достаточно велика, то они легко обнаруживаются по аномалиям, вызываемым ими в силовых физических полях. Во многих районах при прослеживании сланцевых барражей в толщах интенсивно закарстованных известняков хорошо зарекомендовало себя совместное использование магнитометрии, электрического профилирования по методу сопротивления ($\rho_к$) и методу естественного электрического поля (PS), а также детальных наблюдений за поведением радиоволнового поля широковещательных радиостанций. При определении пространственного положения водоупорных барражей большие возможности открывает корреляция аномалий, наблюдаемых на поверхности земли и в разрезах скважин. Основным способом изучения поверхностных карстовых форм является электрическое профилирование. Вспомогательную роль играют электрические зондирования и съемка по методу естественного электрического поля. Возможно использование и сейсморазведки для картирования и определения глубин погребенных карстовых депрессий.

Кроме различий в физических свойствах материала-заполнителя и вмещающих пород возможность выявления погребенных поверхностных карстовых форм определяется их размерами по отношению к мощности вышележащих пород. Аномалии в распределении физических полей, вызываемые карстовыми полостями, расположенными внутри массива, определяются рядом факторов, в основном уже проанализированных при описании возможностей изучения трещиноватости и поверхностных карстовых форм.

Следует иметь в виду, что в пределах зоны аэрации по сравнению с трещинами, а тем более с погребенными поверхностными карстовыми формами возрастает роль воздушного заполнителя. Вследствие этого карстовые пещеры довольно часто выделяются как участки повышенных сопротивлений.

Изучение глубинных карстовых полостей можно проводить с поверхности земли, из горных выработок и из соседних доступных для наблюдения карстовых полостей. При исследованиях с поверхности земли используют главным образом электрическую разведку методом сопротивлений. Принципиально применима и сейсморазведка, а при очень больших размерах пустот (главным образом с воздушным заполнителем) также гравиразведка.

Кроме соотношения электрических параметров заполнителя и окружающей породы, возможности выделения карстовых полостей методами электроразведки определяются и их размерами. Полость, которая по своей форме приближается к сфере и заполнена проводящим материалом, можно обнаружить на глубине, не превышающей величины двух диаметров полости.

Закарстованные зоны отчетливо выделяются в разрезах скважин на каротажных диаграммах, по которым иногда условно удается определять коэффициент закарстованности. Сопоставление результатов геофизических наблюдений по нескольким скважинам и корреляция характерных аномалий позволяют устанавливать вертикальную зональность в распределении карстовх явлений. Для поисков полостей могут быть использованы также и микроскопические наблюдения. В тех случаях, когда расстояние от горной выработки до полости невелико, наблюдаются аномальные значения скоростей распространения упругих колебаний.

Изучение оползней. При изучении оползневых движений геофизик должен в первую очередь постараться выявить поверхности, по которым происходит смещение. Для этой цели до последнего времени использовался исключительно метод электрического зондирования, причем точки располагались по очень густой сети. Как показали результаты полевых работ, проведенных на Черноморском побережье Кавказа и Крыма, задача обычно оказывается принципиально разрешимой в том случае, если смещение происходит по коренным породам. Значительно сложнее выявить поверхность скольжения в однородных отложениях. Только в отдельных случаях вследствие перемятости зон скольжения аномалии достаточно интенсивны для интерпретации.

При изучении поверхностей скольжения весьма перспективной оказывается микросейсморазведка. Она позволяет: 1) непосредственно определять зависимость между скоростью распространения упругих колебаний и степенью нарушенности (раздробленностью, трещиноватостью и выветрелостью) пород, слагающих тело оползня; 2) непрерывно прослеживать границы раздела, в частности поверхности скольжения, что позволяет характеризовать их особенности даже на протяжении весьма небольших участков; 3) обеспечить высокую производительность работ, достигающую 1—1,5 км в день непрерывных профилей отряда, состоящего из одного оператора и двух рабочих.

Геофизические методы могут быть использованы также для непосредственных наблюдений за движением оползневых масс. В скважины, пройденные в теле оползня, заключают магнитные реперы, за их продвижением наблюдают с поверхности земли путем микромагнитной съемки, выполняемой через определенные отрезки времени. Вместо магнитных реперов можно применять электроды, у которых подводящие ток провода выведены на поверхность земли. Следует применять меры к тому, чтобы провода не были повреждены при перемещении пород, для чего их скручивают в виде пружин. В цепь через определенные промежутки времени включают электрический ток и снимают эквипотенциальные линии подобно тому, как это делается в методе заряженного тела. Смещение центра разновременных замеренных эквипотенциальных линий позволяет судить о скорости движения оползня.

Более точные результаты дает съемка градиентов потенциалов вдоль направления смещения электродов. Подобная методика наблюдений применяется при изучении движения ледников. Несмотря на очень высокое сопротивление льда, погруженный в него электрод при подаче высокого напряжения создает на поверхности заметное электрическое поле.

Изучение многолетней мерзлоты. В настоящее время широко используются геологические и геотермические методы, позволяющие решать две группы задач: 1) общие для любых районов проведения изысканий, независимо от их температурного режима; 2) связанные непосредственно с изучением многолетней мерзлоты как физико-геологического явления.

В задачах первой группы необходимо выделять определение мощности и состав четвертичных отложений, что при проведении инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий имеет во многих случаях решающее значение в условиях как талых, так и мерзлых пород.

В областях развития низкотемпературной мерзлоты наблюдаются следующие специфические условия: 1) удельное электрическое сопротивление большинства мерзлых четвертичных отложений значительно выше сопротивления как талых,так и мерзлых пород коренной основы; 2) большая разница в сопротивлении мерзлых пород и подстилающих их образований является благоприятным фактором, позволяющим получать кривые зондирования, на которых кровля коренных пород отмечается крутопадающей ветвью; 3) интерпретация кривых зондирования встречает трудности, связанные с высоким значением отношения $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и невыдержанностью величины ρ_2; 4) отмеченные трудности интерпретации потребовали разработки некоторых искусственных приемов, которые в известной степени облегчают получение удовлетворительных по точности результатов.

Наличие в толще многолетнемерзлых пород дополнительных электрических границ ограничивает возможности использования электроразведки при изучении структур и геологическом картировании. Данные для структурных выводов можно получить только в том случае, если опорный горизонт залегает значительно глубже нижней поверхности мерзлой зоны. Используя для этой цели профилирование, необходимо брать разносы бо́льшей длины, чем в аналитических геологических условиях, но при положительных температурах горных пород. Разрешающая способность профилирования при прослеживании пластов коренных пород и тектонических нарушений в условиях развития многолетней мерзлоты в большинстве случаев оказывается пониженной.

В задачах второй группы наиболее важно определение нижней и верхней границ распространения мерзлоты. Для их определения при исследованиях с поверхности земли используют метод электрического зондирования. Верхнюю поверхность мерзлоты фиксируют по крутому подъему кривых зондирования. Ошибки в определении поверхности могут быть связаны с постепенным характером перехода сопротивлений от талых пород к мерзлым. Граница сопротивлений наиболее четко проявляется в чистых песках, значительно менее ясной оказывается она в перемежающихся глинистых и песчанистых отложениях, в которых льдистость возникает при разных температурах.

Нижнюю границу мерзлоты прослеживают по правой крутопадающей ветви кривой. Наиболее благоприятен в литологическом отношении однородный разрез. В отдельных случаях зондирования позволяют выделять в мерзлой толще пластовые талые зоны.

В скважинах верхняя и нижняя границы мерзлоты наиболее точно определяются методами электрического и термического каротажа. В установившихся термических условиях эти границы соответствуют переходу термограмм через линию нуля, изменению их наклона, резкому скачку сопротивлений и аномалиям в естественном электрическом поле. В разрезах скважин удается выделить даже самые незначительные растепленные зоны.

Естественным продолжением задачи по определению верхней и нижней границ распространения мерзлоты является картирование мерзлых пород. Помимо электрических зондирований для этой цели широко используется профилирование, на графиках профилей сопротивления участки развития мерзлоты выделяются максимумами сопротивлений. Целесообразно располагать профили в соответствии с данными ландшафтной съемки.

Мерзлую зону картируют по результатам температурных наблюдений, выполняемых при помощи термощупов. Для этой же цели можно использовать и радиоэманационную съемку.

В горных районах инженерно-геологические исследования тесно связаны с решением вопросов гляциологии. Из геофизических методов при изучении горных ледников небольшой мощности чаще всего используют электроразведку на постоянном токе. Породы, слагающие ложе ледника, отмечаются на кривых электрических зондирований пониженными сопротивлениями, независимо от литологического состава. Исходя из опыта канадских геофизиков, можно считать, что для определения мощностей ледников весьма перспективно применение частотных электромагнитных зондирований, а также радиоволновых методов. При изучении ледников с успехом применяется также сейсморазведка.

Детальное профилирование позволяет по минимумам сопротивлений обнаружить и оконтурить талые участки и места включения обломочного материала на льду. Скопления погребенного льда в моренных отложениях четко отмечаются на картах сопротивлений максимумами. При значительной протяженности скоплений погребенного льда с помощью зондирования удается определять глубину таких скоплений, а в некоторых случаях и их мощность.

II. РАДИОИЗОТОПНЫЕ И ПЕНЕТРАЦИОННО-КАРОТАЖНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Важным достоинством ядерных методов следует считать возможность получения с их помощью непрерывной количественной информации по глубине исследуемого разреза путем применения ядерного каротажа. Это преимущество является особенно важным, если учесть значительную изменчивость свойств пород в разрезе в пределах различных типов отложений, что наблюдается повсеместно.

Наконец, ядерные методы можно совмещать с пенетрационными, что обеспечивает проведение инженерно-геологических исследований комплексом полевых методов и позволяет получать информацию о физико-механических свойствах пород и их литологическом строении без бурения скважин.

Метод поглощения гамма-излучения. Сущность метода состоит в том, что гамма-излучение, проходя через вещество, поглощается им в зависимости от массы вещества, заключенного между источником и детектором излучения. При определенных условиях регистрируемая интенсивность проникающей гамма-радиации зависит только от плотности среды. Поскольку метод поглощения гамма-излучения позволяет определять массу вещества, находящегося на пути гамма-лучей, то в этом смысле он эквивалентен весовому способу определения массы *in situ*. Метод хорошо развит, и имеется большое число опубликованных работ, в которых рассмотрены физические основы, теория, аппаратура и область применения в инженерной геологии и грунтоведении.

Установлено, что метод позволяет определять объемную массу пород с высокой степенью точности (до $\pm 0{,}01$ г/см^3). При этом объемная представительность получаемых значений объемной массы в зависимости от толщины исследуемого слоя пород составляет 15 дм^3.

На практике в полевых условиях нашли применение три схемы определения объемного веса методом поглощения гамма-излучения (рис. 76). Схема *а* используется при проведении измерений в двух параллельных скважинах. Глубина измерений в этом случае зависит исключительно от технической возможности бурения параллельных скважин. Практически такие скважины удается пробурить на глубину 5—10 м. Схемы *б* и *в* применяются для измерения объемной массы в поверхностном слое грунта в вертикальной *б* и горизонтальной *в* плоскостях.

В разработанных конструкциях приборов для определения плотности пород методом поглощения гамма-излучения применяются источники излучения Co-60 и C-137 активностью 2—7 мг-экв. В качестве детекторов излучения использовались как счетчики Гейгера-Мюллера, так и сцентилляционные детекторы.

Метод рассеянного гамма-излучения. Применение этого метода для определения объемной массы пород основано на имеющейся функциональной зависимости между регистрируемым рассеянным гамма-излучением и плотностью рассеивающей среды.

В самом общем случае интенсивность рассеянного гамма-излучения, кроме плотности среды, зависит от энергии первичного гамма-излучения и расстояния между источником излучения и детектором. Эта зависимость носит экстремальный характер. Начальный участок кривой зависимости $I_{\gamma\gamma} = f(\rho)$ характеризуется возрастанием интенсивности рассеянного излучения с увеличением плотности среды. Далее имеем инверсионный участок, характеризующийся неоднозначной зависимостью рассеяния гамма-квантов при изменении плотности. Наконец, при дальнейшем увеличении плотности среды наблюдается падение интенсивности рассеянного излучения.

Доинверсионный участок кривой $I_{\gamma\gamma} = f(\rho)$ имеет наибольшую чувствительность к изменению плотности и является наиболее выгодным для практического определения плотности пород. Однако им редко удается воспользоваться, так как он соответствует изменению объемной массы в пределах от 0 до 1 г/см^3.

Этот участок зависимости наиболее выгодно использовать для изучения плотности торфяников, сапропелей и некоторых других типов природных образований, имеющих объемную массу меньше 1 г/см³. На практике мы встречаемся с грунтами и породами, у которых объемная масса, как правило, более 1,3—1,4 г/см³, поэтому для изучения их плотности применяются обычно послеинверсионные зонды.

К факторам, влияющим на определение плотности пород методом рассеянного гамма-излучения, относятся: влияние длины зонда и мощности источника излучения, влияние химического состава пород и их влажности. Сюда же относятся условия калибровки зондов и оценка возможных ошибок при практических работах. Установлено, что точность определения плотности пород данным методом не хуже ±0,03 г/см³, а объем породы, для которой получаем среднее значение плотности, может составлять от 1 до 20 дм³ в зависимости от условий измерения.

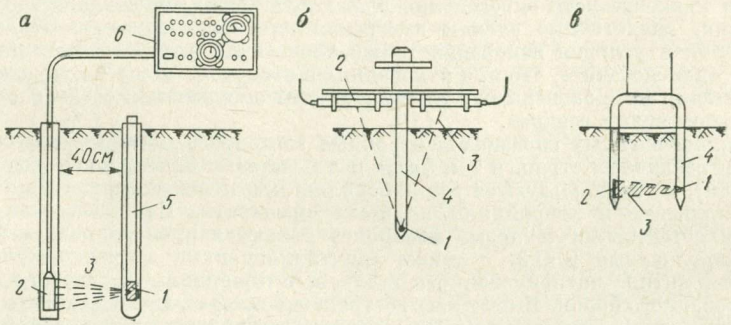


Рис. 76. Схемы определения объемной массы грунтов методом поглощения гамма-излучения
а — горизонтальное просвечивание слоя грунта в двух параллельных скважинах; *б* — вертикальное просвечивание поверхностного слоя; *в* — горизонтальное просвечивание поверхностного слоя вилкой
1 — источник гамма-квантов; *2* — детектор; *3* — пучок гамма-квантов; *4* — вилка; *5* — штанга с источником излучения; *6* — радиометр

В практике инженерно-геологических исследований получили распространение три схемы измерения объемной массы пород методом рассеянного гамма-излучения (рис. 77).

Схема (*а*) используется при измерении плотности в поверхностном слое грунтов в обнажениях и горных выработках. Конструкции гамма-плотномеров, работающие по этой схеме, позволяют определять объемную массу грунтов как в отдельных точках массива, так и непрерывно по заданному профилю поверхностных отложений методом гамма-гамма-профилирования. В последнем случае для перемещения измерительного зонда и регистрирующей аппаратуры может быть использован автомобильный транспорт.

Схему (*б*) применяют в зондах, предназначенных для измерения объемной массы грунтов в обсаженной скважине. В этом случае измерения можно производить как в отдельных точках по глубине скважины, так и непрерывно по методу гамма-гамма-каротажа.

Схема (*в*) по принципу измерений не отличается от предыдущей схемы. Здесь лишь исследования выполняются без предварительного бурения скважины путем вдавливания зонда с помощью специальных устройств.

Выбор необходимой схемы измерения зависит от требований решаемой инженерно-геологической задачи и условий определения объемного веса.

Метод рассеянного нейтронного излучения. Этот метод развит для определения влажности грунтов. Он основан на имеющейся

функциональной зависимости аномального замедления быстрых нейтронов до тепловой энергии водородсодержащей средой. Такие параметры взаимодействия нейтронов с водородом, входящим в состав молекул воды, как потеря энергии на один акт взаимодействия, необходимое число соударений для замедления до тепловой энергии и сечение рассеяния тепловых нейтронов, превосходят на целый порядок и более соответствующие параметры породообразующих элементов. Сечения поглощения тепловых нейтронов оказываются весьма высокими лишь для некоторых элементов. К аномальным поглотителям нейтронов тепловых энергий относятся B, Cl, Cd, Li, K, Fe. Учитывая последнее обстоятельство, для определения влагосодержания пород методом рассеянного нейтронного излучения на практике применяются два способа. Первый из них основан на регистрации тепловых нейтронов и используется в тех случаях, когда в исследуемых породах отсутствуют сильные поглотители тепловых нейтронов. Второй способ основан на регистрации нейтронов надтепловых энергий и используется при исследовании влагосодержания засоленных пород.

Для практического определения влажности нашли применение три схемы измерения, аналогичные схемам измерения плотности грунтов. Области их применения и условия измерений также аналогичны определению плотности. Следует лишь добавить, что при измерениях в поверхностном слое грунта влажность изменяется в зависимости от температуры окружающей среды и от выпадения атмосферных осадков.

В промышленных образцах нейтронных влагомеров, которые выпускаются фирмами различных стран, в том числе и в Советском Союзе, в качестве источников нейтронов используются радий-бериллиевые, полоний-бериллиевые, актиний-бериллиевые и америций-бериллиевые препараты. Наиболее распространенными детекторами тепловых нейтронов являются пропорциональные счетчики, наполненные $B^{10}F3$, а также сцинтилляционные детекторы-кристаллы иодистого лития, активированного таллием, и кристаллы сернистого цинка, активированного бором. Имеют распространение газоразрядные счетчики гамма-излучения с кадмиевым экраном. В последнее время нашли применение гелиевые пропорциональные счетчики, которые эффективны для регистрации надтепловых нейтронов.

При использовании гамма-плотномеров и нейтронных влагомеров различных конструкций существенное значение имеет тарировка используемых приборов, с помощью которой получают количественную зависимость между регистрируемым излучением и параметром плотности или влажности для конкретного прибора. В настоящее время получили распространение три способа тарировки: теоретический, экспериментальный и расчетно-экспериментальный. В свою очередь экспериментальный способ тарировки приборов осуществляется как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Радиоактивный каротаж. Методы радиоактивного каротажа (РК) включают в себя гамма-каротаж (ГК), гамма-гамма-каротаж (ГГК) и нейтрон-нейтронный каротаж (ННК). Все указанные виды РК имеют значительное количество модификаций, предусматривающих различные условия и способы измерения ядерных эффектов, вызванных взаимодействием излучения с породообразующими элементами.

При гамма-каротаже регистрируется естественная радиоактивность пород, связанная с наличием в них таких радиоактивных элементов, как U^{235}, U^{238}, Th^{232}, K^{40} и продуктов их распада. Количественное содержание этих элементов зависит от типа породы, ее происхождения и химического состава. Эта зависимость и является физической основой для литологического расчленения разреза пород по данным ГК. Отмечено, например, что увеличение содержания глинистых частиц в карбонатах сопровождается ростом содержания в них тория и калия, а также увеличением отношения тория и калия к урану — радию. Вариации в содержании радиоактивных элементов, как правило, согласуются с минеральным составом глин. Глины, состоящие из гидрослюдистых минералов, содержат в три раза больше калия и характеризуются бо́льшими величинами

отношения тория к урану. Каолиновые глины отличаются повышенным содержанием урана. При исследовании четвертичных отложений установлено, что радиоактивность песков целиком зависит от количественного содержания глинистых частиц, поскольку последние обладают повышенным содержанием тория и других радиоактивных элементов. Фильтрационные свойства пласта, как известно, также в значительной степени зависят от распределения в нем глинистых частиц.

Гамма-гамма-каротаж (ГГК). Сущность метода ГГК состоит в регистрации рассеянного породой гамма-излучения, которое испускается источником гамма-квантов, размещенным в каротажном зонде при перемещении его по скважине. По данным ГГК мы получаем диаграмму распределения объемного веса пород по разрезу вдоль исследуемой скважины. Для исключения влияния химического состава пород детектор гамма-излучения окружается экраном из свинца или кадмия для поглощения мягкой компоненты гамма-излучения. Оптимальная длина зонда при этом составляет 40 см. Если по данным ГГК в разрезе надо выделить литолого-петрографические типы пород (песчаники, известняки, доломиты, гипсы, ангидриты), то применяют модификацию селективного ГГК, чувствительного к химическому составу пород и не чувствительного к плотности окружающей среды. Для этой цели регистрируют мягкую компоненту рассеянного излучения. Оптимальная длина зонда при этом составляет 10—15 см, а в качестве источника мягкого гамма-излучения используют Se-75 или Hg-203.

При интерпретации плотности пород по данным ГГК скважин основной помехой являются каверны. На каротажных диаграммах каверны дают положительный сигнал, равнозначный уменьшению плотности исследуемого пласта. Для корректировки результатов измерений в этих случаях обычно используют дополнительные данные кавернометрии или других видов геофизического каротажа.

Нейтрон-нейтронный каротаж (ННК). Сущность метода состоит в регистрации рассеянного нейтронного излучения, испускаемого источником быстрых нейтронов, размещенным в каротажном зонде и перемещаемым по скважине. В результате проведения ННК получают диаграмму распределения влагосодержания пород по разрезу вдоль исследуемой скважины, а также диаграмму содержания аномальных поглотителей нейтронов. Для выявления распределения аномальных поглотителей нейтронов вдоль скважины применяют инверсионные зонды, т. е. зонды, не чувствительные к влагосодержанию. Оптимальная длина таких зондов составляет 10—15 см. Малые доинверсионные зонды весьма чувствительны к изменению влагосодержания, однако они обладают небольшой глубиной исследования. При наличии в скважине бурового раствора они не несут информации из пласта. При исследовании скважин с буровым раствором нашли применение послеинверсионные зонды длиной 50 см.

В зависимости от вида регистрируемого излучения различают нейтронный каротаж по тепловым нейтронам (НК — Т), по надтепловым нейтронам (ННК — Н) и нейтронный гамма-каротаж (НГК).

Сущность метода НГК состоит в регистрации захватного гамма-излучения, которое испускается атомами породообразующих элементов при поглощении ими замедлившихся нейтронов. Выход захватного гамма-излучения в однородной среде пропорционален плотности тепловых нейтронов и зависит от замедляющих свойств исследуемой среды, т. е. от водородсодержания. НГК используется в основном для дифференциации исследуемого разреза по влагосодержанию. Его преимущество перед методом ННК состоит в большей глубине исследования пород и, следовательно, в меньшем влиянии на результаты измерения скважинных условий.

В инженерной геологии при изучении рыхлых отложений метод погружения каротажного зонда вдавливанием оказался наиболее оптимальным, исходя из методических и технико-экономических соображений.

Пенетрационно-каротажные методы. Пенетрационный каротаж производится по схеме *в* (рис. 78). Преимущество такого способа

исследований в методическом отношении состоит в том, что каротажный зонд оказывается погруженным в исследуемую среду и помехи, связанные с технологией бурения и конструкцией скважины, отсутствуют полностью. В технико-экономическом отношении этот способ ведения каротажа также имеет достоинства. Он не требует предварительной проходки скважин. Здесь проходка скважины совмещается с процессом ведения исследований, а сам способ вдавливания используется как метод исследования грунтов статистическим зондированием.

На рис. 78 показана схема пенетрационно-каротажной станции СПК, которая в настоящее время выпускается промышленностью. Установка имеет специальное гидравлическое устройство, развивающее осевую нагрузку 10—15 тс и включает датчики ГК, ГГК, ННК, а также измерительные устройства для регистрации лобового сопротивления и трения грунта при погружении зонда.

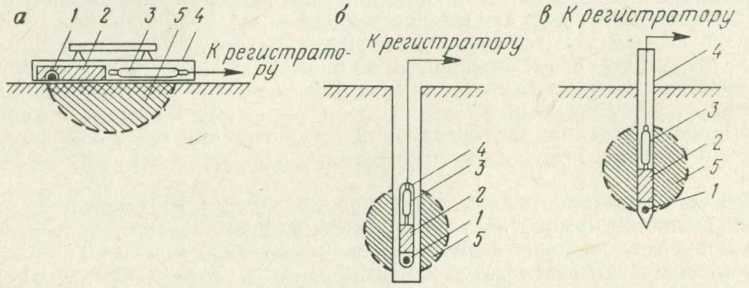


Рис. 77. Схемы измерения объемной массы грунтов методом рассеянного гамма-излучения

а — поверхностный гамма-плотномер; *б* — измерение объемной массы в скважине; *в* — измерение объемной массы при вдавливании зонда в грунт
1 — источник излучения; *2* — экран; *3* — детектор; *4* — кожух зонда; *5* — зона измерения

Разработана установка аналогичного принципа действия для изучения донных морских осадков методом пенетрационного каротажа (рис. 79). При этом специальная автономная установка с гидроэлектрическим устройством погружается на дно. Управление операциями по вдавливанию и извлечению каротажного зонда производится дистанционно с плавсредства.

Совмещение методов радиоактивного каротажа и статического зондирования обеспечивает решение большого круга инженерно-геологических задач полевыми методами. При этом оказывается возможным получать диаграммы распределения по глубине разреза: объемной массы, влажности, пористости, лобового сопротивления грунта погружению наконечника зонда, трения грунта по боковой поверхности зонда и нормального давления на зонд. По комплексу каротажных диаграмм, включая метод ГК, возможно также выделение литологических типов пород. На рис. 80 для примера показаны пенетрационно-каротажные диаграммы и диаграмма распределения пористости грунтов, полученные методом пенетрационного каротажа на участке четвертичных отложений под Москвой. Разрешающую способность методов для литологического расчленения разреза можно видеть из сопоставления диаграмм с геологическим разрезом, приведенным на том же рисунке.

Важно отметить еще одно достоинство методов пенетрационного каротажа. Они позволяют строить диаграммы пространственного распределения свойств грунтов по разрезу с получением полной картины их изменчивости по глубине и по простиранию.

Начато промышленное производство установок для инженерно-геологических исследований пенетрационно-каротажными методами для наземных и подводных условий.

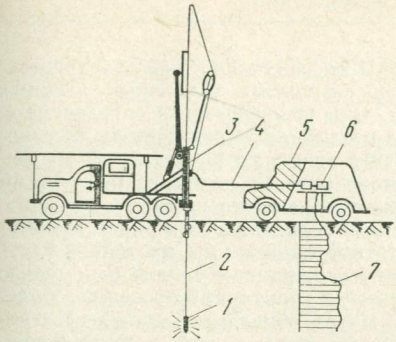


Рис. 78. Принципиальная схема пенетрационно-каротажной станции

1 — измерительный зонд; *2* — колонна штанг; *3* — гидравлическое устройство для погружения штанг; *4* — кабель; *5* — аппаратурная станция; *6* — наземный пульт с регистрирующей аппаратурой; *7* — каротажная диаграмма

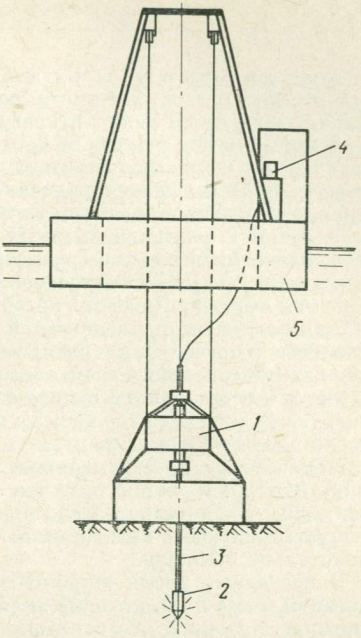


Рис. 79. Схема подводной станции пенетрационного каротажа

1 — установка для вдавливания каротажного зонда; *2* — зонд; *3* — колонна штанг; *4* — измерительная аппаратура и пульт управления; *5* — плавсредство

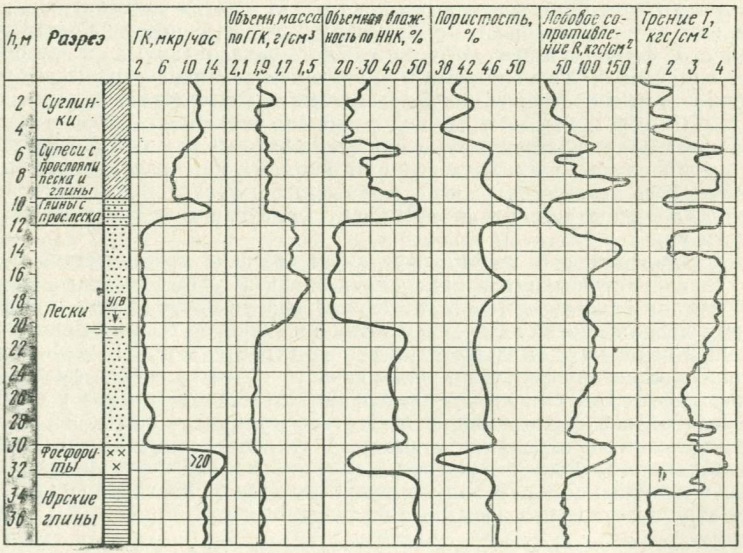


Рис. 80. Пенетрационно-каротажные диаграммы и генологический разрез ледниковых отложений Подмосковья

Активационный анализ. При облучении среды сложного химического состава ядерными частицами в результате различных ядерных реакций образуются радиоактивные изотопы. Они распадаются в определенном интервале времени, испуская бета- и гамма-излучение определенной энергии. Анализ радиоактивных излучений по их виду и энергиям позволяет идентифицировать образовавшиеся радиоактивные изотопы, а по величине наведенной активности судить о количественном содержании каждого элемента, вступившего в ядерную реакцию. Активационный анализ обладает целым рядом преимуществ, позволивших ему в сравнительно короткий срок занять достойное место среди других методов химического и спектрального анализов пород. С помощью активации образцов мощным потоком нейтронов в реакторах определяют большинство элементов периодической системы. Метод обладает высокой чувствительностью и позволяет анализировать многокомпонентные среды с определением содержания нескольких элементов одновременно.

Методами наведенной активности можно определять содержание некоторых элементов *in situ*. Для геологических исследований это обстоятельство является едва ли не самым ценным.

Наиболее распространенными сейчас являются методы нейтронной активации. Это объясняется тем, что нейтроны, будучи нейтральными ядерными частицами, сравнительно легко проникают в ядра элементов и активируют их. Поэтому вероятность активации нейтронами по сравнению с другими частицами относительно большая.

В настоящее время широко известна методика нейтронной активации на алюминий и кремний, которые являются весьма распространенными элементами осадочных пород. Для активационного анализа используется широкий круг искусственных источников нейтронов, а также управляемые источники — так называемые генераторы нейтронов.

В дальнейшем определение содержания в породах алюминия и кремния может явиться надежной основой для объективного литологического расчленения пород в разрезе.

Радиоизотопные индикаторы. Метод радиоактивных индикаторов, или, как его называют, метод меченых атомов, основан на практической идентичности физико-химического поведения радиоактивных и стабильных изотопов одного и того же элемента при изучении различных процессов и явлений. Сущность метода состоит в определении местонахождения введенного в поток подземных или поверхностных вод радиоактивного индикатора и его количества. В результате удается установить такие важные для инженерно-геологических и гидрологических исследований данные, как направление и пути фильтрационного потока, скорость его движения и расход. В свою очередь эти данные позволяют определить коэффициент фильтрации и значение активной пористости грунтов.

Метод радиоактивных индикаторов имеет большие преимущества по сравнению с электролитическими и калориметрическими методами благодаря своей высокой чувствительности и точности. Это позволяет успешно применять данный метод при решении многих задач, связанных с инженерно-геологическими исследованиями в основном для гидротехнического строительства. К таким задачам относятся: определение фильтрационных свойств грунтов, оценка фильтрационной однородности пластов, выявление опасных трещиноватых зон в основании сооружений, оценка фильтрации воды через земляные плотины, исследование водопроницаемости противофильтрационных устройств, оценка эффективности дренажных систем. Радиоиндикаторные методы исследования подробно рассмотрены в специальном руководстве, подготовленном Международным агентством по атомной энергии и изданном на русском языке.

III. ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОМЕТОДОВ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Общие положения. Понятием «аэрометоды» принято объединять совокупность методов изучения поверхности Земли и земной коры с различных воздушных носителей визуально или путем регистрации различными приемниками тех или иных параметров физических полей, формирующихся над поверхностью Земли, с последующим анализом полученных данных.

По характеру изучаемых полей и виду приемников аэрометоды обычно подразделяются на аэрофотографические (аэрофотосъемки), аэровизуальные, фотоэлектрические и аэрогеофизические.

Сущность аэрофотосъемки сводится к получению с помощью специальной аппаратуры на светочувствительной пленке фотографического изображения местности. Такое изображение содержит определенный объем инженерно-геологической информации. Получение этой информации с аэроснимка (фотосхемы, фотоплана) и является задачей инженерно-геологического дешифрирования.

В закрытых районах геологическое дешифрирование затруднено наличием почвенного слоя и растительного покрова, которые скрывают от непосредственного наблюдения горные породы. Здесь возможности аэрометодов могут быть значительно расширены за счет применения ландшафтно-индикационного метода исследований. В основу такого метода положено учение о природно-территориальных комплексах.

Известно, что ландшафтная оболочка Земли по своему строению неоднородна. В пределах континентов выделяется ряд примерно широтных зон, заметно различающихся по природным условиям; в горах наблюдается вертикальная зональность. Происходит также обособление географических провинций. Основным фактором, определяющим расчленение ландшафтной оболочки Земли на такие крупные территориальные единицы, является климат — распределение тепла и влаги. Но и в пределах зон и провинций, где климатические условия сравнительно постоянны, природная обстановка не остается однородной, а распадается на более мелкие территориальные единицы, получившие название ландшафтов. Согласно Н. А. Солнцеву (1949 г.), ландшафт, — это такой участок земной поверхности, в пределах которого наблюдается закономерное и типичное повторение одних и тех же взаимосвязанных сочетаний геологического строения, форм рельефа, поверхностных и подземных вод, микроклиматов, почв и почвенных разностей, фито- и биоценозов.

В историческом и генетическом аспектах ландшафт можно рассматривать как единое целое. В морфологическом отношении, как видно из определения, он не является вполне однородным, а обладает определенной внутренней структурой, которая определяется пространственным распределением и соотношением комплексов более низкого ранга, получивших названия местностей, урочищ, фаций. Фация является наиболее мелким и более неделимым природно-территориальным комплексом — «элементарным ландшафтом».

Так, к примеру моренную равнину можно рассматривать как ландшафт, участки равнины с плоским, холмистым или грядово-холмистым рельефом — как местности, отдельные холмы, гряды, понижения между ними — как урочища. Такая система является и достаточно простой и достаточно гибкой.

Среди комплексов низких рангов одни могут встречаться спорадически, другие — несколько чаще, третьи — доминировать и определять в значительной мере облик всего ландшафта. Последние имеют наибольшее значение и носят название доминант. Так, например, в пределах рассмотренного выше моренного ландшафта могут быть встречены урочища, связанные с озерными, аллювиальными или болотными отложениями, но они имеют подчиненное значение. Определяющая же роль принадлежит урочищам, связанным с отложениями донной морены, которые и являются здесь доминантами.

Природно-территориальные комплексы, как и любые другие природные объекты, можно изучать в их сложном и неповторимом индивидуальном

своеобразии (такой подход к изучению природных комплексов получил в литературе наименование регионального), а можно типизировать и классифицировать в соответствии с выбранной системой признаков (такой подход получил наименование типологического).

При решении инженерно-геологических задач оба подхода представляют значительный практический интерес. Региональный подход позволяет глубже раскрыть систему связей, присущих данному ландшафту, и на этой основе получить более полное и точное представление об инженерно-геологических условиях изучаемой территории. Типологический подход, хотя и сопровождается потерей некоторой части информации, но зато открывает путь для составления обобщенных моделей отдельных типов ландшафтов и выполнения экстраполяционных операций. Типизация комплексов низких рангов значительно облегчает анализ структуры ландшафтов. Оказывается, что каждому типу ландшафта свойственно не бесконечное разнообразие таких комплексов, а только очень ограниченный их «набор», характеризующийся притом весьма устойчивыми пространственными и количественными соотношениями. Это не только облегчает выделение отдельных ландшафтов на аэроснимке или на местности, но и упрощает их геологическую идентификацию.

Индикационное значение ландшафтов определяется связью отдельных типов ландшафтов с определенными геологическими условиями, понимаемыми в широком смысле слова (включая и водоносность пород, т. е. гидрогеологические условия).

Не следует, однако, трактовать эти связи слишком упрощенно. Анализ показывает, что обособление ландшафтов зависит не только от различий в геологическом строении отдельных участков территории, но и от особенностей строения рельефа (в горных условиях этот фактор становится определяющим). В результате этого ландшафт, выделенный на аэроснимке или на местности, может быть связан в одном случае с крупной формой рельефа (нагорьем, плато, низменностью) и иметь сложно построенную литогенную основу, а в другом — с областью распространения того или иного комплекса отложений и иметь однородную литогенную основу. Таким образом простое и однозначное соответствие между ландшафтами и литогенной основой наблюдается далеко не всегда. Это, естественно, усложняет задачу инженерно-геологического дешифрирования.

Если ландшафт, как природная система, отличался сложным и неоднородным сложением, то местности и в особенности урочища построены уже значительно проще. Так, в пределах равнинных территорий урочище обычно отвечает одной форме мезорельефа (или ее части) и одному (или немногим) геолого-генетическому комплексу пород. Поэтому и связи между компонентами природного комплекса — горными породами, поверхностными и подземными водами, почвами и растительностью — приобретают здесь значительно большую однозначность. По этой причине расшифровку связей с целью геологической индикации следует проводить, по-видимому, в пределах отдельных урочищ. Естественно, что наибольший интерес представляют в этом отношении урочища-доминанты.

Для целей дешифрирования могут использоваться и природные индикаторы. В этом случае методология дешифрирования основывается на следующих представлениях. Все природные компоненты, слагающие природный комплекс, можно подразделить на две группы.

К первой относятся такие компоненты, которые являются при инженерно-геологических изысканиях основным объектом исследований, но в закрытых районах скрыты от непосредственного наблюдения и недоступны для прямого дешифрирования. Поэтому их иногда называют дециппиентными, т. е. ускользающими от наблюдения, незаметными. К ним относятся горные породы и подземные воды.

Компоненты второй группы сами по себе большого интереса для инженера-геолога не представляют, но зато могут быть сравнительно легко и достоверно опознаны на аэроснимках. Поэтому их иногда называют физиономическими. К ним относятся рельеф, растительность, почва, поверхностные воды, объекты

деятельности человека. Отсюда вытекает и задача геологической индикации — получать информацию о «скрытых» компонентах природных комплексов путем анализа данных о тех компонентах, которые доступны для непосредственного наблюдения (дешифрирования). Решение этой задачи весьма сложно и опирается, с одной стороны, на теоретические разработки, позволяющие предвидеть характер связей между отдельными компонентами природного комплекса, а с другой — на результаты статистической обработки массовых наблюдений, на основании которых составляются так называемые дешифровочные таблицы.

Применяемые аэрофотоматериалы. При инженерно-геологическом дешифрировании могут использоваться аэроснимки, накидные монтажи, фотосхемы и фотопланы. На этапе предварительных исследований удобно пользоваться фотосхемами; при детальных работах, когда необходимо выполнить измерения, а для этого получить стереоскопический эффект, используются аэроснимки.

Масштабы аэроснимков. При инженерно-геологических исследованиях сравнительно редко выполняются специальные работы по аэрофотосъемке, в большинстве же случаев используются готовые аэрофотоматериалы, полученные для составления топокарт, кадастров лесов и земель. Для этих целей применяются снимки разных масштабов: крупных (1 : 3000—1 : 10 000); средних (1 : 10 000—1 : 30 000) и мелких (мельче 1 : 30 000). Возможности дешифрирования природной обстановки на таких аэроснимках весьма различны.

1. Аэроснимки масштабов 1 : 3000—1 : 10 000 позволяют уверенно дешифрировать лесную, а частично и кустарниковую растительность, микроформы рельефа и другие компоненты природной обстановки. Однако для дешифрирования нужно использовать очень большое число снимков, что требует немалых затрат труда и времени.

2. Аэроснимки масштабов 1 : 10 000—1 : 20 000, по-видимому, наиболее полно отвечают требованиям инженерно-геологического дешифрирования. На них хорошо воспринимается стереоскопический эффект. Теряются отдельные признаки некоторых пород деревьев, но в целом растительный покров дешифрируется еще достаточно уверенно. Уверенно распознаются формы микрорельефа; лучше, чем на снимках более крупных масштабов, выявляются общие закономерности строения ландшафтной оболочки. Число снимков не столь велико, как в предыдущем случае, и не вызывает больших задержек при дешифрировании.

3. Аэроснимки масштабов 1 : 30 000—1 : 60 000 позволяют устанавливать общие закономерности строения ландшафтной оболочки. Стереоэффект еще сохраняется, но уверенно дешифрируются только крупные формы рельефа, мелкие детали изображения теряются. Сложно или невозможно осуществить измерительные операции (например, определить крутизну склонов).

Для предварительного обзорного дешифрирования следует использовать аэроснимки масштабов 1 : 30 000—1 : 60 000, а для детального дешифрирования — 1 : 10 000—1 : 20 000. Эта рекомендация сохраняет значение для всех масштабов инженерно-геологических съемок, начиная с 1 : 1 000 000 и кончая 1 : 10 000. Только при съемках более крупного масштаба целесообразно использовать аэроснимки, отвечающие масштабу выполняемой съемки.

Как показывает опыт, при инженерно-геологических съемках обзорных масштабов 1 : 1 000 000—1 : 500 000, охватывающих большие площади, практически невозможно осуществить в предполевой период сплошное дешифрирование аэроснимков для всей изучаемой площади. Поэтому на первом этапе следует ограничиться контурным дешифрированием аэрофотосхем масштаба 1 : 20 000 и мельче, выделяя участки, различающиеся по структуре аэрофотоизображения, а на втором этапе выполнять выборочное дешифрирование нескольких стереопар для каждого из выделенных на схемах участков. Необходимость в сплошном дешифрировании может возникнуть только в отдельных районах (склоны долин рек, берега озер, морей), где можно ожидать широкого развития современных геологических процессов.

Используемые типы пленок. При инженерно-геологическом дешифрировании можно использовать аэроснимки, изготовленные с различных

типов пленок: черно-белых, цветных, спектрозональных. Современные отечественные черно-белые пленки относятся к типу панхроматических (с пониженной чувствительностью в зеленой части спектра) или изопанхроматических (с заполненной зеленой частью) и отличаются высокой разрешающей способностью. Местность на таких пленках изображается в тонах серого цвета (от белого до черного) с большой дифференциацией. Из цветных пленок отечественная промышленность выпускает негативные пленки ЦН-1 и ЦН-3 и обратимую пленку ЦО-1. Изображение получается в несколько искаженных естественных цветах. По ряду причин технического и экономического характера цветные пленки применяются редко. Спектрозональные пленки чувствительны не только к видимой но и к ближней инфракрасной части спектра. Промышленность выпускает двухслойные пленки СН-2М (слои чувствительны к красной и инфракрасной частям спектра), СН-5 (к зеленой и инфракрасной частям спектра) и трехслойную СН-23 (к красной, зеленой и инфракрасной частям спектра). Изображение получается в резко контрастных искусственных цветах (пурпурном, желтом, голубом), что облегчает расчленение местности на отдельные ландшафты (типы тундр, лесов и т. д.) и их опознавание. Спектрозональные пленки облегчают также дешифрирование различных видов растительности, степени увлажнения почв, а в некоторых случаях и состава пород. Печать осуществляется на двухслойную бумагу СБ-2 или обычную цветную трехслойную бумагу.

Время (сезон) проведения съемок. Как показали исследования, дешифрирование форм мезорельефа, отчетливо воспринимаемых под стереоскопом, может быть выполнено по черно-белым аэроснимкам всех сезонов года. Формы микрорельефа (мелкие лощины, промоины, западины и др.), маскирующиеся летом растительностью, а зимой — снегом, легче всего дешифрируются на ранневесенних и осенних аэроснимках. Элементы гидрографической сети, отдельные водные объекты, а также объекты хозяйственного освоения территории дешифрируются примерно одинаково на аэроснимках всех сезонов года, кроме зимнего. Растительность на разносезонных аэроснимках дешифрируется весьма различно, что объясняется изменением ее фенологического состояния. Хвойные леса легче всего дешифрируются на ранневесенних аэроснимках, лиственные — на летних. Почвогрунты увереннее всего дешифрируются на ранневесенних аэроснимках, когда пашни обнажены или покрыты молодыми всходами, благодаря чему хорошо видны микроформы рельефа, характерные для некоторых типов почвогрунтов.

При инженерно-геологическом дешифрировании могут быть использованы аэроснимки всех сезонов, но наибольшую информацию дают весенние аэроснимки.

Процесс инженерно-геологического дешифрирования. Инженерно-геологическое дешифрирование представляет собой сложный процесс, распадающийся на несколько этапов.

Дешифрирование начинается с планирования процесса. Одновременно осуществляется подбор текстовых и картографических материалов по району работ: различных климатических, ботанических, лесных, почвенных, геологических, гидрогеологических карт и описаний, на основании которых могут быть определены условия инженерно-геологического дешифрирования и сделаны первые предварительные выводы о характере ландшафтных взаимосвязей. Большую помощь может оказать использование опыта и материалов по инженерно-геологическому дешифрированию районов, близких по ландшафтно-геологическим условиям.

К числу таких материалов относятся аэроснимки-эталоны. Эталон представляет собой типичную для какого-либо ландшафта отдешифрированную стереопару, которая в той или иной форме совмещается с различными табличными, графическими и текстовыми материалами, позволяющими получить наиболее полное представление о структуре ландшафта, строении его литогенной основы и связи между отдельными компонентами ландшафта. Такие эталоны носят наименование *комплексных*. Используются также *частные* эталоны, характери-

зующие отдельные компоненты ландшафта: рельеф, растительность, водные объекты и т. д.

После сбора всех необходимых материалов составляют план дешифровочных операций, определяют состав исполнителей, устанавливают время, необходимое для выполнения работ, и приступают к дешифрированию.

На фотосхемах или снимках мелкого масштаба (1 : 20 000—1 : 40 000) выделяют участки с одинаковым аэрофотоизображением, предположительно отвечающие отдельным ландшафтам. Изучают структуру аэрофотоизображения выделенных участков. Устанавливают территориальные комплексы-индикаторы (типы лесов, тундр, болот и т. д.), характерные для ландшафтов, сформировавшихся на определенных комплексах пород. На основании имеющегося опыта и анализа информации, собранной по району работ, а также сопоставления со снимками-эталонами определяют геолого-генетические комплексы отложений, которым отвечают выделенные ландшафты.

Далее переходят к детальному дешифрированию отдельных выделенных ландшафтов с целью получения возможно более полной информации о строении рельефа, составе отложений, глубине залегания грунтовых вод, современных геологических процессах и пр. Для этой цели используют систему дешифровочных признаков, описанную в следующем параграфе.

Применяют аэроснимки более крупных масштабов (1 : 10 000—1 : 20 000), если они имеются по району работ; производят стереоизмерения.

Детальные исследования обычно выполняют на ограниченном числе наиболее типичных снимков, а сделанные выводы экстраполируют на участки с одинаковой структурой аэрофотоизображения. Контроль осуществляют путем выборочного дешифрирования отдельных снимков, отвечающих различным участкам территории съемки, желательно с привлечением других исполнителей.

Дешифрирование завершается составлением предварительных аналитических карт: геоморфологической, четвертичных отложений, глубин залегания грунтовых вод, а также карты инженерно-геологических условий или карты инженерно-геологического районирования. На картах указывают участки, геологическая интерпретация которых осталась неясной, участки возможных альтернативных решений и т. д. Такие карты служат надежной основой для постановки дальнейших работ, определения объемов и методики наземных исследований, выбора направления опорных маршрутов, мест размещения «ключевых» участков или отдельных выработок и т. д.

Система дешифровочных признаков. Процесс инженерно-геологического дешифрирования базируется на использовании системы признаков, которые получили в литературе название дешифровочных, дешифрирующих или диагностических. Наиболее часто в литературе используется первый термин.

Термином *дешифровочные признаки* принято объединять все особенности аэрофотоизображения местности, которые позволяют выявить на снимке тот или иной природный объект и определить присущие ему свойства.

Система дешифровочных признаков, применяемая при инженерно-геологическом дешифрировании, приведена в табл. 102.

Дешифрирование отдельных компонентов инженерно-геологических условий. Понятие «инженерно-геологические условия» объединяет все компоненты геологической обстановки, которые могут повлиять на строительство и эксплуатацию сооружений: рельеф, особенности геологического строения, гидрогеологические условия, современные физико-геологические явления. Основные рекомендации по дешифрированию рельефа и дочетвертичных отложений изложены в многочисленных специальных руководствах по дешифрированию, и мы их здесь не приводим.

Методика дешифрирования четвертичных отложений разработана значительно слабее. При изучении четвертичных отложений для целей инженерно-геологического картирования необходимо установить генезис, состав и возраст отложений, определить их строение и мощность, дать примерную оценку физико-механических свойств пород, установить их водоносность.

Таблица 102

Система дешифровочных признаков, используемых при инженерно-геологическом дешифрировании

Дешифровочные признаки					Основные природные условия, учитываемые при дешифрировании	
Прямые	Косвенные		Комплексные			
	наименование	содержание	наименование	содержание	наименование	содержание
Размер объектов Форма объектов Тон изображения Цвет изображения Собственные и отбрасываемые тени	Геоморфологические Геоботанические Гидрографические Почвенные Зоогенные Антропогенные (хозяйственного использования территории)	Тип рельефа, мезо- и микроформы рельефа, морфологические и морфометрические характеристики рельефа Характер, строение и состояние растительного покрова. Наличие растительных ассоциаций и растительных форм—индикаторов Форма, густота, разветвленность и другие характеристики гидрографической сети. Характерные особенности отдельных водных объектов Строение почвенного покрова. Наличие характерных типов почв и их разновидностей Наличие характерных форм, созданных жизнедеятельностью организмов Степень и характер хозяйственного освоения территории, наличие карьеров стройматериалов, мелиоративных и ирригационсооружений	Структура аэрофотоизображения ландшафта Наличие природных комплексов-индикаторов	Определяется: Пространственной сменой и соотношением природных комплексов низшего ранга (местностей, урочищ, фаций) Сроением гидрографической сети Особенностями хозяйственного освоения территорий (размещением с/х угодий, населенных пунктов, строением дорожной сети, наличием и строением мелиоративных сетей) Комплексы низшего ранга (местности, урочища, фации), характерные для определенных инженерно-геологических условий	Климатические: а) современные б) палеоклиматические Геологические: а) формационные б) структурно-тектонические в) неотектонические г) геокриологические д) историко-геологические	Климатическая зона, подзона, сектор, провинция Средние многолетние климатические характеристики Данные об изменениях климатических условий в районе работ в последний период жизни Земли, которые могли сказаться на формировании ландшафта Типы формаций четвертичных и более древних отложений, распространенные в районе исследований Основные геоструктурные особенности территории: платформа, плита, складчатое сооружение и др. Характер, знак, интенсивность современных тектонических движений. Сейсмическая активность Зона, выделяемая по схеме геокриологического районирования СССР (сплошного, островного распространения многолетнемерзлых толщ, сезонного промерзания) Основные этапы геологической истории, определившие геологическое строение и гидрогеологические условия района (особенно в четвертичное время)

Дешифрирование четвертичных отложений в отличие от более древних пород основано главным образом на использовании системы косвенных и комплексных признаков. Комплексы четвертичных отложений различного генезиса, возраста и литологического состава отличаются друг от друга по условиям залегания, строению рельефа и гидрографической сети, характеру растительного покрова, почвам, особенностям хозяйственного освоения территории. В результате этого каждому литолого-генетическому комплексу отложений (или их простейшим сочетаниям) отвечают определенные типы ландшафтов, представленные закономерно сменяющими друг друга зональными вариантами.

Каждый из таких зональных вариантов обладает характерной структурой и некоторыми другими признаками, позволяющими отличать его от ландшафтов, сформировавшихся на других литолого-генетических комплексах. Наиболее уверенно удается выделять такие комплексы в районах с мало измененными природными ландшафтами. В районах же, где природные ландшафты уступили место культурным (леса вырублены, луга и степи распаханы), эта задача решается уже значительно сложнее и менее достоверно.

При определении *возраста четвертичных отложений* по данным аэрометодов приходится ориентироваться в основном на такой признак, как степень переработки первичного рельефа процессами эрозии. Иногда, например при определении возраста ледниковых отложений, этот признак оказывается достаточно надежным. В большинстве же случаев установление возраста четвертичных отложений требует выполнения наземных исследований.

Литологический состав четвертичных отложений устанавливается по строению рельефа, характеру растительного покрова, особенностям хозяйственного освоения территории.

Определить *мощность четвертичных отложений* можно только в тех случаях, когда в оврагах, балках и долинах есть выходы подстилающих пород, различимые на аэроснимках. В единичных случаях наблюдается также своеобразное «просвечивание» подстилающих пород сквозь толщу рыхлых четвертичных отложений. Иногда о мощности четвертичных образований можно судить по строению гидрографической сети и характеру растительного покрова. Однако в большинстве случаев сделанные на основании всех этих признаков прогнозы требуют дополнительной проверки наземными исследованиями.

Некоторые сведения *о механических свойствах горных пород*, в частности о прочностных характеристиках, можно получить в результате обработки массовых измерений крутизны естественных склонов.

Дешифрирование гидрогеологических условий. В настоящее время имеется сравнительно небольшой опыт применения аэрометодов при гидрогеологическом картировании, причем главным образом в аридной зоне.

При дешифрировании гидрогеологических условий используется вся система дешифровочных признаков, которая рассматривалась выше. Особенно большое значение имеют такие признаки, как рельеф и растительность.

Как показывают результаты исследований, применение аэрометодов для гидрогеологического дешифрирования дает наиболее благоприятные результаты в аридной зоне, где удается установить распространение, примерную глубину залегания, а также характер и степень засоления грунтовых вод. Глубина индикации имеет здесь максимальную величину от 10—15 до 25—30 м. В ряде случаев удается определить также направление движения грунтовых вод. Возможности дешифрирования грунтовых вод в лесной зоне уже значительно более ограничены. В благоприятных случаях удается определить глубину залегания грунтовых вод, места выходов подземных вод на поверхность, участки развития верховодки.

Дешифрирование современных геологических процессов. При изучении геологических процессов необходимо установить тип геологического процесса, границы проявления, современную динамику и факторы, определяющие его развитие.

Установление мест проявления и границ распространения геологических процессов по материалам аэрофотосъемки, как правило, не представляет трудностей, так как большинство из них (эрозия, абразия, карст, оползни, *просадочные явления, различные мерзлотные процессы) сопровождаются* образованием специфических мезо- и микроформ рельефа, изучение которых позволяет получить обширную информацию и о самих процессах. Аэрофотосъемка дает возможность изучить эти формы с такой точностью и детальностью, которые могут обеспечить лишь сложные и трудоемкие наземные исследования.

Преимущество аэрофотосъемки заключается также в возможности изучения геологических процессов в их динамике, поскольку повторные съемки, выполненные с разрывом во времени, позволяют выявить с высокой степенью точности и достоверности все изменения, которые произошли за период между двумя съемками.

Выявить динамику развития геологических процессов можно и при наличии аэроснимков одного залета, но в этом случае снимки приходится сопоставлять с натурой, что требует больших затрат времени и снижает точность результатов.

При изучении динамики геологических процессов определенную информацию могут дать наблюдения за изменением состава и состояния растительного покрова.

Эрозия. Эрозионные процессы изучаются главным образом по созданным этими процессами формам рельефа. На аэроснимках хорошо видны начальные формы эрозии — «потяжины», выделяющиеся по тону или окраске почв и растительного покрова. На местности при наземном изучении они в большинстве случаев неразличимы. Дальнейшее развитие эрозии приводит к образованию форм струйчатого размыва — промоин и, наконец, крупных форм — оврагов, которые также хорошо дешифрируются на аэроснимках.

Пользуясь простейшим измерительным оборудованием, можно получить с аэроснимков все основные морфологические и морфометрические показатели, характеризующие как эрозионную сеть в целом (густота, глубина расчленения), так и отдельные эрозионные формы (длину, глубину эрозионных врезов, крутизну склонов). По наличию обрывов и обрушений и отсутствию растительности на склонах можно определить места интенсивного роста эрозионных форм. Наконец, по результатам повторных съемок можно судить о динамике эрозионного процесса — скорости роста оврагов, появлении новых эрозионных форм, изменении конфигурации склонов. В последние годы аэрофотосъемка успешно используется также для изучения русловых процессов и эрозионно-аккумулятивной деятельности рек.

Переработка берегов водохранилищ. Аэрофотосъемка позволяет получить значительную часть информации о морфологии береговых откосов и прибрежной части водохранилища, необходимую для расчета интенсивности переработки берегов. С помощью аэрометодов могут быть получены также данные о растительном покрове, почвах и геологических процессах, которые развиты на берегах водохранилища, а в известной степени и о геологическом строении береговых откосов.

С помощью дешифрирования можно установить все новообразования, возникшие в процессе переработки берегов — волноприбойные ниши, оползни, обвалы, которые уверенно дешифрируются по четким формам и более светлому тону изображения. На аэроснимках хорошо определяются также размеры и форма абразионных площадок и отмелей, выявляется направление перемещения твердого стока.

Скорость переработки берегов и ее затухание во времени можно установить, выполняя повторные аэросъемки с момента заполнения водохранилища до завершения процесса переработки его берегов.

Аэрофотосъемка успешно применялась при изучении переработки Цимлянского, Куйбышевского, Волгоградского и большинства других крупных водохранилищ.

Оползневые явления. Поскольку оползни отражены в четких морфологических формах, выделение участков склонов, затронутых оползнями, как правило, затруднений не вызывает. Современные оползни резко отличаются по тону и общему рисунку аэрофотоизображения от остального склона и хорошо выделяются даже на аэроснимках мелкого масштаба (1 : 20 000—1 : 30 000). На снимках более крупного масштаба (1 : 10 000 и крупнее) хорошо видны стенки отрыва, отдельные крупные блоки, валы выпирания, бугристость и перемятость оползневого тела, крупные трещины, деформации дорог и других инженерных сооружений, наличие застойных скоплений воды, заболоченности источников и т. д. Нередко характерным признаком оползневых смещений могут служить отличия в составе и состоянии растительного покрова. По данным В. И. Турманиной, зарастание оползня начинается через три года после его смещения (не считая тех участков, где растительный покров сохранился), через 10 лет наблюдается полное зарастание оползня травяной растительностью, через 20 лет — подрастающим древостоем обычно лиственных пород (ольха, береза, осина) и только через 60 лет хвойными породами.

Некоторые трудности возникают при дешифрировании оползней на крутых склонах, так как в плане такие оползневые тела почти не выражены. Здесь большую помощь может оказать применение перспективных аэроснимков.

Значительно труднее, чем современные оползни, дешифрируются древние оползневые смещения, поскольку с течением времени характерные оползневые формы сглаживаются, тело оползня покрывается растительностью и становится малоотличимым от остального склона. Однако и в этих условиях детальный морфологический анализ в большинстве случаев позволяет выделить участки склона, затронутые древними оползнями. По аэроснимкам могут быть также установлены основные типы оползней согласно классификациям, принятым в инженерной геологии.

Промерзание пород и связанные с ним явления. Важнейшей задачей является выделение участков распространения мерзлых и талых пород, глубины залегания кровли мерзлой толщи, а также установление районов распространения различных геологических процессов, генетически связанных с явлениями промерзания — оттаивания пород: термокарста, солифлюкции, бугров пучения и др.

Для решения первых двух вопросов важнейшим признаком являются различные типы ландшафтов, на Крайнем Севере — это различные типы тундры, южнее — различные типы лесотундры и тайги. Большое значение имеют также такие признаки, как различные формы микрорельефа (многолетние и сезонные бугры изучения, полигонально-трещинные формы, пятна-медальоны, каменные полосы и др.), состав и состояние растительного покрова и пр. Мерзлотные процессы дешифрируются в основном по характерным формам рельефа.

Образование полигональных форм дешифрируется по характерным формам и тоновым различиям. Полигоны с пониженной центральной частью, заполненной водой или заболоченной, изображаются на аэроснимках в виде угловатых темных пятен, расположенных рядами и разделенных узкими светлыми полосами. Выпуклые полигоны изображаются, наоборот, в виде светлых многоугольников, разделенных темными полосами.

Термокарст уверенно дешифрируется по характерным формам — округлым или угловатым западинам, в большинстве случаев занятым озерами. Берега озер обычно бывают крутыми, обрывистыми; при активном развитии термокарста на аэроснимках крупного масштаба хорошо видно обрушение берегов. В зоне лесотундры и тайги на снимках можно видеть упавшие в воду деревья.

Бугры пучения дешифрируются по округлой или овальной форме и характерным размерам. Тон изображения бугров может быть как более темным, так и более светлым, чем окружающая местность. На крупномасштабных аэроснимках (1 : 5000) на вершинах бугров хорошо видны трещины и западины, указывающие на начало термокарстового процесса.

Явления солифлюкции дешифрируются уверенно даже на аэроснимках среднего масштаба (1 : 20 000). Солифлюкционные террасы и натеки отчетливо выделяются на аэроснимках в виде более светлых или более темных полос или своеобразных вееров, оконтуривающих подножия склонов.

Наледи многолетнего типа (тарыны) легко дешифрируются в течение всего летнего сезона; одногодичные — на весенних аэроснимках имеют вид светло-серых бесструктурных пятен в долинах ручьев и рек у подножия склонов. При стаивании наледи долгое время сохраняется наледная площадка, выделяющаяся по светлому тону.

При дешифрировании мерзлотных явлений следует иметь в виду, что некоторые формы микрорельефа (например, полигональные почвы или термокарстовые озера) сохраняются долгое время после того, как характер мерзлотных явлений изменился или мерзлые породы полностью оттаяли. Поэтому дешифрирование мерзлотных процессов по созданным ими морфологическим формам требует обязательного наземного контроля.

Дешифрирование мерзлотных условий заметно облегчается при использовании спектрозональных пленок.

Карст. На аэроснимках уверенно дешифрируются все наземные формы карста: воронки, бессточные долины и пр. В ряде случаев удается установить погребенные карстовые формы, которые не различимы при наземных исследованиях.

Просадочные и просадочно-суффозионные явления. Просадочные явления в лёссах и лёссовидных суглинках, а также в пылеватых суглинках, лежащих на песках, хорошо дешифрируются по характерным микроформам рельефа — просадочным западинам различной формы и размера.

Заболачивание. Дешифрирование различных типов болот осуществляется достаточно уверенно на черно-белых и в особенности на цветных спектрозональных аэроснимках (по положению в рельефе, форме, внутреннему рисунку, растительному покрову). Растительный покров является также надежным индикатором глубины залегания грунтовых вод в торфяной залежи и показателем строения ее верхних горизонтов.

Аэроснимки позволяют также уверенно дешифрировать различные гравитационные (обвалы, осыпи) и эоловые (дюны, барханы, чаши развевания) процессы.

Применение аэровизуальных наблюдений. Применение аэровизуальных наблюдений позволяет проверить и уточнить информацию, получаемую в результате дешифрирования аэрофотоснимков, и, кроме того, получить дополнительные данные о некоторых компонентах ландшафтно-геологической обстановки.

1. О растительном покрове. Удается установить состав древостоя не только в первом ярусе, но во многих случаях также в других ярусах — подросте и подлеске, определить также состав кустарниковых и кустарничковых сообществ, а иногда и крупные травяные формы. Все это в целом позволяет более уверенно, чем при дешифрировании, установить типы лесов, тундр или степных ассоциаций, что, как указывалось ранее, имеет большое индикационное значение.

2. О составе отложений, выходящих на поверхность на пашнях, полотне грунтовых дорог, в канавах, выемках, естественных обнажениях и т. д. Основным дешифровочным признаком является цвет обнаженных поверхностей. Для песков характерны светлые оттенки серого и желтого цвета, для морены — красно-бурый цвет, для выходов известняков, мела, гипса — белый цвет и т. д. С воздуха лучше различаются светлоокрашенные породы, хуже — темноцветные. В ряде случаев удается установить некоторые важные структурные (например, наличие валунов в толще моренных суглинков) или текстурные (например, наличие грубой слоистости) особенности отложений.

3. Об особенностях хозяйственного использования территории и отдельных объектов; количестве и оборудовании водопунктов, состоянии грунтов дорог — разъезженности по ширине и глубине, наличии выбоин после дождей и т. д. (признаки состава отложений).

4. О некоторых геологических явлениях, например небольших оползневых смещениях по склонам речных долин, балок, оврагов, трудно различимых на плановых снимках.

Аэрогеофизические методы разведки. В основе аэрогеофизических методов разведки лежит измерение параметров различных физических полей, возникающих над поверхностью земли в силу естественных причин или создаваемых искусственно.

В современной практике геологических исследований используются в основном аэроэлектроразведка, аэромагниторазведка и аэрорадиометрия. Все методы рассчитаны в основном на поиски месторождений полезных ископаемых. По своим физическим основам, техническому решению (сложное, громоздкое оборудование) или по экономическим показателям они малопригодны для решения задач инженерно-геологического картирования и широкого применения в этой области пока не нашли.

Другие виды аэрометодов. В настоящее время ведутся поиски и разработка новых методов аэрофотосъемки, которые могли бы расширить возможности получения геологической информации с помощью аэрометодов. Известные перспективы создает радиолокационная съемка, позволяющая получать сведения о составе и свойствах горных пород, скрытых под покровом растительности, почвой и маломощным слоем четвертичных отложений. Современная аппаратура позволяет получать изображение ландшафта с помощью радиолокационной съемки, мало уступающее по качеству фотографическому. Для определения тепловых, а по ним и некоторых других физических свойств пород могут найти применение и тепловая съемка, использующая дальнюю инфракрасную область спектра. Реализация больших возможностей, заложенных в этом методе, пока затруднена невысокой разрешающей способностью применяемой аппаратуры.

IV. ГЕОБОТАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Основные понятия. В инженерно-геологических исследованиях *геоботаническими* * называют методы, основанные на использовании растительного покрова в качестве индикатора (показателя) тех или иных физико-географических условий, имеющих значение при инженерно-геологической характеристике территории: механического состава поверхностных отложений, глубины залегания уровня грунтовых вод или верховодки, степени минерализации их, развития некоторых физико-геологических явлений и процессов.

Геоботанические методы являются частью ландшафтно-индикационных исследований.

Использование растительности в качестве индикатора тех иии иных условий внешней среды основывается на том, что растительный покров в целом весьма тесно связан с климатическими, почвенными и геолого-гидрогеологическими условиями. Связь эта осуществляется на основе различных биологических особенностей тех или иных растений, требующих для своего роста и развития определенных, присущих только им, сочетаний условий водно-минерального питания и аэрации почвенной среды. Поэтому распределение на какой-либо территории растительных сообществ предопределено не только историческими причинами, но и отражает существующие почвенно-грунтовые условия, в том числе механический состав, характер увлажнения и геохимические особенности поверхностных отложений.

Благодаря этому произрастание определенных растительных сообществ на изучаемой территории может служить эффективным индикатором инженерно-геологических условий. Кроме того, растительный покров чутко реагирует на изменение окружающей обстановки, он легкодоступен для наблюдений, что

* Геоботаника— учение о растительном покрове Земли, о его строении, истории, законах развития и о его связях с физико-географическими условиями.

при наличии соответствующих знаний и некоторых справочных пособий позволяет ориентировочно определить компоненты ландшафта, интересующие инженера-геолога, без использования дорогостоящих инструментальных способов. Он является также одним из важнейших элементов аэрофотоизображения местности и открывает широкие возможности для геоботанического индикационного дешифрирования в инженерно-геологических целях.

Растительные сообщества, а в некоторых случаях и отдельные виды растений, настолько постоянно и отчетливо связанные с определенными условиями, что их присутствие может служить указанием на наличие этих условий, называют *индикаторами*. Процесс определения тех или иных физико-географических (почвенных, геологических, гидрогеологических) условий по геоботаническим признакам носит название *геоботанической индикации*, а определяемые компоненты ландшафта: почва, горная порода, грунтовые воды и пр. — *объектов индикации* (*или индикаторами*).

По характеру связи с объектом индикации индикаторы могут быть *прямыми* и *косвенными*. Первые непосредственно, функционально связаны с объектом индикации и в своем распространении зависят от этого объекта; вторые не имеют непосредственной связи с объектом индикации и не зависят от него, но имеют с ним косвенную (опосредованную) связь через какой-то иной компонент ландшафта. Например, индицирование и картирование отложений того или иного возраста по характеру и составу растительности всегда основаны на косвенных связях, поскольку растительность реагирует не на возраст отложений, а на их литологические или геохимические особенности.

В зависимости от географических границ применимости различаются *локальные* и *универсальные* индикаторы. Первые применимы лишь в какой-то определенной местности, вторые — на всей территории распространения индикатора. В большинстве случаев локальные индикаторы являются косвенными.

Достоверность индикаторов определяется характером связи, существующей между индикатором и объектом индикации. Для оценки достоверности созданы различные условные шкалы [5]. Однако в настоящее время более широко используются методы математической статистики (коэффициенты корреляции, x-квадрат, уравнение регрессии и др.) для выражения связи и оценки достоверности индикаторов.

Практическое значение индикатора определяется не только его высокой достоверностью, но и *физиономичностью*, позволяющей легко выявлять его на местности и на аэрофотоматериалах.

Закономерные изменения тех или иных физико-географических условий произрастания растительности, как правило, сопровождаются изменениями последней. Поэтому закономерные смены растительности в пространстве — *экологические ряды* — могут служить часто надежными индикаторами смены почвенно-грунтовых или гидрогеологических условий.

Составление различных экологических рядов может дать материал для прогнозирования изменений тех или иных индицируемых инженерно-геологических условий во времени, т. е. дать возможность индицировать не только статические явления, но и динамические процессы.

Применять индикационные геоботанические наблюдения наиболее целесообразно на ранних стадиях инженерно-геологических изысканий, когда проводятся рекогносцировочные, мелко- и среднемасштабные съемочные работы, особенно с использованием аэрометодов, преимущественно в малоосвоенных районах, где развиты естественные, а не культурные ландшафты. Однако в определенных случаях, например при изысканиях в связи с ирригацией или с дорожным строительством, эти методы могут привести пользу и при крупномасштабных работах.

Направления индикационной геоботаники, используемые при инженерно-геологических исследованиях. Индикация механического состава почв и подстилающих их пород (литоиндикация). Механический состав почвенно-грунтовой толщи существенно влияет

на характер и состав растительного покрова, поскольку он в значительной мере обусловливает влажность, аэрацию, геотермические и другие особенности той среды, в которой развивается корневая система. Известны группы растений, тяготеющие к породам определенного состава и характерной консистенции. Некоторые из этих групп носят особые названия: псаммофиты — обитатели песков, литофиты — обитатели скальных обнажений, хасморфиты — обитатели щебня и др. Известны также растения, тяготеющие к глинам, супесям, суглинкам, торфам и т. д. Литоиндикация особенно перспективна в лесной зоне, где ее вполне надежно можно производить до глубины 5—7 м, с большей степенью вероятности — до 10—12 м. В степях и пустынях пределы литоиндикации меньше — соответственно 3—5 и 5—8 м, в зоне тундр достоверная литоиндикация возможна в пределах 1—3 м.

Индикация засоления почвенно-грунтовой толщи (галоиндикация). В пустынях и полупустынях, а также на морских побережьях всех зон растительность может служить индикатором степени и типа засоления почвогрунтов. Известны растения кальцифиты (показатели карбонатов), гипсофиты (показатели сульфатов и главным образом гипса), галофиты (показатели хлоридов и т. д.). Галоиндикацию можно проводить в пределах верхнего 2—3-метрового слоя почвогрунтов. Следует отметить, что растительность показывает некоторую суммарную засоленность грунта и ее характер, но определить по характеру растительности положение наиболее засоленного горизонта можно лишь приблизительно, так как максимум засоления в разные сезоны значительно смещается.

Индикация выветривания пород. Развитие растительности на обнажениях пород может служить индикатором степени их разрушенности процессами выветривания. Первые стадии выветривания обозначаются поселением в приповерхностных слоях породы так называемых эндолитических лишайников и водорослей, которые целиком погружены в последнюю и часто вызывают сильное изменение ее окраски (так, некоторые эндолитические лишайники в Крыму и Средиземноморье окрашивают известняки в ярко-розовый цвет). На этой стадии выветривание захватывает породу не глубже 10 см. Более поздние этапы выветривания обычно индицируются по налетам лишайников и мхов на поверхности породы, присутствие которых показывает, что выветривание проникло на глубину 10—25 см. Поселение единичных травянистых растений соответствует той фазе, в которой порода затронута выветриванием на глубину от 0,25 до 0,1 м; сплошное развитие травянистого покрова отмечается при проникновении процессов выветривания на глубину 1,0—1,5; развитие кустарников связано с распространением выветривания на глубину от 1 до 2 м и более.

Индикация ранних стадий карстово-суффозионных процессов. Использовать для этих целей растительность можно в силу того, что в результате начавшихся карстово-суффозионных процессов изменяется также и водный режим на тех площадях, где они происходят. Это обычно проявляется в возникновении мелких участков влаголюбивых сообществ на фоне более сухолюбивой растительности.

Индикация оползневых процессов. Растительность может служить косвенным показателем возможности возникновения оползней на склонах, поскольку она четко отмечает зоны высачивания грунтовых вод и указывает на литологический состав отложений, слагающих склон. Склоны, деформированные оползнями, легко распознать по наличию «пьяного», т. е. наклонного, а также «саблевидного» леса. Участки суглинков и глин, недавно сместившиеся в результате оползня, в лесной зоне нетрудно узнать по зарослям мать-и-мачехи. В горах Средней Азии (Тянь-Шань, Алтай и др.) по присутствию рощ лоха, ивы, тополя, зарослям тростника и солодки легко распознать участки, на которых в ближайшее время возможны оползни. На обстановку, благоприятствующую оползням, указывает в тех же районах густая древесная и травянистая растительность на теневых склонах, поскольку под нею формируется

мощная рыхлая, богатая влагой и органическим веществом кора выветривания, легко подвергающаяся оползанию.

Индикация геокриологических явлений. Многолетняя мерзлота оказывает сильнейшее влияние на растительность, а последняя влияет на режим влажности и ход температуры в поверхностных горизонтах многолетнемерзлой толщи. В силу этих связей растительность может выступать индикатором некоторых природных условий в криолитозоне. Например: 1) определенные растительные сообщества служат показателями механического состава самой верхней части многолетнемерзлой толщи (моховые тундры тяготеют к глинистым грунтам, лишайниковые — к песчаным и щебнистым, в лесотундре севера Западной Сибири березняки, сосняки, кедровики с лишайниковыми коврами также обозначают песчаные и супесчаные грунты); 2) растительность довольно четко индицирует «талики» (наиболее типичны для последних ивняки, ольшаники и березняки); 3) для некоторых растительных сообществ довольно отчетливо установлены ход сезонного протаивания, мощность сезонного талого слоя и связь растительности с влажностью грунтов.

Индикация заболачивания. Заболачивание местности вызывает появление на ней специфической растительности. До тех пор, пока болото сохраняет связь с грунтовыми водами (низинное болото), на нем преобладают болотные травы (главным образом осоки), тростник, камыш, рогоз, кустарники (ольха береза), зеленые мхи. По мере того, как болото теряет связь с грунтовым питанием (верховое болото), на нем развивается растительность, представленная белыми сфагновыми мхами, болотными формами сосны, багульником, пушицей и др. Накопление торфа, начинающееся еще на стадии низинного болота, при этом становится более интенсивным. Болотная растительность надежно индицирует стадии развития болота и характер его водного питания, на верховых болотах она позволяет четко распознать пути движения воды в болоте, а также определить состав и отчасти мощность торфяной толщи.

Применение геоботанических методов при инженерно-геологических исследованиях. Геоботанические методы при инженерно-геологических исследованиях может применять сам инженер-геолог, проводящий изыскания. Они применимы как непосредственно при проведении работ в поле, так и в камеральных условиях (по материалам специальных индикационных исследований).

Эти работы могут быть организованы: 1) как камеральная индикационная интерпретация имеющихся карт растительности; 2) как рекогносцировочные наблюдения, проводящиеся или наземным, или аэровизуальным методом с небольшим объемом наземных наблюдений; 3) как геоботанические индикационные наблюдения на «ключевых» участках с последующей экстраполяцией результатов на всю исследуемую территорию.

Рекогносцировочные геоботанические индикационные исследования проводят в тех случаях, когда необходимо дать общее представление об инженерно-геологических условиях большой территории или выделить ускоренными методами участки, пригодные для детальных работ. Рекогносцировочные исследования наиболее целесообразно осуществлять аэровизуальным методом. Предварительное дешифрирование позволяет еще в камеральных условиях выделить районы, различные по распределению растительных индикаторов, а следовательно, и по комплексу физико-географических (инженерно-геологических) условий. Кроме того, в результате предварительного дешифрирования следует составить план маршрутов с тем, чтобы посетить участки, сложные по своему рисунку или трудноинтерпретируемые по аэрофотоснимкам. Наиболее исчерпывающую предварительную информацию можно получить в результате использования спектрозональных аэрофотоснимков, что особенно эффективно в лесной зоне.

Если работы ведутся с применением ландшафтно-индикационного метода, то обязательным условием является геоботаническая индикационная съемка «ключевых» участков. При этом исследуемый участок покрывают сетью маршрутов, густота и насыщенность которых определяются величиной участка и

сложностью рельефа, его геологическим строением и характером растительного покрова, т. е. сложностью индикационных закономерностей. Проводится сплошное индикационное дешифрирование аэрофотоснимков, во всех главнейших растительных сообществах закладываются шурфы и из них отбираются образцы пород для анализов.

В зависимости от наличия или отсутствия индикационной таблицы, в которой отражены связи растительности с геолого-географическими условиями, при проведении индикационной съемки в полевых условиях вначале составляют либо рабочую геоботаническую карту, либо индикационную. Рабочая геоботаническая карта представляет собой карту растительности, составленную в более крупном масштабе, чем требуемая окончательная карта. Одновременно с картированием производят отбор необходимого материала для обоснования индикационного значения растительности. В камеральных условиях составляют индикационно-дешифровочную таблицу, с помощью которой проводится индикационная интерпретация рабочей геоботанической карты.

Прямое индикационное картирование выполняют в тех случаях, когда уже имеется индикационная таблица; при этом сразу в поле составляют индикационную карту. Цветом и штриховкой на ней выделяются контуры участков с определенными инженерно-геологическими условиями, пространственное распространение которых прослежено по растительным сообществам. Каждое из последних отмечается своим индексом. Цветовыми раскрасками показывается литологический состав поверхностных отложений, штриховкой — глубина залегания подземных вод. Участки с проявлением различных физико-геологических процессов выделяются внемасштабными условными обозначениями. С помощью дешифрирования аэрофотоснимков и индикационно-дешифровочной таблицы данные, полученные на ключевых участках, могут быть экстраполированы на всю площадь исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азими Ш. А., Огильви А. А. Использование одноканальной сейсморазведочной установки для инженерно-геологических исследований. — «Разведка и охрана недр», 1962, № 4, с. 34—40.
2. Беликов М. П., Емельянов В. А., Нестеров В. Е. Применение радиоактивных изотопов в гидротехническом строительстве. М., Госстройиздат, 1961, 163 с.
3. Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. И. Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., «Недра», 1967, 372 с.
4. Викторов С. В., Востокова Е. А. Основы индикационной геоботаники. М., Госгеолтехиздат, 1961, 87 с.
5. Викторов С. В, Востокова Е. А., Вышивкин Д. Д. Введение в индикационную геоботанику. Изд. МГУ, 1962, 227 с.
6. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1962, 490 с.
7. Комаров С. С. Геофизические методы исследования скважин. М., Гостоптехиздат, 1963, 404 с.
8. Огильви А. А. Геофизические методы изучения карста. Изд-во МГУ, 1957, 161 с.
9. Справочник-определитель литологического состава поверхностных отложений и глубины залегания подземных вод. М., Сельхозгиз, 1963, 264 с.
10. Справочник геофизика. Т. III. М., Гостоптехиздат, 1963, 582 с.
11. Ферронский В. И. Пенетрационно-каротажные методы инженерно-геологических исследований. М., «Недра», 1969, 240 с.
12. Черняк Г. Я. Диэлектрические методы исследований влажных грунтов. М., «Недра», 1964, 128 с.
13. International Atomic Energy Agency Neutron Moisture Gauges, Techn. Repts Ser. No 112, IAEA, Vienna, 1970.
14. International Atomic Energy Agency. Nuclear Well logging in Hydrology Tehn. Repts Ser. No 126, IAEA, Vienna, 1971
15. Cytovič N. A., Ferronskiy V. I. Pouziti radioactivniho zareni privyzkumu zemin pro stravebni ucoly. «Inzen. stovby», Roc. v. c. 5, Praha, 1957.
16. Krüdener A., Becker A. Atlas stomd ortkenn Zeichnenden Pflanzen. Berlin, 1942.
17. Zytowitsch N., Ferronskity V. I. Die verwendung radioactiver starhlen zur Untersuchung von Baugrundeigenschaften Wissenschaftliche reitshrift. — In: Hochschule für Bauwesen Sonderdruck. Leipzig, 1961.

Глава седьмая

ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

I. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Инженерно-геологические исследования при выборе строительной площадки, выполняемые с целью сравнительной оценки возможных вариантов ее размещения (первая стадия изысканий), включают в себя проведение следующих работ:

1. Сбор, систематизация и анализ имеющихся геологических, гидрогеологических и других материалов, включая данные об опыте местного строительства по исследуемому району.

2. Инженерно-геологическая рекогносцировка. При рекогносцировке производится маршрутное обследование района и осуществляется проходка 1—2 разведочных выработок на каждом геоморфологическом элементе обследуемой территории, сопровождаемая отбором образцов пород для последующих лабораторных исследований по определению в основном классификационных показателей свойств грунтов. Глубина выработок определяется в зависимости от типа сооружений и сложности инженерно-геологических условий, но, как правило, она не превышает 20—30 м.

3. Выяснение общих сведений о гидрогеологии района и о наиболее высоком положении уровня грунтовых вод.

4. Камеральная обработка материалов и составление отчета.

На выбранной площадке (вторая стадия) изыскания производятся с целью получения инженерно-геологических данных для составления генерального плана промышленного предприятия (комплекса зданий гражданского строительства) с учетом прогноза возможного изменения природных условий территории в связи со строительством и эксплуатацией сооружений (зданий).

В состав работ входят: 1) инженерно-геологическая съемка; 2) буровые, горнопроходческие и геофизические работы; 3) полевые опытные инженерно-геологические работы; 4) гидрогеологические исследования; 5) лабораторные исследования; 6) камеральные работы и составление отчета.

Для осуществления инженерно-геологического районирования выбранной площадки с целью принятия оптимальных проектных решений производится инженерно-геологическая съемка территории в масштабах 1 : 2000—1 : 10 000 в зависимости от сложности инженерно-геологических условий и класса проектируемых сооружений и зданий.

Буровые, горнопроходческие и геофизические работы выполняются в целях: 1) установления состава и мощности пород, особенностей их залегания; 2) определения глубины залегания грунтовых вод; 3) отбора образцов породы и воды для лабораторных исследований; 4) проведения полевых опытных инженерно-геологических работ и гидрогеологических исследований.

Количество, глубина и размещение выработок определяются их назначением, степенью изученности и сложности исследуемой площадки, а также классом проектируемых сооружений. Учитывается намечаемое расположение сооружений. В зависимости от сложности инженерно-геологических условий и характера сооружений расстояние между соседними выработками изменяется примерно от 50 до 200—300 м. При простых инженерно-геологических условиях и сооружениях III—IV классов достаточно вскрыть толщу поверхностных отложений основной частью разведочных выработок на глубину примерно 10 м от поверхности и лишь небольшую часть выработок (5—10% от общего количества) довести до глубины 15—20 м. При сложных инженерно-геологических условиях и капитальных сооружениях количество глубоких (20—30 м) скважин увеличивают до 20—30%. При близком залегании скальных пород глубину большинства скважин можно ограничить заглублением их в монолитные скальные породы на 0,5—1,0 м. На участках, выделенных для строительства особо тяжелых и ответственных сооружений, таких, как доменные цехи, заводские трубы и некоторые другие, при сложных инженерно-геологических условиях глубина выработок может увеличиваться до 30 м, а в отдельных случаях до 50 м и более.

Выбор способа проходки выработок и их диаметров производится с учетом требований СНиП II-А.13-69.

В процессе проходки выработок производят отбор образцов пород и проб воды для лабораторных исследований. Размещение и количество выработок, из которых отбираются такие образцы, устанавливают таким образом, чтобы обеспечить опробование всех разновидностей пород на характерных участках. Места отбора и количество образцов пород как с ненарушенной, так и с нарушенной структурой, а также проб воды для определения химического ее состава, коррозийности и агрессивности устанавливают в зависимости от размера площадки, инженерно-геологических особенностей участка, характера проектируемых сооружений и зданий.

При значительных размерах исследуемой территории для предварительного расчленения отложений на отдельные горизонты, установления глубины залегания грунтовых вод и рационального размещения выработок целесообразно производить геофизические исследования (в основном методами электроразведки и сейсморазведки). В табл. 103 приведены размеры наиболее часто применяемой сетки наблюдений при таких работах в зависимости от масштаба исследований.

Таблица 103

Сетка наблюдений при геофизических исследованиях

Масштаб исследований	Расстояние между профилями, м	Расстояние между точками наблюдений, м	Расстояние между сейсмоприемниками, м
1 : 10 000	100—200	50—100	2—5
1 : 5 000	50—100	25—50	2—5
1 : 1 000	10—50	10—20	1—2
1 : 500	10—20	5—10	1

При изысканиях на выбранной площадке следует широко использовать полевые опытные работы, основанные на методах, связанных: 1) с механическим воздействием на исследуемый грунт (ММВ) — статическое и динамическое зондирование, пенетрация, прессиометрия, опытные штампы, вращательный срез; 2) с наведением физических полей в грунте (МФП) — сейсмические, акустические, электрические, сейсмоакустические способы, радиоактивный каротаж и др.

Полевые опытные работы производятся для определения:

1. Кровли скальных пород, залегающих под рыхлыми отложениями (ММВ и МФП), мощности элювиальной зоны скальных пород (МФП), пространственного положения поверхности скольжения оползневых массивов (МФП), границы между природными и насыпными грунтами и других геолого-литологических контактов (ММВ и МФП).

2. Изменчивости или однородности рыхлых отложений, мощности, простирания и пространственного положения отдельных слоев и линз пород (ММВ и МФП), ослабленных зон рыхлого сложения (в песках) и мягкопластичной и текучей консистенции (в глинистых породах), а также зон повышенной прочности грунтов (ММВ и МФП).

3. Глубины залегания уровня грунтовых вод и кровли водоупора, положения верхней границы многолетней мерзлоты и мощности активного слоя (ММВ и МФП).

4. Влажности, объемного веса, пористости, коррозийной активности (МФП), прочностных и деформационных характеристик грунтов (ММВ и МФП), разрабатываемости и некоторых других свойств пород в условиях их естественного залегания.

5. Несущей способности и длины свай, величин критических нагрузок и допускаемых давлений на грунт (ММВ).

Гидрогеологические исследования (опытные работы и стационарные наблюдения) выполняются для определения: 1) коэффициента фильтрации пород (откачка воды из скважин и шурфов, наливы воды в скважины и шурфы, нагнетания воды в скважины, наблюдения за скоростью восстановления уровня при проходке выработок); 2) уровней, направления и скорости движения грунтовых вод, а также их агрессивности и коррозийности; 3) глубины зимнего промерзания пород; 4) амплитуды сезонного и годового колебания уровней подземных вод.

Лабораторные исследования производятся с целью определения состава, состояния и строительных свойств пород, а также химического состава грунтовых вод, их агрессивности и коррозийности от сложности инженерно-геологических условий, особенностей пород, размеров исследуемой территории, а также характера и класса возводимых сооружений и зданий.

Камеральные работы включают: 1) предварительную (текущую) обработку материалов в период полевых изысканий; 2) окончательную обработку материалов после завершения полевых работ и исследований пород и воды в лаборатории, а также составления отчета.

Для определения расчетных характеристик пород производится статистическая обработка частных значений показателей, полученных в результате проведения лабораторных и полевых опытных инженерно-геологических работ.

В отчете по инженерно-геологическим изысканиям приводятся: задачи, состав, объемы и методика выполненных работ; климатические особенности, местоположение, рельеф, геологическое строение, гидрогеологические условия, глубина промерзания грунтов; опыт местного строительства в районе; оценка состава, состояния и строительных свойств грунтов, а также химического состава, агрессивности и коррозийности грунтовых вод; амплитуды колебания уровня подземных вод; инженерно-геологическая характеристика площадки с учетом проектируемых сооружений и зданий. К отчету прилагаются каталоги координат и отметок разведочных выработок, разрезы, колонки выработок, карты различного назначения, паспорта и графики опытных и лабораторных работ, фотографии, техническое задание на изыскания и т. п.

Инженерно-геологические исследования в сейсмических районах (с сейсмичностью 5 баллов и выше) имеют целью уточнение сейсмичности площадки, составление карт сейсмического микрорайонирования с установлением и оконтуриванием особо неблагоприятных в сейсмическом отношении участков.

Для столиц союзных республик и крупных городов, а также при строительстве особо ответственных объектов сейсмическое микрорайонирование, согласно СНиП II-А.12-69, рекомендуется проводить с помощью инструментальных

наблюдений путем регистрации колебаний от сильных и слабых землетрясений и определять сейсмическую жесткость пород.

По результатам инженерно-геологических исследований с учетом данных инструментальных наблюдений уточняют сейсмичность площадки строительства (с округлением до целых баллов) и составляют карту сейсмического микрорайонирования в масштабах 1 : 5000—1 : 25 000, на которой показывают участки с разной сейсмической устойчивостью.

Инженерно-геологические исследования на болотах и заболоченных участках должны обеспечивать выявление рельефа дна болота и минеральный состав дна; условия образования болота и его тип, глубину залегания и состав подземных вод, характер подземного и поверхностного питания болота, физические свойства болотных образований (торфа и сапропелей), их ботанический состав, степень разложения торфа и прочие свойства с целью определения возможности осушения болота.

Инженерно-геологические исследования в карстовых районах должны обеспечить: 1) выявление участков, наименее подверженных карстовым процессам; 2) установление пригодности площадки для возведения намечаемых сооружений и зданий; 3) определение возраста, причин и условий развития или повторных проявлений карста; 4) установление влияния карста на существующие сооружения, а также влияния последних на дальнейшее развитие карста; 5) разработку инженерных мероприятий по подготовке закарстованной площадки для намеченного использования. При исследованиях в карстовых районах следует широко использовать геофизические методы исследований.

При инженерно-геологических исследованиях *в районах развития оползней* выявляют причины древних и современных нарушений устойчивости отдельных участков, устанавливают типы оползней, особенности их микрорельефа, наличие и состояние инженерных сооружений, включая водопроводную и канализационную сеть, выясняют роль подземных вод в возникновении оползневых явлений, производят оценку устойчивости территории в связи с проектируемым строительством и эффективностью ранее примененных противооползневых мероприятий. Разведку оползневых участков ведут по створам, расположенным вдоль и поперек направления движения оползня. Для детального изучения оползневых участков помимо разведочных работ используют геологосъемочные, геофизические и другие виды работ.

Среди геофизических методов исследований наиболее распространены: электроразведка, сейсморазведка и сейсмоакустика, которые применяются для прослеживания плоскостей скольжения оползней, а также радиоактивные методы, используемые для изучения подвижек.

Инженерно-геологические исследования в районах развития многолетнемерзлых пород выполняют согласно требованиям технических условий проектирования оснований и фундаментов на многолетнемерзлых породах (СНиП II-Б.6-66). Изыскания проводят в объеме, позволяющем: 1) установить пригодность площадки для возведения на ней проектируемых сооружений и зданий; 2) выявить физико-механические особенности мерзлых пород; 3) обосновать выбор конструктивного решения по использованию пород основания; 4) обеспечить разработку мероприятий по регулированию температурного режима многолетнемерзлых пород и по борьбе с наледями и пучением; 5) дать прогноз возможных изменений мерзлых грунтов в процессе строительства и при последующей эксплуатации сооружений и зданий.

При инженерно-геологических исследованиях в районах распространения искусственно образованных (насыпных и намывных) пород дополнительно должны быть определены: 1) способ отсыпки или намыва; 2) давность отсыпки (намыва); 3) неоднородность состава и сложения; 4) рельеф поверхности подстилающих пород в пределах площадки; 5) изменение плотности, влажности, прочностных и деформационных свойств насыпных (намытых) пород в зависимости от давности их отсыпки (намыва).

Влияние факторов времени на изменение прочностных и деформационных свойств намытых кварцевых песков мощностью до 5 м района Заволжья сказалось в увеличении за 5,5 лет показателя динамического зондирования с 2,8 до 6,7 уд/дм, модуля деформации — со 100 до 580 кгс/см², сопротивления сдвигу — от 0,25 до 1,30 кгс/см², упругой деформации — с 10 до 30%; резко уменьшились осадки, а также скорость их протекания и продолжительность стабилизации.

При изучении насыпных и намывных пород рекомендуется широко использовать результаты полевых опытных инженерно-геологических работ, в первую очередь работ, проводившихся с применением методов динамического и статического зондирования.

II. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Общие положения. Инженерно-геологические изыскания, проводимые для обоснования проектов гидротехнических сооружений, значительны по объемам и разнообразны по составу применяемых методов. Состав, объем изысканий и комплекс применяемых методов определяются: 1) характером проектируемого сооружения; 2) стадией проектирования; 3) сложностью инженерно-геологических условий.

Гидротехнические сооружения по своему народнохозяйственному назначению делятся на гидроэнергетические, водно-транспортные, мелиоративные и водоснабженческие. На крупных реках обычно строятся гидроузлы, с помощью которых решается комплекс народнохозяйственных задач.

При компоновке энергетических сооружений различают следующие гидроузлы: 1) приплотинные с расположением здания ГЭС в составе напорного фронта или непосредственно за плотиной; 2) деривационные с безнапорной (открытым каналом) или напорной (тоннельной) деривацией; 3) гидроаккумулирующие, имеющие насосы для перекачки воды из нижнего бьефа в верхний.

В зависимости от условий использования гидротехнические сооружения (по СНиП II-И.1-62) делятся на основные, используемые при эксплуатации объекта (плотины, водосбросы, деривационные туннели и каналы, напорные трубопроводы, здания ГЭС, шлюзы и т. п.), и вспомогательные, используемые только в период строительства и ремонта сооружений (перемычки, оградительные стенки, водоотводящие тоннели и каналы и т. п.).

Наиболее ответственными сооружениями гидроузлов являются плотины, которые классифицируются следующим образом:

а) по условиям обеспечения устойчивости от сдвигающей нагрузки — гравитационные, арочные, контрфорсные;

б) по материалу, из которого они возводятся, — бетонные, каменно-набросные, земляные (намывные, насыпные);

в) по высоте: низкие — до 10 м, средние — 10—50 м, высокие — 50—150 м, сверхвысокие — более 150 м.

В основе организации проектно-изыскательских работ для гидротехнического строительства лежит их стадийность. В настоящее время в соответствии с Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 28 мая 1969 г. за № 390 «Об улучшении проектно-сметного дела» приняты следующие этапы: предпроектные работы — схема комплексного использования реки и технико-экономическое обоснование; проектные работы (стадии) — технический проект и рабочие чертежи. Для наиболее простых сооружений возможно одностадийное проектирование с составлением техно-рабочего проекта. Содержание этапов проектирования приведено ниже.

Категории сложности инженерно-геологических условий. Согласно «Инструкции по составу и объему изысканий для гидроэнергетического строительства» (И-34-61), выделяются три категории сложности

Таблица 104

Категории сложности инженерно-геологических условий

Категория	Характеристика условий строительства
I	Простые условия, не требующие ограничения нагрузок от сооружений, улучшения состояния и свойств пород
II	Сложные условия, требующие ограничения нагрузок или улучшения состояния и свойств пород
III	Весьма сложные условия, требующие проведения сложных мероприятий по улучшению состояния и свойств пород и принятия специальных конструктивных решений. Такие условия имеются в горноскладчатых и сейсмически активных областях, в районах интенсивно развитого карста, залегания легкорастворимых пород и распространения многолетней мерзлоты

инженерно-геологических условий, определяемые характером геологического строения (табл. 104).

Работы для обоснования схемы комплексного использования реки. Целью составления схемы комплексного использования реки (для нужд энергетики, мелиорации, судоходства и др.) является разработка технического замысла использования водных ресурсов, разбивка реки на ступени, определение экономических показателей отдельных гидроузлов и выбор объектов первоочередного строительства. Инженерно-геологические изыскания, задачей которых является обоснование выбора наиболее благоприятных районов размещения гидроузлов и водохранилищ, проводятся в два этапа.

На первом, подготовительном этапе сначала проводится сбор и систематизация фондовых и литературных материалов, затем главный инженер проекта совместно с геологом и геодезистом проводят рекогносцировочное обследование района предстоящих работ. В результате первого этапа составляются программа и смета на изыскания.

На втором этапе сначала производят общие инженерно-геологические исследования долины реки с целью обоснования разбивки реки на ступени и выявления возможности строительства гидроузлов и создания водохранилищ. В состав этих работ входят инженерно-геологические съемки масштабов от 1 : 50 000 до 1 : 200 000 и в случае необходимости работы по изучению специальных вопросов, которые имеют важное значение для обоснования схемы: возможности утечек из водохранилища, сейсмичности, многолетней мерзлоты и др. На основании всех этих работ проводится инженерно-геологическое районирование изучаемой долины реки.

На выявленных общими исследованиями участках возможного размещения гидроузлов проводятся следующие работы:

Инженерно-геологическая съемка, масштаб которой устанавливается в зависимости от категории слсжности и характера гидроузла (табл. 105).

Геофизические исследования, ставящие своей задачей выделение основных геологических границ (состав, задачи и указания по определению объемов приведены в табл. 106). Геофизические исследования дополняют и уточняют данные инженерно-геологической съемки и позволяют дать правильное направление горно-буровым работам.

Буровые и горные работы. На участках гидроузлов разведочные выработки задаются с учетом данных съемочных и геофизических работ. Для разведки оснований подпорных сооружений выработки располагаются

Таблица 105

Масштабы инженерно-геологических съемок, выполняемых при составлении схемы использования реки

Категория сложности инженерно-геологических условий	Вся долина реки	Гидроузлы первой очереди	Гидроузлы второй очереди
I	1 : 200 000	1 . 25 000	1 : 50 000
II	1 : 100 000	1 : 10 000	1 : 25 000
III	1 : 50 000	1 : 5 000	1 : 10 000

Таблица 106

Геофизические методы, применяемые при обосновании схемы использования

Метод	Задачи, решаемые с помощью метода	Расстояния, м	
		между поперечниками	между точками
Вертикальное электрическое зондирование	Определение литологических границ осадочных пород, границ и мощности изверженных пород	200—500	100—250
	Оконтуривание участков многолетней мерзлоты	—	25—100
Электропрофилирование	Выявление зон тектонических нарушений	300—500	—
	Выявление зон повышенной трещиноватости и закарстованных зон	50—200	10—20
Магниторазведка	Определение границ и мощности основных и кислых интрузивных пород	200—500	100
	Выявление зон тектонических нарушений	50—100	50
Сейсморазведка	Выявление зон тектонических нарушений	200—400	—
	Выявление зон повышенной трещиноватости и закарстованных зон	50	—

по поперечникам (створам) и должны быть приурочены ко всем основным геоморфологическим элементам долины, а в пределах одного элемента — находиться на расстояниях от 50 до 300 м. Крайние выработки на створе следует располагать за границами проектируемого подпора в пределах зоны влияния сооружения на борта долины. Глубина выработок определяется необходимостью: изучения рельефа коренного ложа долины, установления состава, условий залегания и состояния пород, выявления устойчивости береговых примыканий, а также изучения гидрогеологических условий и водопроницаемости пород. В равнинных речных долинах разведка ведется преимущественно буровыми скважинами. На створах высоконапорных гидроузлов, располагающихся в горных долинах, рекомендуется проходка штолен в береговых примыканиях плотин.

Трассы деривации и участки других сооружений освещаются очень ограниченным количеством разведочных выработок, которые располагаются в наиболее сложных местах.

Гидрогеологические исследования на участках гидроузлов должны охарактеризовать условия фильтрации в районе плотины и возможность фильтрационных деформаций ее основания. Для выяснения этих условий на створах гидроузлов первой очереди проводятся опытные откачки, нагнетания, наливы и наблюдения за режимом подземных вод. На остальных створах эти условия характеризуются на основании наблюдений при съемке и бурении, а опытные работы могут проводиться в весьма ограниченном объеме и только в том случае, если гидрогеологические условия имеют решающее значение для выбора района гидроузла.

Таблица 107

Масштабы инженерно-геологических съемок, применяемых при обосновании технического проекта

Категория сложности инженерно-геологических условий	I этап — выбор створа	II этап — изучение выбранного створа
I	1 : 25 000	1 : 10 000
II	1 : 10 000	1 : 5 000
III	1 : 5 000	1 : 2 000

Изучение физико-механических свойств горных пород с целью их классификации и оценки состояния и свойств проводится для всех створов. Для гидроузлов первой очереди могут выполняться в небольшом объеме исследования показателей прочности и сжимаемости отдельных наиболее характерных разностей пород.

Поиски и разведка строительных материалов проводятся для решения вопросов обеспеченности ими строительства проектируемых гидроузлов с подсчетом запасов, превышающих потребности в 2—3 раза, по категориям C_1 и C_2.

Работы на стадии технического проекта и для обоснования ТЭО. В техническом проекте должно быть окончательно выбрано место расположения гидротехнического объекта и с исчерпывающей полнотой решены все вопросы его строительства. В соответствии с этим изыскания для технического проекта делятся на два этапа: 1) для выбора одного варианта из ряда конкурирующих и 2) по выбранному варианту для обоснования проекта сооружения и проекта производства строительных работ.

Решение о проектировании и строительстве гидротехнического объекта принимается исходя из схемы комплексного использования реки. В том случае, если материалы схемы недостаточны для принятия такого решения, составляется технико-экономическое обоснование (ТЭО), в котором должен быть выбран участок для гидротехнического объекта и подтверждена экономическая целесообразность и хозяйственная необходимость строительства его на этом участке. В связи с этим изыскания для ТЭО по своей направленности, составу и объему работ соответствуют изысканиям для первого этапа технического проекта.

На участках сооружений, входящих в крупные гидроузлы, — плотин, приплотинных зданий ГЭС, шлюзов и др. проводятся следующие работы.

Инженерно-геологическая съемка делается на всех конкурирующих участках створа в масштабах, указанных в табл. 107. Площадь съемки должна быть достаточной для правильного понимания общих геологических условий участка, размещения всех вариантов компоновок сооружений и оценки инженерно-геологических процессов, которые могут возникнуть после возведения сооружения (фильтрации в обход плотины, оползания откосов, размыва русла в нижнем бьефе и т. п.). На выбранном участке проводится инженерно-геологическая съемка более крупного масштаба, которая в горных районах должна сопрово-

ждаться специальными исследованиями трещиноватости пород, а в сейсмически активных районах — микросейсморайонированием.

Разведочные работы — бурение скважин и проходка горных выработок — ведутся на обоих этапах.

На первом этапе разведочные выработки располагаются на всех конкурирующих участках створа. Результаты проходки выработок совместно с данными других работ должны освещать: 1) особенности геологического строения и геоморфологических условий; 2) основные черты строения погребенной части долины (положение коренного ложа долины, наличие эрозионных врезов и т. п.); 3) границы основных стратиграфических, генетических и литологических типов пород, их состав и состояние; 4) мощность зоны выветривания, положение уровня подземных вод. Выработки должны располагаться на всех геоморфологических и структурных элементах долины реки. Средние расстояния между выработками в пределах одного элемента приведены в табл. 108.

Таблица 108

Расстояния между выработками, рекомендуемые при изысканиях для обоснования технического проекта

Категория сложности инженерно-геологических условий	Средние расстояния между выработками, м					
	изыскания для выбора варианта створа		при изысканиях на выбранном створе			
			для бетонных сооружений		для земляных сооружений	
	в равнинных долинах	в горных долинах	в равнинных долинах	в горных долинах	в равнинных долинах	в горных долинах
I	300	150	60	50	150	100
II	250	100	50	40	100	75
III	200	75	40	30	75	50

Глубина выработок определяется необходимостью: 1) изучения пород которые могут служить основанием сооружений с учетом оценки возможного изменения состояния этих пород; 2) выявления основных закономерностей геологического строения с четким определением контактов между породами, установлением мощности зоны выветривания; 3) выявления гидрогеологических условий. При сложном геологическом строении на наиболее ответственных участках должны проходиться шурфы, а в береговых примыканиях — штольни.

На выбранном створе разведочные работы проводятся по плотине и остальным сооружениям для всех вариантов их компоновки, разрабатываемых в проекте. Разведочные выработки располагаются по осям сооружений и линиям, параллельным и перпендикулярным осям. Число разведуемых линий и расстояние между ними, а также расстояние между выработками зависят от размеров сооружений и от категории сложности инженерно-геологических условий. Обязательной является проходка выработок по оси сооружения и по двум оконтуривающим сооружение линиям, располагаемым обычно на расстоянии около 100 м от оси. Разведочными выработками должны быть также освещены условия проходки строительных котлованов для сооружений гидроузла. Глубины выработок определяются: 1) глубиной распространения воздействия нагрузок от сооружений (активная зона); 2) глубиной зоны фильтрации; 3) возможными границами возникновения таких явлений, как механическая и химическая суффозия, взвешивающее давление и т. п.

Тип и сечение выработок определяются инженерно-геологическими условиями и характером проектируемого сооружения. При решении ответственных задач, особенно на участках высоких плотин в долинах горных рек, наибольшее значение имеет проходка штолен, шахт, шурфов и смотровых скважин.

Гидрогеологические исследования при выборе варианта гидроузла проводятся в объеме, необходимом для сопоставления гидрогеологических условий конкурирующих вариантов по имеющимся инструкциям.

Исследования физико-механических свойств пород и изучение их петрографического и химического состава на первом этапе исследований производятся для классификации и общей оценки состояния пород. Определение расчетных значений прочности и сжимаемости пород выполняется лишь для слоев, характеристика которых может существенно повлиять на выбор створа. Количество определений каждого показателя для каждого из выделенных слоев должно быть от 5 до 20.

На втором этапе путем лабораторных и полевых исследований должны быть определены как классификационные показатели физических свойств и петрографо-минералогического и химического состава, так и показатели состояния пород. Количество определений каждого показателя для каждого слоя (разности) должно быть от 20 до 50. На этом этапе проводят лабораторные и полевые исследования прочности и сжимаемости пород и устанавливают их расчетные показатели. Число определений каждого из этих показателей для каждого слоя (разности) составляет от 10 до 30. Полевые опыты по сдвигу штампов и нагрузкам на штамп являются обязательными для плотин высотой более 25 м.

Оценку свойств скальных пород следует проводить с учетом характера их трещиноватости, выветрелости, наличия зон тектонических нарушений и т. п. Для оценки естественного состояния песчаных и глинистых пород рекомендуется применять статическое и динамическое зондирование.

Геофизические работы проводят как для уточнения геологического строения участка, так и для решения специальных задач: 1) оценки гидрогеологических условий — направления и скорости грунтового потока — методами заряженного тела, естественного поля и электрохимическим методом; 2) изучения физико-механических свойств скальных пород в массиве (прочности, упругости, плотности) и для их расчленения по степени сохранности сейсмическими и ультразвуковыми методами, а также методами электрокаротажа и ядерной геофизики; 3) определения пористости песков методами электрического сопротивления, электроемкостным и радиоактивным.

На участках деривационных каналов и каналов судоходных сооружений исследования проводятся также в два этапа.

На первом этапе основными видами исследований являются инженерно-геологическая съемка масштабов от 1 : 5000 до 1 : 25 000 в полосе шириной от 1 до 2 км и бурение разведочных скважин на поперечниках длиной по 100—200 м, расположенных через 200—500 м. На втором этапе (после выбора трассы) на участках расположения наиболее ответственных сооружений и наиболее сложных по геологическому строению проходят дополнительные выработки (шурфы и скважины). Глубина выработок в общем случае определяется глубиной выемки канала, она должна быть больше последней на 3—5 м. В случае возможности значительных фильтрационных потерь из канала выработки следует доводить до водоупора.

Для прогноза подтопления территории, прилегающей к каналу, проводятся специальные исследования, аналогичные работам, проводимым на водохранилищах (см. ниже). Физико-механические свойства пород изучаются так же, как и на участках подпорных гидротехнических сооружений.

На трассах деривационных тоннелей изыскания проводятся также в два этапа. На первом этапе — при выборе варианта — выполняется инженерно-геологическая съемка, охватывающая все возможные варианты трассы тоннеля. Масштаб съемки колеблется от 1 : 25 000 до 1 : 10 000 в зависимости от сложности геологического строения района. Участки порталов

покрываются съемкой масштабов от 1 : 10 000 до 1 : 2000. В районах с несложным геологическим строением разведочные работы производятся только для вскрытия поверхностных отложений и зон выветривания, покрывающих коренные породы, в которых пройдет тоннель.

В районах со сложным геологическим строением проходят более глубокие выработки (преимущественно скважины), которые должны вскрывать породы, в которых проектируется тоннель. Скважины доводятся до глубины заложения тоннеля, если она не превышает 300 м. Количество выработок определяется необходимостью осветить неблагоприятные участки; количество глубоких буровых скважин (100—300 м) должно быть не более одной на 3 км трассы. При глубоком (более 300 м) заложении тоннеля основными видами изысканий являются геологическая съемка и геофизическая разведка. На участках порталов проводятся разведочные выработки на поперечниках для изучения мощности рыхлых или ослабленных выветриванием отложений. Расстояния между поперечниками составляют 100—200 м, между скважинами на поперечниках — от 25 до 100 м.

После выбора трассы проходят дополнительные скважины и горные выработки по оси тоннеля для уточнения геологических условий принятой трассы и выявления условий проходки тоннеля. Количество глубоких скважин (100—300 м) — одна на 2—3 км трассы; расстояние между более мелкими выработками — от 100 до 500 м в зависимости от сложности геологического строения района. Для изучения участков порталов помимо скважин и шурфов проходятся штольни.

Гидрогеологические исследования проводятся для оценки притока воды в тоннель в период строительства и утечки воды из тоннеля в процессе эксплуатации. Они состоят из опытно-фильтрационных работ, проводимых в основном на выбранной трассе тоннеля, а также из стационарных наблюдений за режимом уровня, химизма и температуры подземных вод. В процессе этих наблюдений изучаются также температурный режим и газоносность пород по трассе тоннеля.

Физико-механические свойства пород исследуются как в лабораторных, так и в полевых условиях (определение упругого отпора и горного давления в штольнях и шахтах).

IV. На участках станционных узлов деривационных гидроэлектростанций исследования тоже проводятся в два этапа. На первом этапе по всем вариантам узла производят инженерно-геологическую съемку масштабов от 1 : 2000 до 1 : 10 000, а также разведочные работы. Разведочные выработки располагаются на участке напорного бассейна, на площадке здания станции и на сопрягающем их склоне. Выработки должны вскрыть породы, которые могут служить надежным основанием сооружения, на следующие глубины: 1) на участке напорного бассейна — на глубине 10—20 м от дна бассейна; 2) на трассе напорного трубопровода — на 5—7 м ниже фундаментов опор; 3) на площадке здания станции — на 10—15 м глубже проектируемой отметки заложения фундамента. В случае проектирования подземной станции в пределах ее расположения должна быть пройдена скважина на 15—20 м глубже основания станции. При сложных геологических условиях здесь должна быть пройдена горная выработка (штольня или шахта).

На втором этапе исследований разведуют только участок выбранного варианта. В пределах напорного бассейна скважины проходят на расстоянии 20—30 м одну от другой. На трассе напорного трубопровода скважины располагают на поперечниках в характерных точках; на участке здания станции их закладывают на расстоянии 25—50 м одну от другой. Глубины скважин определяются с учетом результатов первого этапа исследований. Гидрогеологические исследования и лабораторные исследования физико-механических свойств пород проводятся в объемах, обеспечивающих обоснование проекта.

V. На участке водохранилища инженерно-геологические изыскания должны обеспечить получение всех необходимых данных, на основании которых могут быть оценены условия устройства водохранилища, сделан

прогноз фильтрации из водохранилища и влияния его на прилегающие территории (подтопление, переработка берегов и т. п.), а также обоснован проект защитных мероприятий. Исследования проводятся в следующей последовательности.

Для общей оценки территории водохранилища проводится мелкомасштабная инженерно-геологическая съемка масштабов от 1 : 50 000 до 1 : 200 000. Съемка должна покрывать всю чашу водохранилища и его берега в пределах полосы, которая может подвергнуться переработке и подтоплению, а также те участки, на которых может ожидаться фильтрация из водохранилища в борта. На основании съемки устанавливают участки возможного проявления инженерно-геологических процессов, на которых проводятся более детальные исследования.

На участках возможной фильтрации в борта водохранилища производятся гидрогеологическая съемка и бурение скважин по поперечникам через водораздел. На каждом поперечнике проводят одну-две откачки из водоносных пластов и опробуют опытными нагнетаниями породы, которые после образования подпора окажутся обводненными. Скважины оборудуют для проведения в них стационарных наблюдений продолжительностью не менее 1 года.

На участках возможного подтопления и переработки берегов для прогноза подпора грунтовых вод и размеров приработки выполняют инженерно-геологическую съемку и бурение скважин по поперечникам. При оценке подтопления производится опробование всех основных разностей водоносных пород (откачками или наливами), а также стационарные режимные наблюдения. Состав лабораторных и специальных исследований при изысканиях на участках возможной переработки берегов определяют по принятым методам расчета (по Е. Г. Качугину, Н. Н. Кондратьеву или Г. С. Золотареву).

Масштаб инженерно-геологической съемки, выполняемой на участках возможной фильтрации из водохранилища, а также на участках возможного подтопления или переработки берегов, определяется категорией сложности геологических условий района. Для районов I категории сложности рекомендуется масштаб 1 : 25 000; для районов II категории — 1 : 10 000; для районов III категории — 1 : 5000.

На участках, где проектируется инженерная защита от затопления или подтопления, изыскания в зависимости от состава гидротехнических сооружений проводятся в соответствии с пунктами I и II.

VI. Поиски и разведку строительных материалов выполняют одновременно с изысканиями для обоснования проектов сооружений, так как от наличия тех или иных видов строительных материалов зависит выбор экономичного типа гидротехнического сооружения. На первом этапе изысканий выполняют поиски и разведку месторождений с целью выявления запасов по категориям C_1 и В и получения данных, необходимых для сопоставления вариантов расположения сооружений.

На втором этапе производится разведка месторождений, наиболее перспективных для выбранного варианта. Разведанные запасы должны соответствовать категориям В и А и на 30—50% превышать заявленные потребности.

Работы на стадии рабочих чертежей. Задачей проектирования на этой стадии является доработка и уточнение технических решений, внесение изменений в проект в соответствии с решением утверждающей инстанции по техническому проекту; разработка детальных конструктивных решений для отдельных сооружений и их элементов. Результаты инженерно-геологических изысканий на этой стадии должны обосновать решение конкретных задач, возникающих в процессе проектирования и строительства сооружений, а также уточнить и детализировать условия производства строительных работ.

Инженерно-геологические исследования на этой стадии включают полный комплекс изыскательских работ и специальные исследования. Большое значение приобретают горные выработки (шурфы и штольни) и исследования инженерно-геологических свойств пород в естественном залегании. В ряде случаев производятся опытные строительные работы.

Разведочные работы для уточнения данных, полученных на стадии технического проекта, проводятся на участках наиболее ответственных сооружений (бетонных плотин, зданий гидроэлектростанций, шлюзов и др.) или их отдельных элементов (бычков плотин, голов шлюзов и др.). Разведочные выработки располагаются в пределах контуров сооружений и их котлованов, а также на участках противофильтрационных, дренажных и прочих устройств. Расстояния между выработками назначаются в зависимости от конкретных требований, возникающих при строительстве данного сооружения. Если нужно уточнить инженерно-геологические условия на разведанных участках, то сеть разведочных выработок, пройденных на стадии технического проекта, сгущается.

Глубины выработок определяются мощностью активной зоны, глубиной заложения противофильтрационных завес и т. п.

Основное внимание в этой стадии изысканий уделяется проходке горных выработок и скважин большого диаметра (смотровых скважин), количество которых определяется из условия освещения всех характерных участков основания или берегового примыкания напорного сооружения. На участках подземных сооружений (зданий ГЭС, тоннелей и др.), береговых примыканий высоконапорных плотин, а также в основаниях высоких плотин при сложном геологическом строении проходка горных выработок является обязательной. Геофизическими методами исследований проверяется сохранность пород в основании и примыканиях плотин и в подземных выемках.

Опытно-фильтрационные работы производятся для уточнения принятых проектных решений в отношении: 1) плотности и глубины противофильтрационных завес; 2) водоотлива из котлованов и водопонижения, расчетов дренажей и т. п. По параметрам опытные работы по возможности приближают к эксплуатационным условиям. Продолжаются начатые в предыдущей стадии исследований стационарные наблюдения за режимом подземных вод (в том числе за агрессивностью). Наблюдательную сеть расширяют с учетом расположения котлованов и противофильтрационных сооружений.

Для уточнения расчетных характеристик производят *исследования физико-механических свойств пород*, уделяя основное внимание прямым определениям прочностных и деформационных характеристик, особенно для слоев, которые будут служить основанием сооружений, и определяют конструкцию последних. Помимо лабораторных работ широко проводят полевые исследования крупных монолитов и пород в естественном залегании (в горных выработках, котлованах и т. п.). При сооружении высоких плотин и высоконапорных тоннелей производят специальное изучение прочностных и деформационных характеристик пород в условиях высоких давлений и изучают напряженное состояние скального массива.

Большое внимание уделяют моделированию условий работы сооружения и его взаимодействия с породами основания (моделирование гидрогеологических условий методом ЭГДА, моделирование размыва пород, суффозии и т. п.). В числе опытных строительных работ производят: разработку опытных котлованов, сооружение опытных участков противофильтрационных завес, опытные водопонижения, опытную укладку грунтов в тело земляной плотины и т. п. К выполнению этих работ привлекаются строительные организации.

На стадии рабочих чертежей продолжаются *изыскания по водохранилищу*, направленные в основном на детальное изучение наиболее сложных участков, выявленных на предыдущей стадии, а также на изучение инженерно-геологических условий защитных сооружений.

Разведка строительных материалов на этой стадии производится с целью перевода запасов в категорию А и получения полной и всесторонней оценки качества материалов в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями, а также для определения способа разработки, обогащения и т. п. Разведка осуществляется скважинами и горными выработками. Последние должны составлять не менее 10—20% от общего количества выработок.

Инженерно-геологические исследования в период строительства и эксплуатации сооружений. В процессе строительства гидротехнических сооружений производятся следующие работы.

Инженерно-геологическая документация строительных котлованов и выемок и контроль за ходом строительства. Основными задачами этого вида работ являются:

1. Систематические наблюдения за ходом строительных работ для уточнения геологических и гидрогеологических условий по данным строительных котлованов и выемок и выявление имеющихся расхождений натурных условий с проектными данными, что позволяет своевременно внести необходимые коррективы в проект.

2. Контроль за выполнением требований проекта, связанных с учетом геологических условий (ведением буровзрывных работ, устройством водопонижения, подготовкой основания, сооружений, выполнением проекта цементационных работ и т. п.).

3. Документация законченных строительных котлованов и подземных выемок: зарисовка, описание и фотографирование.

Для документации крупных котлованов, особенно в сложнодислоцированных скальных породах, весьма перспективным методом является фототеодолитная съемка. Масштаб документации зависит от типа сооружения, размеров котлована и сложности геологического строения. Он может изменяться от 1 : 50—1 : 100 для основания бетонных сооружений в особо сложных геологических условиях до 1 : 5000 для земляных сооружений в простых геологических условиях. В процессе составления документации производится отбор образцов из подготовленного основания для определения физико-механических свойств пород основания (состав, состояние, прочность) и сопоставления их с данными, заложенными в проекте.

Материалы документации (зарисовки, описания, ведомости определений физико-механических свойств пород) являются обязательным документом при приемке оснований сооружений (СНиП III-Б.1-62, СНиП III-И.2-62).

Геотехнический контроль за возведением земляных сооружений включает следующие работы:

1. Наблюдения за карьерами пород, разрабатываемых для возведения земляных сооружений; согласно СНиП III-Б.1-62 проводится контроль за правильностью разработки и отбираются пробы для контроля качества пород (в среднем одна проба на 20 тыс. м³ грунта).

2. Контроль за правильностью укладки пород в тело сооружения; при отсыпке сооружений следует производить опытную укатку, посредством которой уточняются принятые в проекте параметры: контрольная влажность и контрольная плотность пород, толщина отсыпаемых слоев; тип уплотняющего механизма и режим его работы; в дальнейшем организуется контроль за выполнением принятых параметров пород; отбор контрольных проб производится послойно из расчета одна проба на 100—200 м³ насыпи (СНиП III-Б.1-62); при намыве плотин производится контроль за гранулометрическим составом, плотностью и другими параметрами грунта, уложенного в тело сооружения, и контроль за состоянием возводимого сооружения (изменение состояния грунта во времени и т. п.).

3. Контроль за отсыпкой обратных фильтров, устройством дренажей и т. п.

В процессе эксплуатации сооружений выполняются наблюдения за осадкой и сдвигом сооружений, за работой противофильтрационных завес (по пьезометрическим скважинам), за ходом переработки берегов водохранилища и т. п. Результаты этих наблюдений позволяют проверить правильность принятых в проекте решений и сделанных прогнозов, а также проверить качество строительных работ и в случае необходимости провести дополнительные мероприятия по предотвращению аварий.

Некоторые особенности проведения инженерно-геологических изысканий в особо сложных инженерно-геологических условиях. Инженерно-гео-

логические изыскания в районах распространения многолетнемерзлых пород имеют ряд специфических особенностей, связанных с необходимостью: а) установления форм залегания границ распространения и мощности многолетнемерзлых пород; б) изучения характера многолетнемерзлых пород — их состава, строения, температурного режима; в) изучения физико-механических и теплофизических свойств мерзлых пород и их изменения при оттаивании.

Для решения указанных задач дополнительно к общепринятым проводятся следующие работы:

Мерзлотная съемка, в процессе которой выявляются закономерности распространения многолетнемерзлых пород, их связь с различными геолого-геоморфологическими и ландшафтными элементами; изучаются такие физико-геологические явления, как термокарст, солифлюкция, бугры пучения и т. п. Масштаб мерзлотно йсъемки соответств уетмасштабу инженерно-геологической съемки

Замеры температуры пород во всех разведочных и в специальных режимных скважинах (стационарные наблюдения). Для проведения наиболее полных наблюдений на участках крупных гидроузлов должны быть оборудованы не отдельные скважины, а площадки для стационарных наблюдений. Число площадок определяется числом основных элементов, выделенных по особенностям мерзлотных условий района. Как правило, площадки должны быть оборудованы еще при изысканиях для обоснования схемы, но не позже конца первого этапа технического проекта; наблюдения на них проводятся до конца строительства.

Специальные лабораторные определения физических свойств, характеризующих многолетнемерзлые породы, их теплопроводность, теплоемкость, льдистость, суммарную весовую влажность и влажность минеральных прослоев и др.

Специальные лабораторные и полевые исследования механических свойств: осадка при оттаивании в лаборатории — в одометрах и в натурных условиях методом «горячего штампа»; прочности пород в трех состояниях: мерзлом, переходном (в процессе оттаивания) и оттаявшем.

Исследования водопроницаемости мерзлых пород. Для скальных пород применяются геофизические методы, позволяющие косвенно оценить наличие пустот в породах (гамма-гамма-каротаж), выявить преобладающие системы трещиноватости (электроразведка, сейсморазведка) и с помощью аналогий оценить водопроницаемость пород. Чрезвычайно перспективен метод нагнетания воздуха в скважины с целью оценки водопроницаемости скальных пород. Водопроницаемость рыхлых отложений изучается в основном лабораторными методами.

Инженерно-геологические изыскания в районах развития карста. Изыскания должны проводиться на основе принципиальной схемы развития карста, вырабатываемой на первых этапах исследований. В процессе проведения изысканий должно быть выявлено распространение карстовых форм и установлены: 1) генезис карста; 2) его связь с общим геологическим строением района и с составом пород; 3) гидродинамические закономерности развития карста; 4) генетическая и морфологическая связь карста с трещиноватостью, в том числе с трещинами бортового отпора и зонами тектонических нарушений; 5) условия растворения пород фильтрационным потоком и скорость этого процесса.

Изыскания в карстовых районах разбиваются на три главных этапа.

На первом этапе (схема использования реки) изучают общие закономерности развития карста с помощью инженерно-геологической съемки, геофизических методов (электроразведка и сейсморазведка) и бурения глубоких (опорных) скважин с проведением режимных наблюдений.

На втором этапе (выбор створа) продолжается изучение закономерностей развития карста, производится предварительная оценка влияния карстопроявлений на водопроницаемость и прочность пород.

По материалам исследований первых двух этапов составляют схему развития карста и выбирают одно из двух принципиальных направлений дальнейших

работ: а) «уход» от карста, т. е. размещение сооружений за границами области его развития; б) «приспособление» сооружений к закарстованным породам.

В случае принятия второго принципа на третьем этапе (изыскания на выбранном створе и рабочие чертежи) широко проводятся специальные исследования:

1. Определение показателей водопроницаемости и фильтрационной неоднородности закарстованных пород в вертикальном и горизонтальном направлениях методом трехзонных кустовых откачек из скважин большого диаметра, с поэтапно расположенными пьезометрами.

2. Изучение степени закальматированности пород в руслах рек и на берегах на основе проведения откачки из большого колодца, наблюдений за пьезометрами и последующего моделирования на ЭГДА.

3. Изучение суффозионной устойчивости рыхлого заполнителя трещин и карстовых полостей методом нагнетаний воды в одиночные скважины с определенной последовательностью ступеней напора либо методом одновременного опробования двух скважин, в одну из которых производится нагнетание, а из другой — откачка.

4. Определение деформационных свойств закарстованных пород методом опытных нагрузок на штампы.

Инженерно-геологические изыскания в районах развития скальных пород, характеризующихся сложным тектоническим строением. При проведении изысканий в районах со сложным геологическим строением (развитием складчатости, тектонических нарушений и последствий вулканизма) необходимо вести работы с учетом общих региональных условий и особенностей геологического строения района. Одним из важнейших факторов, обусловливающих инженерно-геологическую оценку основания и примыканий гидротехнических сооружений, является тектоническое строение. В связи с этим на ранних стадиях необходимо составить схему тектонического строения, которая должна уточняться дальнейшими изысканиями. При изучении скальных массивов необходимо определять их неоднородность и анизотропию как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Анизотропия массивов в вертикальном направлении в основном определяется наложением процессов выветривания и разгрузки пород, что должно быть тщательно изучено, так как этим определяется глубина необходимого съема пород в котлованах гидротехнических сооружений.

В горных долинах большое внимание должно быть уделено изучению устойчивости крутых высоких склонов, особенно на участках примыканий арочных плотин.

Для составления схемы тектонического строения, как и для изучения инженерно-геологических условий в целом, наряду с другими работами необходимо применять структурно-петрологические исследования и использовать горно-буровые работы и геофизические методы разведки: сейсморазведку, разведку ультразвуком и др. При наличии в строении скального массива субвертикальных тектонических нарушений и ослабленных зон, а также субвертикальной трещиноватости следует отдавать предпочтение проходке горизонтальных горных выработок (штолен, рассечек, канав) и наклонных скважин.

Для расчленения скальных пород на зоны одинаковой сохранности наряду с другими работами следует широко применять геофизические методы и массовые определения физических свойств простейшими методами.

Большую роль при изучении скальных пород играет количественная оценка их трещиноватости, в связи с чем проводят специальные исследования трещиноватости и блочности скальных пород в массиве. Изучение водопроницаемости скальных пород в условиях развития тектонических нарушений и трещин должно вестись путем гидрогеологического опробования вертикальных и наклонных скважин.

При изучении физико-механических свойств скального массива широко применяют полевые методы: опытные нагрузки штампов; опытные сдвиги бетон-

ных штампов и крупных блоков пород; изучение прочностных и деформационных свойств горных пород геофизическими методами. Кроме того, определяют коэффициент отпора, горное давление и напряженное состояние массива. Для определения коэффициентов отпора в горных выработках применяют прессиометрические методы.

III. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ТОННЕЛЕЙ И ДРУГИХ ВИДОВ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Общие вопросы. Результаты инженерно-геологических исследований являются основой: 1) для выбора положения тоннелей в плане и профиле; 2) для установления способов ведения горных работ, обеспечивающих безопасность последних и сохранность наземных сооружений; 3) для правильного выбора конструкций временной и постоянной крепи; 4) для выработки мероприятий по защите обделки от агрессивного воздействия грунтов и подземных вод; 5) для решения вопросов вентиляции и водоснабжения.

Объемы буровых работ определяются глубиной заложения сооружения, степенью доступности района изысканий, сложностью инженерно-геологических условий и этапом проектирования. Ориентировочная характеристика этих объемов приведена в табл. 109 и 110, взятых из Технических условий и Инструкции на производство инженерно-геологических изысканий для проектирования и строительства метрополитенов и горных железнодорожных тоннелей (1955 г.).

Глубину буровых разведочных скважин назначают, исходя из условия, что забой скважины должен находиться на 5—6 м ниже проектируемого основания подземных сооружений. В том случае, когда в этих пределах могут быть встречены неустойчивые породы, скважину углубляют до нижележащих устойчивых пород.

В результате инженерно-геологических изысканий должны быть решены следующие вопросы:

Общие: а) климатические условия, географическое положение; б) орография и гидрография; в) наличие строительных материалов в районе строительства.

Геологическое строение: геоморфология, стратиграфия, литология, тектоника.

Гидрогеологические условия строительства: а) наличие и состав водоносных горизонтов в зоне горных работ; б) наличие выдержанных водоупорных слоев; в) направление и скорость движения подземных вод, характеристика водопроницаемости пород; г) ожидаемые водопритоки в выработки; д) ожидаемое гидростатическое давление на обделку; е) размеры депрессионной воронки и влияние водоотлива на режим эксплуатации артезианских скважин и колодцев в районе подземного строительства; ж) температура, химический и бактериологический состав подземных вод и степень агрессивности их по отношению к материалу обделки сооружения.

Возможность использования подземных вод для водоснабжения.

Инженерно-геологические условия: а) общая устойчивость массива горных пород; наличие физико-геологических процессов и явлений и степень их активности; наличие тектонических нарушений, раздробленных пород и неустойчивых зон; сейсмичность района; б) физико-механические свойства грунтов в массиве; в) характер трещиноватости; г) участки и характер возможных нарушений устойчивости горных пород при проходке (вывалы, высыпания, выплывание пород и пр.); д) условия и характер проявления горного давления; е) крепость пород, категории по разрабатываемости; ж) возможность выветривания и выщелачивания пород при проходке и эксплуатации сооружений; з) ожидаемые температуры при горных работах; и) химико-минералогический состав горных пород и его влияние на материал обделки; к) газопроявления; л) возможность использования грунтов и воды из подземных выработок; м) прогноз развития под

Таблица 109

Состав инженерно-геологических изысканий для строительства тоннелей и других подземных сооружений
(на основании инструкций и пособий по данному вопросу)

Виды работ	Назначение работ	Состав работ	Примерное выполнение по стадиям, %	
			технический проект	рабочие чертежи
Подготовительные	Обоснование объема и методики исследований с учетом изученности района	Сбор и изучение литературных источников, отчетов и архивных материалов. Составление сметы, программы и графика работ	100	
Инженерно-геологическая съемка	Предварительная характеристика территории строительства: рельеф, геоморфология, геологическое строение, гидрогеологические условия, наличие физико-геологических явлений, состояния существующих сооружений. Ширина полосы съемки до 1 км. Масштаб 1 : 10 000; для портальных участков 1 : 5000—1 : 2000	Описание и зарисовка искусственных и естественных обнажений горных пород, выходов подземных вод, современных геологических явлений; проходка шурфов, мелких буровых скважин, расчисток; полевые лабораторные исследования; изучение форм рельефа; обследование состояния существующих зданий и подземных сооружений; выбор мест для отвала породы и строительства околошахтных сооружений, составление инженерно-геологических карт, фотографирование	100	—
Геофизические	Получение данных об общей структуре участка, глубине залегания пород коренной основы и уровне подземных вод, а также состоянии горных пород	Электроразведка: электропрофилирование, ВЭЗ, круговые ВЭЗ, сейсмические исследования, каротаж, метод заряженного тела	100	—
Разведочные	Детальное исследование стратиграфии, литологии гидрогеологических условий и газоносности	Бурение разведочных скважин, проходка шурфов, расчисток, канав, штолен	70—80	20—30
Гидрогеологические	Получение исходных данных для расчетов водопритоков в выработки, для определения возможности искусственного водопонижения и расчетов водопонизительных установок; для определения гидростатического давления на обделку сооружения	Опытные одиночные и кустовые откачки; наливы; нагнетания; определение скорости движения воды; стационарные наблюдения за режимом подземных вод	70	30
Полевые испытания грунтов	Определение некоторых показателей механических свойств горных пород	Пробные нагрузки в шурфах и скважинах; пенетрация статическая и динамическая; испытания сопротивлению пород на сдвиг. Определение коэффициента отпора пород в шурфах и выработках	—	100

Продолжение табл. 109

Виды работ	Назначение работ	Состав работ	Примерное выполнение по стадиям, %	
			технический проект	рабочие чертежи
Лабораторные	Определение инженерно-геологических свойств горных пород; химического состава пород и воды	Лабораторные анализы свойств пород и химического состава воды . .	40	60
Камеральные	Заключение об инженерно-геологических условиях района строительства» Определение расчетных показателей для проектирования тоннеля	Обработка полевых материалов и лабораторных данных, составление карт, разрезов, графиков и отчетов	70—80	20—30
Инженерно-геологическая документация горных выработок и исследования при строительстве	Проверка соответствия данных инженерно-геологических изысканий действительным условиям, наблюдаемым на строительстве. Корректирование рабочих чертежей в процессе строительства. Проверка правильности расчетов тоннельной обделки	Инженерно-геологическая документация забоев выработок; отбор и анализы проб пород и подземных вод; наблюдения за режимом подземных вод. Опыты по определению горного давления и упругого отпора пород	—	100

Таблица 110

Ориентировочные объемы буровых работ

Сооружение	Характеристика сооружения	Ориентировочный объем буровых работ
Железнодорожные и автодорожные горные тоннели	Длина до 200 м. Глубина заложения до 300 м	По три скважины на каждом портальном участке и три скважины в средней части
	Длина более 200 м. Глубина заложения до 300 м	По три скважины на каждом портальном участке и по одной через каждые 100—150 м длины тоннеля
	Глубина заложения тоннелей более 300 м	Буровые работы обычно не производятся. Применяются геофизические методы разведки; проходятся разведочные горные выработки
Метрополитен	Перегонные тоннели Простые условия Сложные условия Станции Стволы шахт Эскалаторные тоннели Вестибюли, тяговые подстанции, машинные помещения	 15 скважин на 1 км трассы До 100 скважин на 1 км трассы 6 скважин на одну станцию Три скважины на один ствол Три скважины на один тоннель 5 скважин на одно сооружение

влиянием горных работ инженерно-геологических процессов и явлений; рекомендации по мероприятиям для их предотвращения (табл. 111—113).
Приведем некоторые горно-технические характеристики.

Приближенное определение температуры пород в горной выработке:

$$T_{\text{н}} = t_{\text{в}} + \frac{H-h}{G},$$

где T — температура на глубине H;
$t_{\text{в}}$ — средняя температура воздуха;
H — глубина, для которой определяется температура;
h — глубина слоя постоянных годовых температур;
G — геотермическая ступень, м на 1° С (приближенно принимается равной 33 м на 1° С).

Таблица 111

Инженерно-геологические процессы и явления, которые могут возникнуть при проходке подземных сооружений
(по Г. Н. Сазонову)

Способ работ	Процессы и явления, общие для данного способа работ	Типы пород, вскрываемых забоем	Возможные дополнительные процессы и явления
Без применения специальных методов проходки	Изменения напряжений в массиве. Подземное выветривание. Горное давление» Сдвижение горных пород. Оседание земной поверхности	Скальные и полускальные породы	Повышение трещиноватости, вывалы отдельных глыб. При водоотливе гидростатическое уплотнение глинистых и песчаных пород в зоне депрессионной воронки с дополнительным оседанием земной поверхности. Вымывание заполнителей трещин и карстовых пустот, суффозия доломитовой муки. Выщелачивание горных пород. Прорывы подземных вод или газа. Горные удары и стреляние пород
		Глинистые породы	Увлажнение, уменьшение прочности. Усыхание, уменьшение или увеличение прочности. Пучение, усадка, растрескивание; прогиб слоев, вывалы и высыхание пород
		Песчаные породы влажные	Виброуплотнение или разрыхление. Высыпание пород
		Песчаные породы водоносные	Гидродинамическое давление, суффозия, выплывание и прорывы плывунов. Дополнительное оседание земной поверхности
С применением искусственного замораживания	При замораживании: понижение температуры, льдообразование, повышение прочности, уменьшение водопроницаемости, образование новой структуры. При проходке: изменение напряжений в массиве, горное давление, сдвижение горных пород, оседание земной поверхности. При оттаивании: повышение температуры, переход твердой фазы (льда) в жидкую	Скальные и полускальные породы	При замораживании: растрескивание, уменьшение или ликвидация водопритока При оттаивании: разрыхление, увеличение водопроницаемости
		Глинистые породы	При замораживании: миграция влаги и диффузия солей, морозное пучение, подъем поверхности земли При оттаивании: часто уменьшение прочности и повышение водопроницаемости. Дополнительные сдвижения горных пород, горное давление и оседание земной поверхности
		Песчаные породы водоносные	При оттаивании: восстановление первоначальных свойств, сдвижение горных пород и оседание поверхности земли
С применением сжатого воздуха	Осушение пород в зоне забоя, изменение напряжений в массиве, горное давление, оседание поверхности земли	Скальные и полускальные породы	Увеличение пластового давления, подъем уровня подземных вод, уменьшение или ликвидация водопритока
		Глинистые породы	Уменьшение влажности пород в зоне забоя, слабое растрескивание пород, расширение существующих трещин

Продолжение табл. 111

Способ работ	Процессы и явления, общие для данного способа работ	Типы пород, вскрываемых забоем	Возможные дополнительные процессы и явления
		Песчаные породы водоносные	Повышение пластового давления, подъем уровня грунтовых вод, иногда заболачивание поверхности земли. Образование газово-жидкостной смеси в пласте. Уплотнение пород, создание новой структуры грунта. Подъем земной поверхности (при чрезмерном давлении сжатого воздуха в забое и малой глубине выработки)
С применением искусственного водопонижения	Снижение уровня подземных вод, повышение гидродинамического давления, образование депрессионной воронки с уплотнением глинистых и песчаных пород в ее зоне Сдвижение горных пород, горное давление, оседание поверхности земли	Скальные и полускальные породы	Вымывание заполнителей трещин и карстовых пустот
		Песчаные породы	Суффозия и дополнительные оседания поверхности земли

Таблица 112

Ориентировочные значения коэффициентов удельного отпора пород
(по Г. Г. Зурабову и О. Е. Бугаевой)

Породы	Величина коэффициента удельного отпора, кгс/см²	Давление при испытании, кгс/см²	Способ испытания
Глины плотные	60—100	1—3	Напор в шурфе
Рыхлые вулканические выбросы	40	1	То же
Слабые сланцы и песчаники	150	2,7	»
Серицитовые сланцы, сильнотрещиноватые базальтовые лавы	200	5,3	Напор в тоннеле
Сланцы и песчаники	220	2,7	Напор в шурфе
Моллас среднезернистый	250	50	Домкраты
Известняк с прослоями глины	350	10	»
Скально-обломочные и валунные породы	400—450		Напор в шурфе
Кварциты выветрелые	500	20	Домкраты
Туфопесчаники	600		Напор в шурфе
Фиббиогнейсы	650	10	Напор в тоннеле
Крепкие туфопесчаные породы	800		Напор в шурфе
Глинистый сланец	900	10,8	Напор в тоннеле
Парагнейсы	1000	10	То же
Известняк с прослоями глинистого мергеля	1150	10	Домкраты
Песчаник на известковистом цементе с прослоями кварца	1500	10,8	Напор в тоннеле
Граниты	2100	6	То же
Биотитовые гнейсы	2200	5	»
Известняк крепкий	2800	10	Домкраты
Кварцит плотный с прослойками сланца, кварцевый песчаник	3800	7	Напор в тоннеле
Кварцит плотный	6000	20	Домкраты

Таблица 113

Временное сопротивление глин на прорыв

Разновидности глинистых пород	Средняя естественная влажность	σ, тс/м²
Песчаные и углистые разности глин неплотного сложения	17—19	8—9
Углистые и песчаные глины средней плотности	19—21	12—15
Пластичные глины средней плотности	20—21	19—20
Слабопесчаные и пластичные уплотненные глины	19—20	22—25
Глины очень плотного сложения твердой и полутвердой консистенции	18—20	25—30

Разрыхляемость горных пород. Разрыхляемостью называют способность горной породы увеличиваться в объеме при разработке. Она характеризуется значением коэффициента K:

$$K = \frac{V_1}{V} > 1,$$

где K — коэффициент разрыхляемости;
V_1 — объем добытой горной породы;
V — объем горной породы в массиве.

IV. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Инженерно-геологические исследования для строительства автомобильных и железных дорог имеют целью обоснование, в совокупности с данными технических и экономических изысканий, правильного выбора направления дороги.

При обследованиях для составления *технико-экономического обоснования* (*тэо*) новой дороги по выбранным вариантам трасс изучаются общие природные условия по геологическим картам и дешифрированным аэрофотоснимкам, собираются сведения о климате, почвенном покрове, гидрогеологических условиях и наличии дорожно-строительных материалов. При необходимости производят рекогносцировочные обследования с целью оценки геологических условий на больших и средних мостовых переходах и в местах индивидуального проектирования.

Для составления проектного задания новой дороги производятся подробные полевые изыскания по выбранному варианту дороги. Они заключаются в детальном изучении состава и состояния грунтов по трассе на участках насыпей, выемок, косогорах, болотах, в местах индивидуального проектирования и искусственных сооружений, а также производятся поиски и разведка дорожно-строительных материалов и обследование площадок под строительство линейных и гражданских сооружений.

Под *рабочие чертежи* производится уточнение инженерно-геологических условий в местах перетрассирования, на оползневых склонах, осыпях, болотах, в местах расположения искусственных сооружений, а также доразведка месторождений строительных материалов.

При изысканиях для реконструкции существующей дороги или вторых путей исследуются имеющиеся деформации земляного полотна с целью назначения инженерных мероприятий по укреплению неустойчивых мест; выясняется состояние дорожного покрытия и степень загрязненности балластного слоя; изучаются наледные и пучинистые места и обследуются исскусственные сооружения.

Основными видами инженерно-геологических изысканий являются съемка полосы вдоль трассы шириной 200—300 м по обе стороны в масштабах 1 : 5000 (для автомобильных дорог) и 1 : 10 000 (для железных дорог) и разведочные работы. Кроме того, выполняется попикетное описание природных условий по трассе и определяется категория грунтов.

На средних и больших мостовых переходах объем разведочных работ устанавливается в зависимости от степени геологической изученности и от строения речной долины: а) не изученные ни в геологическом, ни в инженерно-геологическом отношении; б) изученные в отношении геологического строения, но не изученные в инженерно-геологическом отношении; в) изученные в геологическом и инженерно-геологическом отношениях.

По геологическому строению речные долины подразделяют на пять типов: 1) с мощностью аллювия до 10 м; на глубине заложения мостовых опор залегают выдержанные по всей длине мостового перехода слабосжимаемые горные породы;

2) с мощностью аллювия от 10 до 20 м; аллювий представлен средне- и мелкозернистыми песками; 3) с мощностью аллювия от 10 до 20 м; аллювий представлен пластичными суглинками, глинами и иловатыми породами, выдержанными в пределах всего мостового перехода; 4) с мощностью аллювия до 20 м различного состава и состояния; на глубине заложения мостовых опор залегают различные породы, причем смена их может происходить либо в пределах всего створа моста, либо на отдельных участках речной долины; 5) с мощностью аллювия более 20 м; на глубине заложения опор залегают различного состава песчано-глинистые или иловатые породы.

Производятся поиски и разведка дорожно-строительных материалов.

В качестве дорожно-строительных материалов применяются: песок, гравий, камень, доменный и котельный шлаки, отходы горнообогатительных фабрик и камнедробильных заводов, отвалы рудников и карьеров, дратные отвалы и пр.

В зависимости от назначения к этим материалам предъявляются различные требования.

V. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ТРУБОПРОВОДОВ

Трубопроводы (водопроводы, нефтепроводы, газопроводы, рассолопроводы и пр.) характеризуются незначительной удельной нагрузкой на основание, обычно не превышающей 0,2 кгс/см^2, но для них свойственна высокая чувствительность к механическим и температурным деформациям, которые могут вызвать осевые перемещения с повреждением стыковых соединений. Трубопроводы укладывают под землей ниже глубины сезонного промерзания пород, располагая их по возможности параллельно рельефу местности. Расчет трубопроводов производится с учетом прочности основания, веса пород засыпки или насыпи, глубины сезонного и наличия постоянного промерзания пород, сейсмичности, блуждающих электрических токов, а также временных нагрузок (возникающих при пересечении железных и автомобильных дорог).

Состав и содержание инженерно-геологических изысканий для обоснования строительства трубопроводов и связанных с ними зданий и сооружений (насосные, наблюдательные и компрессионные станции; водонапорные башни, резервуары и пр.) определяются требованиями СНиП II-А, 13-69, СН 210-62 (для основных видов строительства), СН 225-62 (для промышленного строительства), СН 211-62 (для городского и поселкового строительства) и СН 234-62 (для линейного строительства), а также ведомственными указаниями по методике и технологии изыскательских работ.

Инженерно-геологические изыскания трубопроводов обычно проводятся в две стадии. На первой стадии изыскания проводятся с целью обоснования выбора оптимального варианта трассы. На второй стадии работы они осуществляются по выбранному варианту трассы со съемкой участков индивидуального проектирования. К таким участкам относятся: оползневые склоны; конусы выноса; участки развития осыпей; участки, подверженные селевым заносам; участки, опасные в отношении обвалов и лавин; участки распространения вечномерзлых грунтов и наледообразования; участки распространения карстующихся пород и пр.

Работы на первой стадии начинаются со сбора, систематизации и анализа геологических, гидрогеологических, геофизических и других данных. Используются аэрофотоматериалы по району работ, осуществляется их дешифрирование с выделением элементов природной обстановки. Затем производится наземное или авиавизуальное инженерно-геологическое обследование полосы трассы шириной до 300 м. Производится осмотр и описание естественных обнажений, колодцев, проявлений неблагоприятных физико-геологических процессов и т. д.

По выбранному варианту трассы и переходам препятствий изучаются геолого-литологическое строение, гидрогеологические условия и физико-механические свойства грунтов, слагающих полосу проложения трассы; выявляются неблагоприятные физико-геологические процессы и явления; производится обследование состояния существующих сооружений, расположенных вблизи трассы.

В полевой период осуществляется инженерно-геологическая рекогносцировка полосы проложения трассы, проходка разведочных выработок и их опробование.

Инженерно-геологическая рекогносцировка проводится с целью проверки и дополнения ранее собранных материалов о природной обстановке района в соответствии с требованиями действующих инструкций и наставлений по съемочным работам.

При проведении изысканий в сложных условиях с неблагоприятными физико-геологическими процессами и явлениями выполняется инженерно-геологическая съемка в соответствии с требованиями СНиП II-А.13-69.

Местоположение, количество и глубина выработок определяются изученностью и сложностью инженерно-геологических условий полосы проложения трассы. При простых инженерно-геологических условиях обычно проходится одна выработка глубиной 3—5 м на 5—10 км трассы или 1—2 выработки на каждом выделенном инженерно-геологическом участке.

В сложных условиях в соответствии с требованиями СНиП II-А.13-69, количество и глубина выработок могут быть увеличены.

Для определения классификационных показателей свойств грунтов, развитых по трассе, с каждого инженерно-геологического участка отбирается 3—5 образцов грунта. При встрече водоносных горизонтов отбираются пробы воды на химический анализ.

В камеральный период по окончании обработки материалов полевых исследований составляется заключение (отчет) об инженерно-геологических условиях полосы проложения трассы. В заключении приводится сравнительная инженерно-геологическая характеристика вариантов трассы трубопровода и обосновывается выбор наиболее благоприятного варианта. К отчету прилагаются: обзорная топографическая карта района с указанием расположения рассмотренных вариантов; схематическая карта инженерно-геологического районирования трассы; схематические геолого-литологические профили (разрезы) всех вариантов трассы; таблицы результатов лабораторных исследований свойств грунтов и воды.

Инженерно-геологические изыскания включают: проходку разведочных выработок по трассе и на площадках сооружений; дополнительные исследования участков индивидуального проектирования и отдельных переходов; лабораторные исследования грунтов; определение коррозийной и агрессивной активности пород и подземных вод.

Количество разведочных выработок по трассе принимается в зависимости от местных условий. При простых условиях через каждые 200—500 м трассы закладывается одна выработка. Глубина выработок устанавливается, исходя из условия заглубления их на 1—2 м ниже отметок заложения трубопровода.

Лабораторные исследования проводятся для определения классификационных и прямых показателей свойств грунтов, развитых по трассе трубопровода и на переходах, а также для получения данных о степени агрессивности грунтовых вод.

В районах со сложными инженерно-геологическими условиями необходимо проведение дополнительных специальных исследований согласно требованиям СНиП II-А 13-69.

В оползневых районах в процессе проведения инженерно-геологической съемки трассы в масштабах 1 : 25 000—1 : 5000 (масштаб съемки устанавливается исходя из конструктивных особенностей трубопровода с учетом сложности инженерно-геологических условий) выявляют участки склонов с различной степенью опасности нарушения устойчивости и определяют мероприятия, обес-

печивающие устойчивость склона. В состав исследований входит: изучение тел имеющихся оползней; изучение свойств пород и режима подземных вод: наблюдения за подвижками оползня, а также расчеты устойчивости склона. Глубина разведочных выработок назначается в зависимости от мощности оползневого тела.

В карстовых районах при инженерно-геологической съемке, охватывающей площадь, позволяющую дать оценку всех геологических факторов на развитие карста, изучают морфологию и возраст карста; устанавливают возможность образования провалов или просадок; выявляют участки, наименее подверженные карстовым процессам; определяют мероприятия, обеспечивающие безопасность строительства и эксплуатации трубопровода; собирают сведения об опыте строительства и эксплуатации существующих сооружений.

Разведочные выработки по трассе закладывают, как правило, через 500—300 м, глубина их определяется программой и зависит от глубины распространения карста.

На основании всех результатов исследований оконтуривают участки трассы с различной степенью закарстованности, на которых: а) строительство запрещается; б) строительство разрешается без проведения специальных мероприятий; в) строительство разрешается после осуществления специальных мероприятий. Для обхода трассой наиболее закарстованных участков, требующих проведения особо сложных мероприятий, изыскивают новые участки трассы.

В районах развития многолетней мерзлоты проводят специальные мерзлотно-грунтовые исследования с целью установления: глубины сезонного промерзания и протаивания грунтов; глубины залегания и характера рельефа верхней поверхности многолетней мерзлоты; типа мерзлоты (сплошная, слоистая); состава и льдистости мерзлых пород; термического режима деятельного слоя; степени пучинистости пород деятельного слоя; сжимаемости мерзлых пород при оттаивании; наличия наледей, термокарстовых понижений и т. д.

Буровые работы проводят с применением специальных наконечников для разбуривания льда. Во избежание нарушения термического режима бурение с промывкой не применяется. Разведочные выработки по трассе задают в среднем через 300 м.

Кроме обычных инженерно-геологических свойств пород определяют тип криогенной текстуры грунтов, степень просадочности твердомерзлых и пластичномерзлых пород, а также плотность песчаных твердомерзлых и сыпучих мерзлых пород.

В районах развития просадочных грунтов устанавливают тип грунтовых условий, величину относительной просадочности при замачивании и мощность просадочных пород, но не глубже чем на 10—15 м (за исключением особых случаев). Устанавливают степень опасности просадочных процессов для проектируемого трубопровода и приводят рекомендации по проведению мероприятий, предупреждающих возникновение возможных деформаций при замачивании пород.

При проектировании трасс трубопроводов *в районах развития переработки берегов* морей, озер и водохранилищ в процессе инженерно-геологической съемки масштаба не менее 1 : 25 000 изучают процессы переработки берегов и подпора грунтовых вод, устанавливают зоны возможной активизации современных геологических процессов и обосновывают мероприятия по предохранению трассы трубопровода от вредного воздействия переработки берегов и подтопления грунтовыми водами.

В горных районах особое внимание должно быть уделено изучению современных геологических процессов: возможности возникновения селей, оползней, осыпей, обвалов, снежных лавин и мерзлотных явлений. Выявляют степень опасности этих процессов и оконтуривают возможные зоны их взаимодействия на трубопроводы (масштаб инженерно-геологической съемки в этих районах должен быть не меньше 1 : 50 000). Выявляют также наименее опасные участки для прокладки трубопровода, расположенные вне зоны динамического удара лавин, на прямолинейных и хорошо разработанных участках ущелей, где можно не опасаться образования заторов и изменения русел водотоков.

На заболоченных территориях изучают условия образования болота, устанавливают его тип, геологическое строение, состав и рельеф минерального дна; уточняют условия залегания грунтовых вод и характер питания болота; определяют химический состав грунтовых вод, физические свойства болотных образований, их ботанический состав, степень разложения; выясняют условия проходки траншеи для укладки трубопровода.

VI. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Инженерно-геологические изыскания воздушных линий электропередачи (ВЛ) проводят в одну или две стадии.

В одну стадию изыскиваются: ВЛ для электроснабжения колхозов и населенных пунктов в сельской местности; ВЛ напряжением 3—20 кв, а также ВЛ напряжением 35—500 кв, строительная стоимость которых не превышает установленных лимитов.

Изыскания всех остальных ВЛ, как правило, производятся в две стадии.

Состав и содержание инженерно-геологических исследований линий электропередач устанавливают в соответствии с общими положениями СНиП II-А.13-69, инструкцией по инженерным изысканиям для основных видов строительства (СН 210-62) и инструкциями по инженерным изысканиям для линейного строительства, включающим изыскания для линий напряжением 110 кв и выше (СН 234-62). Ведомственные наставления и указания по методике и технологии изыскательских работ применяют при условии, что они согласуются с требованиями, приведенными в указанных выше нормативных документах.

При двухстадийном проектировании на первой стадии изыскания выполняются в три этапа с целью: 1) выбора трассы ВЛ (первый этап); 2) обоснования проектирования расстановки опор и определения конструкций фундаментов на простых в инженерно-геологическом отношении участках трассы (второй этап); 3) обоснования проектирования опор на сложных и неблагоприятных в инженерно-геологическом отношении участках и на переходах через водные препятствия (третий этап).

На первом этапе производится сбор и изучение литературных, фондовых и архивных материалов района изысканий. На основе их в процессе камеральной обработки на карту района наносится проект проложения трассы. Проектом по возможности предусматривается обход территорий с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями и месторождений полезных ископаемых. Визуальная инженерно-геологическая рекогносцировка камерально разработанной трассы завершает работы первого этапа.

Основным видом работ *второго этапа* является маршрутная инженерно-геологическая съемка, которая производится в полосе шириной не менее 300 м в обе стороны от оси трассы. В местах с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями ширина полосы съемки может быть увеличена.

Глубина разведочных выработок назначается в зависимости от инженерно-геологических условий и конструкции подземной части проектируемых опор. Для свайных фундаментов выработки должны закладываться не менее чем на 3 м ниже острия сваи — для промежуточных опор и не менее чем на 4 м — для анкерных. Для винтовых свай глубина выработок должна быть не менее чем на 1 м ниже лопасти сваи. Для всех остальных типов фундаментов глубина выработок должна быть не менее 5 м (для промежуточных опор) и 7 м (для анкерных опор).

На участках развития слабых грунтов (торф, грунты текучей консистенции и т. п.) выработки заглубляются в подстилающие грунты не менее чем на 2 м.

В процессе проходки выработок производится отбор образцов грунта и проб грунтовых вод для лабораторных исследований с целью установления классификационных и расчетных показателей физико-механических свойств грунтов и химического состава подземных вод.

На третьем этапе при изысканиях под опоры осуществляется проходка дополнительных выработок из расчета 2 выработки на 1 км трассы.

Часть выработок может быть заменена зондировочными скважинами (статического и динамического зондирования). При изысканиях на сложных участках статическое зондирование производится в пределах площадки каждой опоры со свайными фундаментами.

На переходах через препятствия количество и глубина выработок определяются в зависимости от инженерно-геологических условий с учетом конструкции и глубины заложения фундаментов.

На второй стадии изыскания выполняются с целью уточнения ранее выделенных инженерно-геологических элементов и показателей физико-механических свойств грунтов.

Дополнительные выработки проходятся на углах поворота трассы и на пересечении трассой инженерных сооружений. Широко используется статическое и динамическое зондирование для получения характеристик физико-механических свойств грунтов и для уточнения инженерно-геологического разреза.

В состав одностадийных инженерно-геологических изысканий (для ВЛ 35 кв и выше) входят все виды работ, выполняемые при двухстадийном проектировании.

При изысканиях ВЛ 3—20 кв инженерно-геологическая разведка производится лишь в местах установки опор на ответственных переходах через естественные и искусственные препятствия. При сложных инженерно-геологических условиях (III категория сложности) проходятся 2—3 выработки на 1 км трассы. Глубина выработок в этом случае обычно принимается равной 4—5 м.

В районах со сложными инженерно-геологическими условиями — с развитием карстовых, сейсмических и оползневых процессов, в горных и заболоченных районах, в районах развития многолетней мерзлоты — проводятся дополнительные исследования по специальным программам.

В процессе исследований особое внимание уделяют установлению причин возникновения и развития неблагоприятных физико-геологических явлений и определению пригодности исследуемой территории для строительства; приводят рекомендации по проведению мероприятий, предотвращающих или ограничивающих эти явления.

VII. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭРОДРОМОВ

Инженерно-геологические изыскания для строительства аэродромов с искусственным покрытием выполняются в две стадии.

Изыскания на первой стадии проводятся с целью: 1) исследования намечаемых вариантов расположения аэродрома; 2) исследования выбранного варианта расположения аэродрома.

На второй стадии выполняются исследования под отдельные сооружения аэродрома.

Инженерно-геологические изыскания на первой стадии включают подготовительный, полевой и камеральный периоды.

В течение подготовительного периода осуществляется: ознакомление с архивными и литературными материалами, характеризующими климат района, его геоморфологию, геологическое строение, гидрогеологию, гидрографическую сеть, современные геологические явления, растительность и почвы; изучение местного опыта строительства наземных и подземных сооружений; выяснение обеспеченности карьерными строительными материалами.

В соответствии с действующими нормативными документами (СНиП II-А.13-69 и др.), на основе результатов работ подготовительного периода и материалов выбора участка составляется программа на производство инженерно-геологических исследований.

В полевой период выполняются: инженерно-геологическая, почвенная и геоботаническая съемки; проходка горных выработок и их опробование; статическое и динамическое зондирование; агротехнические и гидрогеологические исследования; изыскание резервов грунта и сбор данных по карьерным строительным материалам; исследования почвенной коррозии, возбуждаемой блуждающими токами, и др.

Инженерно-геологическая, почвенная и геоботаническая съемки проводятся обычно в масштабе 1 : 10 000. Карты в этом случае составляются на топооснове масштаба 1 : 5000. Объем съемки определяется в зависимости от класса и конфигурации элементов аэродрома.

В процессе съемки особое внимание уделяется картированию оврагов. Выясняют геологические условия, наличие и причины возникновения размыва и способы укрепления оврагов. По результатам этих исследований определяют возможность и условия сброса в овраги атмосферных вод с аэродрома, а также приводят рекомендации по проведению необходимых мероприятий, препятствующих размыву оврагов.

Разведочные выработки закладываются на летных полосах с учетом рельефа, микрорельефа, мест предполагаемых выемок и насыпей, мест смены растительного и почвенного покрова. При простых инженерно-геологических условиях выработки размещают ориентировочно по сетке 200 × 200 м, при сложных условиях — выработки сгущаются. Выработки проходят до глубины 2,5—3,5 м (от проектной поверхности), часть выработок углубляется до 6—10 м. На летных полосах с искусственным покрытием проходят выработки по оси полос и по обочинам на расстоянии до 5 м от обеих бровок; их задают через 200 м в шахматном порядке.

Широко используется статическое и динамическое зондирование. Количество технических выработок, из которых отбираются пробы грунта и грунтовых вод, должно составлять не менее 20—30% от общего числа пройденных шурфов и скважин. Наиболее детально опробуются грунты, оказывающие решающее влияние не несущую способность и устойчивость аэродромного покрытия. Количество проб грунта должно быть достаточным для нахождения расчетных показателей.

Геоботанические исследования включают изучение травяной растительности (выявление наиболее выносливых и устойчивых дернообразующих и бобовых трав), а также описание растительности и дернины, развитых около каждой разведочной выработки на площади 10 × 10 м и в характерных местах исследуемого участка.

Для обеспечения проектируемого аэродрома местными строительными материалами в пределах карьера на глубину его отработки закладываются разведочные выработки по сетке 50 × 50 — 100 × 100 м. Пробы отбираются из расчета 1 проба на 8—10 тыс. м³ грунта.

В камеральный период обрабатываются материалы полевых и лабораторных исследований и составляется отчет об инженерно-геологических изысканиях для строительства аэродрома. К нему прилагаются инженерно-геологическая, почвенная, геоботаническая, гидрогеологическая карта и карта расположения карьеров и резервов грунта; литологические профили по осям летних полос; колонки (или описания) шурфов и скважин; графики статического и динамического зондирования; результаты лабораторных исследований грунтов и воды.

Изыскания на второй стадии проводятся в объеме, обеспечивающем проектирование аэродромных сооружений по принятому варианту планировки сооружений и их конструктивному выполнению; они дополняют материалы ранее приведенных инженерно-геологических изысканий, детализируют и уточняют их.

В процессе инженерно-геологической разведки проводятся дополнительные работы по трассам нагорных канав, дренажей, отводу поверхностных вод. Глубина выработок по трассам устанавливается, исходя из принятых конструктивных решений по проектируемым сооружениям; расстояние между выработками обычно составляет 200—300 м.

Для решения вопроса о дренаже площадки проводятся дополнительные работы по определению коэффициента фильтрации грунтов и установлению направления грунтового потока, а также по определению направления грунтового потока и химизма грунтовых вод, их агрессивности по отношению к бетону и металлу.

В камеральный период производится обработка материалов полевых и лабораторных исследований и составляется заключение (отчет) об инженерно-геологических условиях площадки изысканий.

При производстве изысканий для строительства аэродромов в сложных природных условиях проводятся дополнительные работы.

В районах распространения просадочных грунтов в процессе изысканий *дополнительно выясняются следующие вопросы: распространение, тип грунтовых* условий по просадочности и мощность просадочных грунтов, величина относительной просадочности при замачивании от действия собственного веса грунта. На инженерно-геологической карте наносятся границы просадочных грунтов с подразделением их по интенсивности просадочных явлений.

На заболоченных и заторфованных территориях производится зондировка по сетке 30 × 30 — 40 × 40 м в пределах размещения сооружений различного назначения и по более редкой сетке на остальной территории аэродрома и его периферии. Устанавливаются тип болота, причины образования и источник его водного питания; даются рекомендации по осушению и сбросу дренажных вод; составляется карта мощности торфов.

В районах развития засоленных грунтов увеличивается количество шурфов и густота их расположения. В шурфах отбор проб на водные и соляно-кислые вытяжки производится через каждые 0,2—0,4 м (до глубины 1,5 м), далее пробы отбираются через 0,5 м (до уровня грунтовых вод). Определяются вид, степень и глубина засоления, характер водного режима грунта и соленакопления.

На инженерно-геологической карте наносятся границы распространения засоленных грунтов с подразделением их по виду и степени засоления, приводятся рекомендации по использованию этих грунтов при строительстве аэродромов.

Дополнительные инженерно-геологические изыскания в районах распространения многолетнемерзлых грунтов включают: подготовительные работы, мерзлотную съемку, разведочные работы и термометрические наблюдения.

В процессе подготовительных работ производится сбор климатических данных, материалов по распространению мерзлых пород, температурному режиму грунтов и мерзлотным процессам, а также сведений о глубине сезонного оттаивания грунтов.

В результате проведения мерзлотной съемки составляются карты в масштабе 1 : 5000 (по основной площадке) и 1 : 2000 (по площадке радиообъектов).

Разведочные выработки закладываются обычно по створам, располагаемым на расстоянии 200 м друг от друга. На каждом створе проходится не менее 3 скважин. При наличии в мерзлой толще подземных льдов скважины размещаются в шахматном порядке. На площадках радиообъектов скважины размещаются по сетке 50 × 50—100 × 100 м. После окончания исследований все выработки тщательно засыпаются талым грунтом с утрамбовкой.

Термометрическое наблюдение проводится в течении всего периода изысканий. На участках размещения наиболее ответственных зданий и сооружений закладывается не менее 3 термометрических скважин глубиной 10 м и более. Наблюдения за глубиной сезонного оттаивания грунтов включают отбор проб мерзлых и талых грунтов для лабораторных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология и плотины. Т. III. Под ред. А. А. Борового. М., Госэнергоиздат, 1963, 207 с.

2. Гвоздецкий Н. А. Карст. М., Географиздат, 1954, 351 с.

3. Нейштадт Л. И., Пирогов И. А. Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. М., «Энергия», 1969, 103 с.

4. Северьянов Н. Н., Агалина М. С. Справочник по инженерным изысканиям для строительства. М., Углетехиздат, 1968, 300 с.

Глава восьмая

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ

I. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ ПОЧВ И ГОРНЫХ ПОРОД, ФОРМИРОВАНИЯ И РЕЖИМА МЕРЗЛЫХ СЛОЕВ И ТОЛЩ

Сезонное и многолетнее промерзание и оттаивание земной коры, формирование и режим слоев и толщ мерзлых почв и горных пород относятся к наиболее сложным и важным геотеплофизическим процессам. Их изучением занимается геокриология.

Исчерпывающее определение геокриологии как науки дано, в частности, в книге «Основы геокриологии (мерзлотоведения)».

Промерзание и оттаивание земной коры, формирование и режим (развитие) слоев и толщ мерзлых пород определяются, в геотеплофизическом смысле, краевыми условиями на верхней и нижней поверхностях промерзающих, мерзлых и протаивающих слоев и толщ. Но сами краевые условия отражают влияние трех основных видов условий: 1) литолого-петрографического, т. е. состава, строения, сложения и свойств слоев и толщ горных пород данного участка; 2) морфологического — положения участка в мезорельефе и относительно морских бассейнов, т. е. высоты (абсолютной и относительной), угла и ориентировки наклона поверхности, связи с водоемом и водотоком; 3) зонально-поясного энергетического баланса деятельного слоя и режима погоды (климата).

Что касается *климата* (*микроклимата*), *почвы*, *растительного* и *снежного* покровов и других местных условий на данном участке суши (элементов микроландшафта), то их особенности соответствуют определенным сочетаниям названных выше трех видов факторов.

Три *главных условия*, *определяющих развитие* водо- и теплообменных процессов в земной коре и состояние ее верхнего яруса, можно выразить не только качественно (в соответствии с аксиомой Докучаева, Ячевского и Каменского), но и, что особенно важно, количественно. Тогда они представляются своеобразными *параметрами*, имеющими хотя и приближенные, но все же достаточно определенные числовые значения. Их можно использовать при вычислении теплового баланса почвенно-грунтового комплекса.

Так, например, литолого-петрографические особенности можно свести к величинам тепло- и водопроводимости яруса земной коры с годовыми теплооборотами (ЯГТО). Эти величины указывают на то, какие количества тепла переносятся теплопроводностью и привносятся в литосферу от поверхностных источников тепла и воды. Зная азимут и угол наклона поверхности участка, нетрудно определить различие в продолжительности облучения и угле падения солнечных лучей к деятельному слою по сравнению с горизонтальной поверхностью данной полосы широт (или данного высотного пояса). Та и другая величины необходимы наряду с альбедо поверхности для вычисления суммы поглощенной радиации. Количественное выражение зонального и поясного условия обычно: оно заключается в указании широты и высоты местности. То же самое можно сказать о ко-

личественном выражении особенностей расположения данного участка суши относительно моря, озер и рек.

Сезонномерзлым или сезоннопромерзающим слоем (СМС) называют поверхностный слой земной коры, промерзающий в холодный сезон года и всегда подстилаемый немерзлой почвой или горной породой. Толщина СМС ($h_м$) при прочих равных условиях меньше глубины $h_т$, до которой мерзлая почва и горные породы могли бы протаять, если бы СМС подстилался всегда мерзлыми породами, или в переходных полосах (у южной и нижней границ многолетней криолитозоны) равна ей, т. е. $h_м \leqslant h_т$.

Сезонноталым или сезоннопротаивающим слоем (СТС) называют слой почвы и горных пород, протаивающий в теплый сезон года, ограниченный снизу всегда мерзлой (многолетнемерзлой) подпочвой. При одинаковых поверхностных и почвенно-литологических условиях толщина СТС ($h_т$) меньше глубины, до которой может промерзнуть талая почва $h_м$, если бы СТС подстилался постоянно талыми породами, или в переходных полосах (у южной и нижней границ зоны многолетней криолитозоны) равна ей, т. е. $h_т \leqslant h_м$.

Многолетней криолитозоной, или мерзлой зоной литосферы, называют внутриземную часть криосферы, состоящую из «беспрестанно мерзлых слоев земной коры» (по А. Ф. Миддендорфу).

Толщами мерзлых горных пород (ТМГП) называются толщи или системы разобщенных массивов («островов») горных пород, находящихся в мерзлом состоянии в течение 5 лет и более. ТМГП характеризуются водоупорными и газонепроницаемыми свойствами в отличие от сезоннопромерзающих слоев.

Мерзлые толщи определяют большое своеобразие всех физико- и инженерно-геологических процессов и явлений — большую заболоченность территории, быстрый сток поверхностных вод, высокие паводки, быстрое проявление эрозии и абразии, обрывистость подмываемых берегов и т. п.

Деятельным, или контактным, слоем (по А. И. Воейкову) называют слой почвы (в случае отсутствия растительности) или самую верхнюю часть почвенного разреза с растительным покровом, наиболее сильно нагреваемую солнечными лучами и приземным воздухом и излучающую, а также конвективно отдающую тепло в атмосферу.

Годовым теплооборотом почвы и подстилающих ее горных пород или верхней толщи водоемов с переменными в году температурами называют (по М. М. Крылову) приход тепла в этот ярус земной коры сверху или расход тепла из него вверх за годовой период.

Ярусом земной коры с годовыми теплооборотами (ЯГТО) или с переменными в году температурами называют почвенно-грунтовый комплекс, в который сверху поступает тепло и уходит из него вверх за годовой период.

Тепловым балансом деятельного (контактного) слоя или подстилающей поверхности называется равная нулю алгебраическая сумма основных поступлений и затрат тепловой энергии за данный отрезок времени:

$$R + LE + P - A = 0, \qquad (1)$$

где R — сумма потоков радиационного тепла на уровне подстилающей поверхности;

LE — сумма произведений скрытой теплоты испарения или конденсации на количество испарившейся или сконденсировавшейся воды;

P — сумма конвективных (турбулентных) потоков тепла между деятельным слоем и атмосферой;

A — сумма потоков тепла между подстилающей поверхностью и слоями почвы и горных пород.

В метеорологии допускается и рационально используется равенство

$$-LE-P+A=R. \tag{2}$$

Как известно,

$$R=(Q+q)(1-\alpha)-I, \tag{3}$$

где Q — сумма потоков прямой радиации;
q — сумма потоков рассеянной радиации;
α — альбедо;
I — эффективное излучение, разность сумм потоков собственного излучения деятельного слоя и противоизлучения атмосферы.

Для расчетов глубины сезонного промерзания и средней годовой температуры почвы и горных пород в слое с годовыми теплооборотами используется закономерное соответствие между температурой приземного воздуха и почвенно-грунтовых горизонтов. Исходя из уравнения теплового баланса деятельного слоя, связь средней годовой температуры воздуха и почвы можно выразить так:

$$t_{\text{п}}=t_{\text{в}}+\frac{R-LE+A}{\alpha}, \tag{4}$$

где $t_{\text{п}}$ — температура поверхности почвы;
$t_{\text{в}}$ — температура воздуха;
R — радиационный баланс;
LE — сумма величин теплоиспарения и конденсации;
A — теплоприход в почву или теплопотери почвы;
α — коэффициент конвективного теплообмена.

Температура поверхности почвы при периодическом ее ходе (суточном, годовом) представляется гармонической функцией времени, т. е.

$$t_{\text{п}}=A_0 \sin(\omega\tau+\varphi), \tag{5}$$

где A_0 — амплитуда колебаний температуры на поверхности;
$\omega=\frac{2\pi}{\tau}$ — угловая скорость (частота) колебаний;
τ — время, для которого определяется температура;
φ — начальная фаза колебаний.

При допущении постоянства коэффициента температуропроводности почвы и горных пород α по глубине, амплитуда колебаний температуры A на заданной глубине z будет равна:

$$A_z=A_0 e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{aT}}}, \tag{6}$$

где T — период температурной волны.

Эта зависимость получена на основе формулы (5) путем решения уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}=Q\frac{\partial^2 t}{\partial z},$$

где t — температура; остальные величины объяснены выше.

Разность между средними годовыми температурами почвы и воздуха $S_z = t_{\text{п}} - t_{\text{в}}$ выражается следующей эмпирической зависимостью (по В. В. Кудрявцеву):

$$S_z=\frac{A_{\text{см}}}{2}\left(1-\frac{1}{f}\right), \tag{7}$$

где $A_{см}$ — годовая метеорологическая амплитуда средних месячных температур воздуха, а

$$f = e^{h\sqrt{\frac{\pi}{aT}}},$$

где h — высота снежного покрова.

Из двух выражений разности между средними годовыми температурами почвы и воздуха получается

$$t_п = t_в + \frac{A_{см}}{2}\left(1 - \frac{1}{f}\right).$$

После введения поправки на изменение средней годовой температуры воздуха по мере изменения высоты среднюю годовую температуру почвы приближенно определяют по следующей формуле:

$$t_п = t_в + H\,\Delta t + \frac{A_{см}}{2}\left(1 - \frac{1}{f}\right), \qquad (8)$$

где $t_в$ — среднегодовая температура воздуха на уровне моря;

H — высота местности;

Δt — изменение температуры воздуха с увеличением высоты $\left(\frac{1}{273}\text{ град/м}\right)$.

Значения $\left(1-\frac{1}{f}\right)$ приведены в табл. 114.

Формирование толщ многолетнемерзлых пород начинается и происходит при средних годовых температурах почвы ниже 0° (на глубине около 1 м).

Таблица 114

Значение величины $\left(1-\frac{1}{f}\right)$ в зависимости от высоты h, плотности P и коэффициента температуропроводности a снежного покрова

Плотность снежного покрова, P	Коэффициент температуропроводности a	Высота снежного покрова, м									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,075	0,0010	0,094	0,181	0,259	0,329	0,398	0,451	0,503	0,551	0,597	0,632
0,110	0,0015	0,081	0,155	0,224	0,288	0,345	0,400	0,447	0,491	0,532	0,572
0,150	0,0020	0,071	0,136	0,197	0,253	0,306	0,355	0,400	0,442	0,482	0,518
0,190	0,0025	0,064	0,123	0,178	0,230	0,279	0,324	0,367	0,407	0,445	0,480
0,225	0,0030	0,058	0,113	0,164	0,213	0,259	0,302	0,343	0,381	0,416	0,450
0,250	0,0035	0,054	0,105	0,153	0,198	0,242	0,282	0,321	0,357	0,392	0,425
0,300	0,0040	0,051	0,098	0,143	0,186	0,227	0,267	0,303	0,338	0,371	0,403
0,340	0,0045	0,048	0,093	0,136	0,178	0,216	0,254	0,289	0,323	0,356	0,386
0,380	0,0050	0,045	0,088	0,130	0,169	0,206	0,242	0,277	0,309	0,341	0,371
0,415	0,0055	0,043	0,081	0,124	0,161	0,197	0,232	0,265	0,297	0,327	0,356

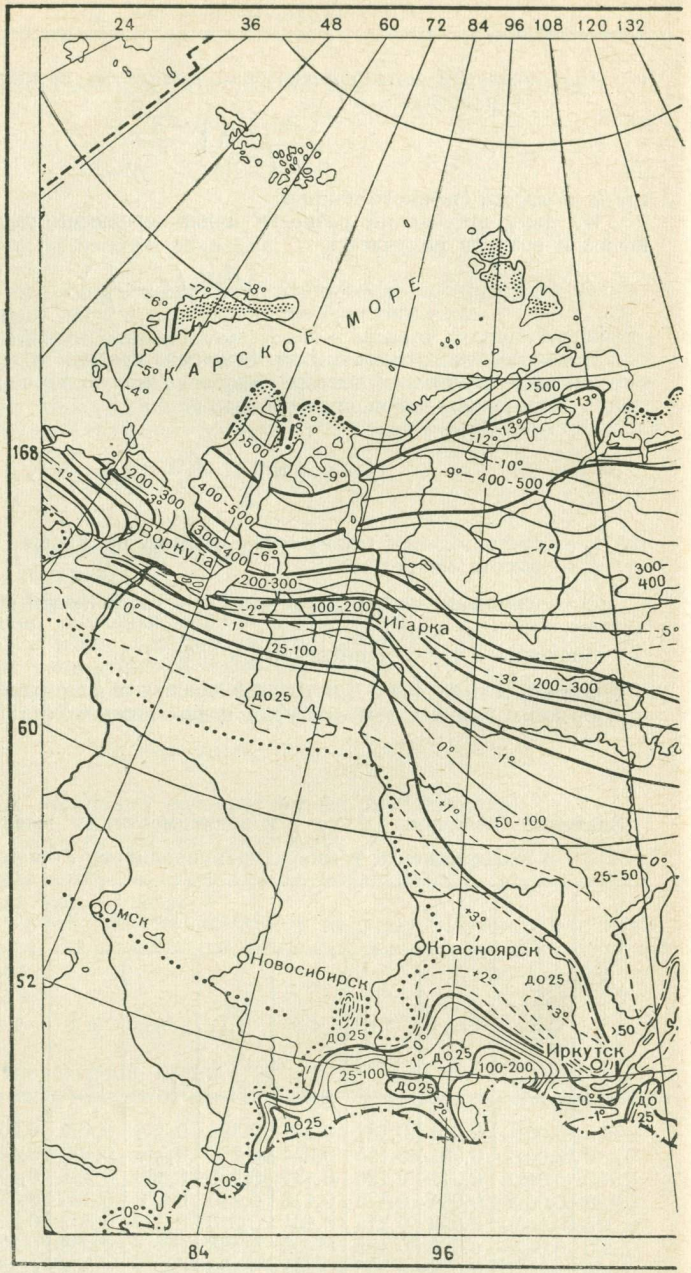
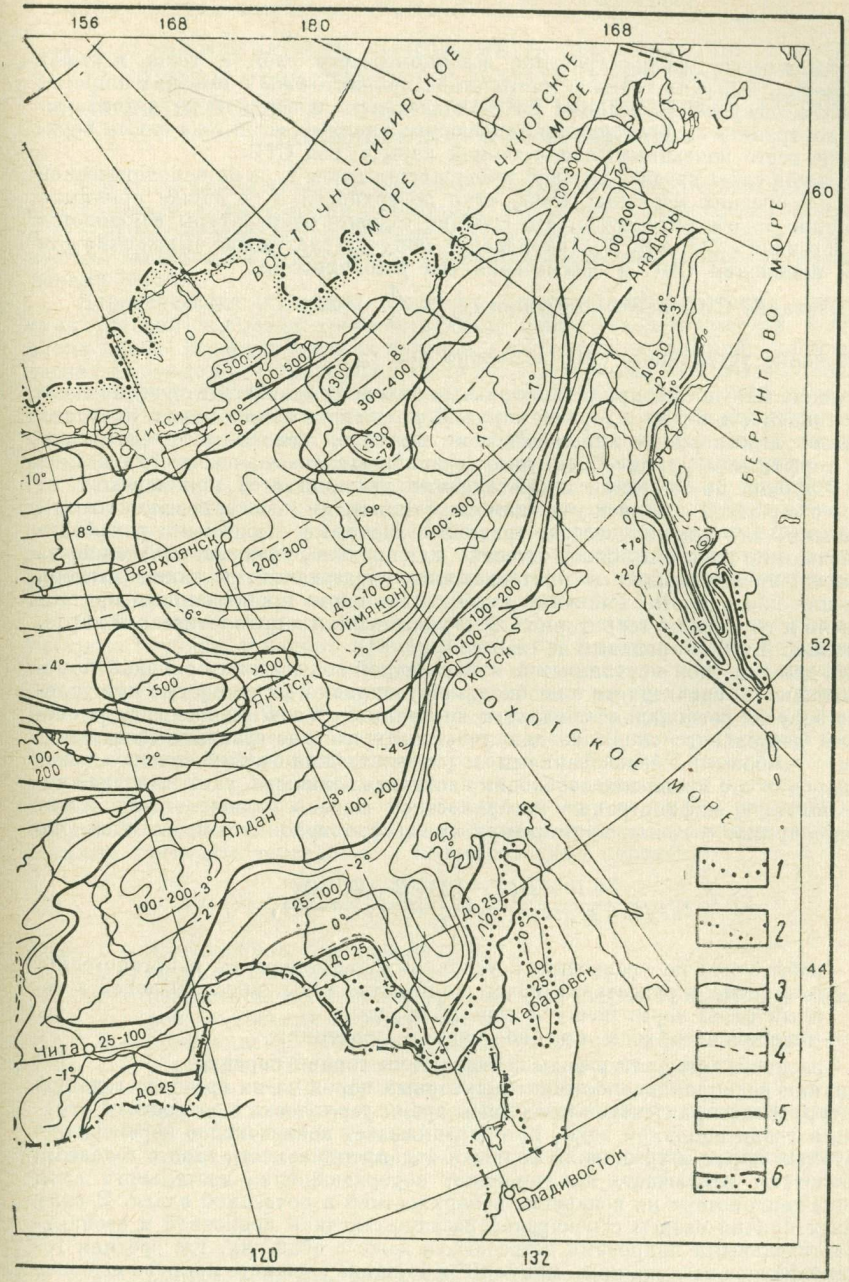


Рис. 81. Схематическая карта распространения многолетнемерзлых пород в СССР. (Составил И. Я. Баранов)

1 — граница территории с многолетнемерзлыми породами; *2* — гра у подошвы слоя с годовыми теплооборотами (в горных районах по ных условиях; *5* — максимальная мощность толщ многолетнемерзлых ница зоны с частыми перелетками; *3* — минимальная температура горных пород казана для долин); *4* — изотермы почвы на глубине 1—2 м в естественных характер-пород (в м); *6* — зона многолетнемерзлых пород под арктическими морями



Географическое распространение сезонномерзлого слоя и толщ мерзлых горных пород. Верхняя граница многолетней криолитозоны в высоких широтах на склонах северной экспозиции почти совпадает с поверхностью литосферы. Обычно эта граница залегает под протаивающим в теплый сезон года самым верхним, чаще всего почвенным, слоем земной коры — под СТС.

Учитывая связь средней годовой температуры почвы $t_{ср}$ с метеорологической амплитудой средних месячных температур поверхности A, а также принимая во внимание то обстоятельство, что средние годовые температуры изменяются из года в год на $\pm 2°$ (по В. А. Кудрявцеву), получим следующие выражения для условий появления СМС и обеспечения его устойчивости:

образование СМС невозможно при $t_{ср} > \frac{A}{2} + 2$,

существование устойчивого СМС возможно при $t_{ср} < \frac{A}{2} - 2$.

Толщина СМС и СТС при прочих равных условиях возрастает с увеличением водопроницаемости почвы и горных пород. В ряду видов почв и пород, имеющих наибольшее инженерно-геокриологическое значение, конечными членами являются торфяные и крупнообломочные (гравийно-галечные, щебнистые и глыбовые). Глубина промерзания и протаивания увеличивается при переходе от участков с торфяной почвой к участкам с суглинистыми (пылевато-глинистыми), супесчаными, песчаными, песчано-гравийно-галечными, галечными и щебенистыми почвами и грунтами. Соответственно, как правило, уменьшается влажность (льдистость) промерзающих и протаивающих образований, а также степень увлажнения поверхности. Типичные глубины сезонного промерзания и протаивания почв и грунтов на территории СССР указаны на геокриологической карте, составленной И. Я. Барановым в 1956 г. (рис. 81).

Если для участков с суглинистой и супесчаной почвой и материнской породой уравнение (4) справедливо с необходимой геокриологам точностью при условии, что берутся регионально-зональные значения E, B и R (зависящего от особенностей деятельного слоя), то для участков с песчано-гравийно-галечными, щебенчато-глыбовыми образованиями и сильнотрещиноватым элювием скальных пород в это уравнение необходимо добавить величины, учитывающие аномально большую инфильтрацию поверхностной воды в весенне-летний сезон. Тогда оно примет «оттенок протаивания при инфильтрации» и будет примерно таким:

$$t_п = t_в + \frac{R - L(E - V) - B + VC_P \Delta t}{\alpha}, \qquad (9)$$

где V — избыточное по сравнению с условиями инфильтрации в органогенно-глинистые и супесчаные почвы количество воды, просочившейся в теплый сезон через почву и горные породы;

C_P — теплоемкость воды при постоянном давлении;

Δt — разность температур воды и почвы или горной породы.

Влиянию водопроницаемости почвы и горных пород на их среднюю годовую температуру благоприятствует в весеннее время термически плотностная стратификация гравитационной воды, которая вызывает конвективное перемещение ее в крупных порах и трещинах. Большая водопроницаемость слоя с годовыми теплооборотами исключает, как правило, переувлажнение деятельного слоя и большие теплопотери на испарение поверхностной и почвенной влаги. В силу указанных причин оазисы с немерзлой песчано-галечной подпочвой и азональными растительными покровами встречаются даже в областях, где средняя годовая температура воздуха ниже минус 10° и толщина снежного покрова не более 50 см. Разница между средней годовой температурой торфяной (или торфяно-глинистой) и песчаной почв в пределах участка, однородного по другим признакам, обычно составляет 2—3°.

II. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ (ОСНОВЫ РАСЧЕТА) ПРОЦЕССОВ ПРОМЕРЗАНИЯ И ПРОТАИВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННО ИЗМЕНЕННЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА С АТМОСФЕРОЙ

Тепловой режим пород определяется комплексом взаимосвязанных природных факторов: 1) внутренних — составом, строением и свойствами самой породы и 2) внешних — метеорологическими условиями, снежным покровом, растительностью, экспозицией поверхности, условиями энерго-массообмена с глубинными зонами Земли.

Периодические (суточные, сезонные, многолетние) колебания климатических условий вызывают соответствующие изменения температуры в верхних слоях пород. В зависимости от периода и амплитуды колебаний климатологических элементов различают: 1) слой пород с суточными изменениями толщиной обычно 0,3—1,0 м; 2) слой с годовыми изменениями мощностью 10—30 м; 3) слой с многолетними колебаниями мощностью в несколько десятков и сотни метров. Считается, что колебания затухают на глубине, где их имплитуда становится меньше 0,1°, т. е. не может быть обнаружена обычными термометрами.

Существенное, а в ряде случаев определяющее влияние на тепловой режим пород оказывает хозяйственная деятельность человека при строительстве сооружений, вырубке лесов и распашке земель, осуществлении мелиоративных и водохозяйственных мероприятий и т. д. Радиус теплового влияния различных хозяйственных устройств может составлять от нескольких метров (отдельно стоящий дом) до десятков и сотен метров (поселки и города).

Сезонное промерзание и протаивание пород. Для прогноза глубины сезонного промерзания — протаивания почв и пород предложено большое количество эмпирических, полуэмпирических и приближенных аналитических формул. Большинство их основано на предпосылке о кондуктивной передаче тепла в полуограниченном двухслойном пространстве с подвижной границей раздела слоев. Условия теплоотдачи с поверхности задаются периодической функцией в форме граничных условий I, II или III рода.

Формула В. С. Лукьянова является наиболее полной. Он позволяет рассчитывать глубину промерзания — протаивания почв и пород при различных условиях на поверхности, в том числе под дорожными и аэродромными покрытиями, а также учитывать теплообмен с подстилающими породами:

$$\tau = \left(L + \frac{c\,\Delta\theta}{2}\right)\left(\frac{\lambda\,\Delta\theta}{q^2}\ln\frac{\lambda\,\Delta\theta - qS}{\lambda\,\Delta\theta - q\,(h+S)} - \frac{h}{q}\right), \qquad (1)$$

здесь τ — длительность промерзания, ч;

h — глубина промерзания, м;

$\Delta\theta$ — разность между температурой воздуха над поверхностью и температурой замерзания поровой влаги;

λ — коэффициент теплопроводности мерзлой породы, ккал/м·ч·град;

c — объемная теплоемкость мерзлой породы, ккал/м³·град;

L — скрытая теплота кристаллизации воды, ккал/м³;

q — тепловой поток, направленный из нижележащих слоев породы к фронту промерзания, ккал/м²·ч;

S — приведенная толщина слоя тепловой изоляции поверхности, выраженная через фиктивную толщину слоя породы, см:

$$S = \frac{\lambda_{из}}{\lambda} S_{из},$$

λ — коэффициент теплопроводности изоляционного покрытия, ккал/м ч, град;

$S_{из}$ — действительная толщина слоя изоляции, см.

Для облегчения расчетов можно пользоваться номограммой, изображенной на рис. 82. Вычислив

$$A=\frac{qS}{\lambda\,\Delta\theta};\quad B=\frac{\lambda\,\Delta\theta}{q^2}\cdot\frac{\tau}{L+\frac{c\,\Delta\theta}{2}},$$

находят по номограмме H и затем определяют искомую глубину промерзания

$$h=HS.$$

При недостатке исходных данных для расчета по формуле (1) можно по результатам многолетних метеорологических наблюдений и специальных сезонных

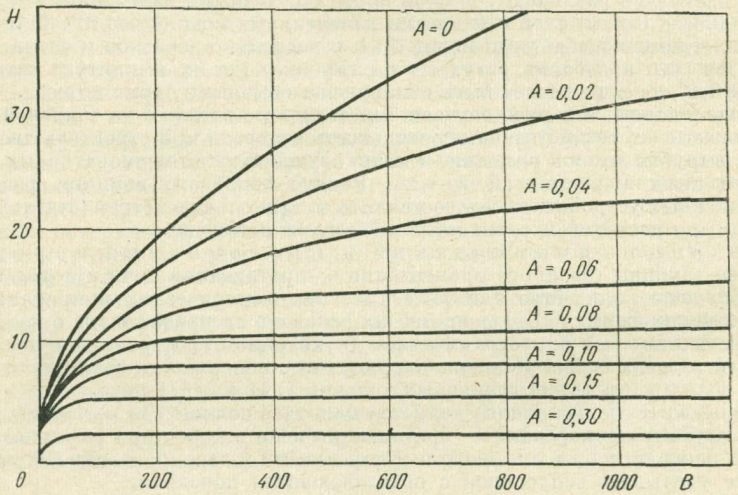


Рис. 82. Номограмма для расчета глубины сезонного промерзания — протаивания

наблюдений на данной площадке определить для нее наибольшую (расчетную) глубину промерзания — протаивания:

$$h_{\text{расч}}=h_{\text{д}}\sqrt{\frac{\sum\theta_{max}}{\sum\theta_{\text{д}}}},$$

где $h_{\text{д}}$ — глубина промерзания — протаивания, измеренная на осушенной площадке с оголенной поверхностью за данную зиму (лето);

$\Sigma\theta_{\text{д}}$ — сумма отрицательных (положительных) среднемесячных температур за данную зиму (лето);

$\Sigma\theta_{max}$ — то же, за наиболее суровую зиму (жаркое лето) по наблюдениям за ряд лет (не менее 10).

Одной из наиболее простых является следующая формула прогноза промерзания — протаивания пород:

$$h=h_0+\sqrt{\frac{2\lambda\,\Delta\theta\tau}{LW_a}},$$

где h_0 — глубина промерзания (протаивания) на начальный момент расчета;
W_a — количество в породе термоактивной (замерзающей — оттаивающей в течение сезона) влаги.

Предельное протаивание оснований сооружений. Глубину наибольшего протаивания под центром сооружения, имеющего прямоугольное очертание в плане (длинная сторона $2b$, короткая $2a$), вычисляют (без учета конвективной составляющей теплообмена в грунте) по формулам:

1) при $\frac{b}{a} < 2$ по формуле трехмерной задачи:

$$\frac{h_{пр}}{a} = \sqrt{\sqrt{n^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi}{2} q_1 + \frac{1}{4}(1+n^2)^2} - \frac{1}{2}(1+n^2)},$$

где $n = \frac{b}{a}$ — отношение сторон здания в плане;

$$q_1 = \frac{\lambda_т \theta_0}{\lambda_м \theta_0 - \lambda_т \theta_п};$$

$\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности мерзлых грунтов;
$\lambda_т$ — то же талых грунтов;
$\theta_п$ — температура поверхности грунта под сооружением;
θ_0 — то же за пределами контура сооружения.

2) при $\frac{b}{a} \geqslant 2$ по формуле двухмерной задачи

$$\frac{h_{пр.}}{a} = \operatorname{ctg} \frac{\pi}{2} q_1.$$

III. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ, МЕРЗЛЫХ И ПРОТАИВАЮЩИХ ПОРОДАХ И КРИОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Криогенными физико-геологическими процессами называются лито-морфогенетические изменения, сопутствующие физическим и физико-механическим процессам в промерзающих, протаивающих и мерзлых породах, при изменениях температуры и переходах ее через точку плавления льда.

Криогенными физико-геологическими явлениями называются свойства толщи горных пород, новообразования в ней, а также формы мезо- и микрорельефа, обусловленные формированием и таянием подземного или поверхностного льда, возникшего за счет подземных вод.

Общим процессом, определяющим криогенные особенности толщи горных пород и сопутствующие им специфические образования, является их энерго-массообмен с внешней средой (атмосферой и космосом) при температуре не выше 0°. Этот обмен можно представить как гармонически колебательный процесс. Полная энергия его ε пропорциональна эффективной теплоемкости $C_э$, квадрату амплитуды A и квадрату частоты температурных колебаний ν, т. е.

$$\varepsilon = C_э (\pi \cdot A \cdot \nu)^2.$$

Таким образом, наиболее энергоемкой и работоспособной частью толщи с годовыми колебаниями температуры является СТС и СМ. Теплооборот его достигает 3/4 всего количества тепла, поступающего в толщу горных пород за год.

Видоизменения проходящей через толщу пород энергии выражаются в форме сложной системы процессов. Основные превращения заключаются в проявлении

класса специфических первичных физико-геологических процессов: 1) изменений температуры массивов пород; 2) фазовых переходов вода — лед.

Именно эти процессы определяют ряд элементарных криогенных процессов: 1) термоградиентную миграцию влаги; 2) физико-химические превращения скелета пород.

Различные ассоциации элементарных процессов составляют виды сложных криогенных процессов: 1) образование форм подземного льда; 2) криогенное пучение; 3) криогенное растрескивание; 4) термокарст; 5) солифлюкция; 5) криогенная сортировка материала; 7) наледеобразование.

Разновидности сочетания криогенных и некриогенных физико-геологических процессов определяют все специфические свойства толщи мерзлых пород и сопутствующие ей многочисленные комплексные явления: 1) формирование самой толщи мерзлых пород; 2) сингенетическое и эпигенетическое строение этой толщи; 3) формирование таликов; 4) выветривание пород; 5) термоэрозия и термоабразия; 6) развевание и перенос ветром морозных и протаявших пород и т. д.

Первичные физико-геологические процессы в промерзающих и протаивающих породах. Изменения температуры подпочвы взаимосвязаны с колебаниями региональных климатических и видоизменениями местных условий теплообмена. Колебания представляют систему наложенных периодов различной продолжительности. Им свойственны следующие важные закономерности:

1. Наибольшие амплитуды годовых температур. В континентальных районах Сибири на поверхности они местами превышают 50°. По мере увеличения числа лент в периоде амплитуда колебания температуры сокращается. Историко-геологические колебания равняются нескольким единицам градусов.

2. Глубина, до которой наблюдаются колебания температуры пород, возрастает с увеличением длительности их периода.

Изменение местных условий тепло-водообмена происходит главным образом при развитии рельефа, его расчленении и выполаживании, динамике растительного и снежного покровов и др. Особенно большие преобразования подобного рода вызываются хозяйственной деятельностью человека.

Температура горных пород в основании яруса их годовых колебаний обычно равняется среднегодовой температуре по всему разрезу яруса. С глубиной температура пород в соответствии с геотермическим градиентом повышается.

Фазовые переходы вода — лед в породах сразу меняют многие геофизические и геохимические параметры — прочностные, гидрогеологические, электрические, тепловые, сейсмические и др. Возникновение кристаллов льда в породе увеличивает количество твердых частиц по отношению к кратковременным нагрузкам. Лед, кроме того, цементирует частицы скелета, увеличивая тем самым прочностные характеристики промерзающих массивов. Деформации их поэтому способствуют интенсивному разрушению частиц скелета породы со временем до фракции пыли.

Промерзание рыхлых — песчаных и более грубообломочных литологических разновидностей обусловливает переход почти всей воды в лед при температурах, близких к 0°. В водонасыщенных рыхлых и трещиноватых скальных породах вследствие увеличения объема льда при кристаллизации воды на 9,07% возникает избыток воды β, превышающий объем пор вмещающих пород. Избыток воды отжимается. При свободном промерзании слоя dh водонасыщенной породы объем избыточной воды U равняется:

$$U = \beta n dh,$$

где n — пористость пород.

Льдовыделение в связных — глинистых породах с понижением температуры до минус 2° и ниже (как и таяние льда при повышении температуры) происходит постепенно. Часть воды в таких породах всегда остается в виде незамерзших пленок вокруг мелких частиц скелета. Пленки образуются молекулярно-ионными связями, составляющими в сумме значительные внутренние силы. Суще-

ственный объем связанной воды определяет более плавное изменение свойств глинистых, нежели рыхлых, пород при перепадах температур.

Элементарные криогенные процессы. Термоградиентная миграция влаги. В промерзающих и оттаивающих породах, а также в мерзлых породах при колебаниях их температуры происходит непрерывное изменение общего количества и соотношения твердой и жидкой составляющих. Соответственно изменяется характер удельной поверхности твердых частиц, а также степень их гидратации. Между массивами связных пород с различающимися по интенсивности и направлению фазовыми переходами пленочной воды возникают градиенты потенциалов внутренних молекулярно-ионных связей. Толщина пленок в этих массивах изменяется. Восстановление напряжений, вызванных нарушением связей, происходит за счет выравнивания толщины пленок в результате перемещения влаги.

Такое перемещение влаги в породе называется *миграцией* в отличие от движения воды в породе под воздействием гравитационного поля Земли, именуемого *фильтрацией*. При промерзании и протаивании пород влага непременно мигрирует к массивам с более низкой температурой, в направлении температурного градиента. Промерзание связных пород идет с увеличением их влагосодержания. Поступающая вода расходуется преимущественно на рост кристаллов льда, определяющих формирование включений и залежей подземного льда, криогенную текстуру и строение мерзлой толщи пород.

Скорость миграции можно рассчитать по формуле Букингема:

$$V_z = K_м \frac{d\psi}{dh},$$

где $K_м$ — коэффициент миграции;

$\frac{d\psi}{dh}$ — градиент потенциала внутренних молекулярно-ионных сил, который Букингем назвал градиентом капиллярного потенциала.

Преобразуя данное уравнение в более удобную форму, предложенную А. В. Лыковым, можно написать поток миграции в виде суммы двух потоков, вызываемых градиентами влажности ΔW и температуры $\Delta\theta$:

$$I = -\gamma_0 K (\Delta W + \delta \Delta\theta),$$

где K — коэффициент потенциалопроводности;

δ — термоградиентный коэффициент;

γ_0 — объемная масса скелета породы.

Физико-химические превращения скелета пород. Промерзание и протаивание пород вызывает значительные изменения состава их скелета. Физическое выветривание в области с мерзлыми породами идет интенсивнее, чем в более южных районах. Причинами этого являются: а) механическое расклинивающее действие трещин водными пленками, особенно сильное при их замерзании; б) частые переходы температуры через точку плавления льда; в) значительное понижение температуры пород, при которой вода замерзает даже в весьма тонких пленках.

В Восточной Сибири, по данным И. Я. Баранова, за 36 лет гнейс (берма карьера) до глубины 3,7 м превратился в песок. Наибольшему разрушению подвергаются породы в условиях значительной заболоченности, что для севера также типично.

Интенсивность химических реакций обмена ионов в промерзающих глинистых породах почти не ослабевает при понижении их температуры до минус 2°. Постепенное сокращение суммарного объема пленок незамерзшей воды при этом, видимо, компенсируется увеличением концентрации ионов. Настоящая особенность проявляется также в высокой электропроводности подобных массивов по сравнению с промерзающими рыхлыми породами и чистым льдом.

Промерзание глинистых массивов выражается в перераспределении не только воды, но и скелета породы. Глинистые частички слипаются, коагулируют в более крупные пылеватые частицы. Происходит также формирование минеральных прослоек — агрегатов — отдельностей. Они консолидируются, уплотняются, теряют влажность. Последняя W становится существенно меньше максимальной молекулярной влажности $W_{мм}$ ($W \ll W_{мм}$). В этом состоит внутриобъемная усадка. Однако объем всего промерзающего массива, как правило, не сокращается из-за льдовыделения между отдельностями. Кристаллизирующийся лед оказывает большое давление на скелет породы, способствуя его перегруппировке. Протаивание переуплотненных отдельностей глинистых пород, прочность которых достигает 8 кгс/см², при доступе воды может сопровождаться набуханием, увеличением объема.

Сложные криогенные процессы. Сочетание элементарных криогенных процессов порождает развитие более сложных видов криогенных процессов и явлений (табл. 115).

Образование включений и залежей подземного льда. Подземным льдом (ПЛ) называют всякий лед, находящийся в земной коре, независимо от его происхождения и форм залегания. На приполярных низменностях он занимает иногда до 80% объема пород (четвертичных). Горизонтальнослоистые залежи льда повторносегрегационного происхождения и вертикальнополосчатые повторножильные льды в пылевато-глинистых отложениях равнин и торфяниках нередко составляют крупные массивы. В горах ПЛ значительно меньше.

Залежи льда — слои, жилы, массивы пород мощностью 0,5 м и более, в которых лед составляет более половины объема. Чаще к ним относят скопления почти чистого льда.

Различают сингенетический ПЛ, возникший одновременно с промерзанием вмещающих отложений, и эпигенетический ПЛ, образовавшийся в ранее промерзшей толще горных пород.

ПЛ подразделяется на три основных генетических типа и на виды.

Конституционный тип льда — лед, образовавшийся при промерзании увлажненных горных пород из воды, которая находилась в этих породах:

1. Лед-цемент, образовавшийся из воды, замерзающей в порах породы и на контакте частиц ее скелета без нарушения характера их взаимного расположения; заметно изменяет лишь свойства породы, но не ее строение, и обычно визуально плохо различим.

2. Сегрегационный лед, выделившийся внутри или на поверхности промерзающей глинистой породы или торфа в результате кристаллизационной дифференциации с подтягиванием воды к фронту промерзания и возникновением здесь ледяного шлира. Лед плотный с мелкими (обычно не более 2 × 5 мм) равномерно распределенными пузырьками газа. Горизонтальнослоистые пластовые залежи, повторносегрегационного льда на севере превышают 20 м по мощности и 200 м по горизонтали. Четкая слоистость льда выражена включениями прослоев местных пород и расположением пузырьков газа. Некоторые исследователи считают подобные залежи замерзшими многократными инъекциями воды, современные их формы приурочены к положительным элементам равнинного рельефа. Местами участки залежи состоят из чистого льда.

3. Инъекционный лед, возникший в дисперсной (до промерзания) породе при напорном внедрении и замерзании свободной воды в созданных ею полостях.

Пещерно-жильный тип льда — лед, образовавшийся при замерзании воды или пара в готовых полостях:

1. Жильный лед, заполняющий готовые трещины.

2. Повторножильный лед, образовавшийся в торфяно-пылевато-глинистых породах при заполнении морозных трещин, периодически возникающих на одном и том же месте. Размеры сингенетических повторных жил достигают ширины 10 м и нескольких десятков метров по вертикали; эти жилы развиваются в форме полигональной решетки ниже СТС и взаимосвязаны с полигональным рельефом.

Таблица 115

Сложные криогенные процессы и явления

Процессы		Явления	
гидротермические	криогенные	образования в толще (и на поверхности)	формы рельефа
Промерзание, приводящее к дегидратации — коагуляции и перестройке толщи пород	Фиксация находившейся в породах воды	Породы сцементированы в единые массивы	Нет
	Подтягивание воды к фронту промерзания (сегрегация)	Разрозненные прослойки (шлиры) льда	Приподнятый участок
	. . . . .	. . . . .	. . . . .
	Внедрения воды (инъекция)	Крупные пластовые залежи льда	Бугры пучения, гидролакколиты
	Излияние воды на поверхность	Наледь	Гидроэффузив
	Растрескивание	Трещины, элементарные жилки льда	Нет
	Заполнение трещин водой (замерзание), снегом, изморозью, грунтом	Повторножильные залежи льда и грунтовые жилы	Полигонально-валиковый микрорельеф
Протаивание, приводящее к гидратации и нарушению строения толщи пород	Таяние льда — цемента	Нет	Нет
	Таяние разрозненных прослоек	Избыточная вода, остаточная криогенная текстура	Западины (озера), бугристо-западинный мезорельеф
	. . . . .	. . . . .	
	Вытаивание крупных залежей льда	Псевдоморфозы, полости, западины, избыточная вода	
Сезонное промерзание и протаивание, приводящее к разрушению и сортировке покровного слоя пород	Миграция воды	Прослойки льда, остаточная криогенная текстура	Нет
	. . . . .	. . . . .	. . . . .
	Дробление и физико-химические изменения пород	Покровные суглинки, каменные россыпи, скопления сортированного материала	Горизонтальные поверхности со «структурными грунтами» и каменными россыпями, нагорные террасы
	. . . . .	. . . . .	. . . . .

Продолжение табл. 115

Процессы		Явления	
гидротермические	криогенные	образования в толще (и на поверхности)	формы рельефа
	Перемещение частиц грунта по склону	Накопление материала на склонах и у их подножий, инволюции	Выположенные склоны, солифлюкционные террасы, гряды, шлейфы, цирки

3. Пещерный лед, заполняющий полости (пещеры и ниши, карстовые, термокарстовые, суффозионные и смешанного происхождения), возникшие при выносе части вещества горных пород. Натечные и конденсационные (сублимационные) льды в пещерах встречаются за пределами областей многолетнемерзлых пород, эти льды не всегда целиком заполняют существовавшие полости.

Погребенный тип льда — лед в толще пород, сохранившийся в результате погребения наземных льдов. По происхождению такие льды подразделяются на кристаллизационные (конжеляционные), образовавшиеся из воды, и метаморфические, образовавшиеся из снега. Льды такого генезиса развиты нешироко, крупные скопления их не встречаются, за исключением редких погребенных ледниковых массивов в горах. Последние обычно перекрыты вытаявшей мореной.

А. *Конжеляционные льды*: 1) наледи, промерзшие водоемы, донные льды (группа автохтонных льдов); 2) льдины речные, озерные и морские (группа аллохтонных льдов).

Б. *Метаморфические льды*: 1) снежниковый, преобразованный в лед снежник при инфильтрации в него воды и последующей ее кристаллизации; 2) ледниковый лед, динамометаморфический.

Пучением криогенным называют поднятие поверхности почвы и породы, вызванное увеличение их объема при промерзании вследствие раздвигания частиц и отдельностей скелета растущими кристаллами льда в результате питания мигрирующей водой. Обычно это — сегрегационный, реже инъекционный лед или плывун.

Различают сезонное пучение, вызванное криогенными процессами, развивающимися в породах СМС и СТС, и многолетнее, обусловленное процессами, происходящими в породах, залегающих глубже.

Практически пучение наблюдается всюду при промерзании пород, но бугры возникают лишь вследствие неравномерного пучения.

Пучение происходит под действием сил, работа которых пропорциональна общему уменьшению внутренней энергии, т. е. глубине и обводненности дисперсных образований. Наибольший эффект действия этих сил проявляется в пылевато-глинистых отложениях, широко распространенных в северных и восточных районах СССР, главным образом за счет тепла, выделяющегося при замерзании воды.

Бугры пучения (БП) возникают в результате криогенного пучения. Различают многолетние БП, образовавшиеся вследствие: 1) сегрегационного льдовыделения, высота таких БП достигает 70 м (булгунняхи), ядра их отличаются повышенной льдистостью; 2) внедрения воды (гидролакколиты) и грунтовой массы.

Различают БП также по составу пород: торфяные, торфяно-минеральные и минеральные.

Верхняя часть многолетних БП по мере пучения сносится, поэтому после протаивания льдистого ядра на месте таких бугров образуются западины и озера. Вокруг некоторых из этих озер сохраняются валы, сложенные материалом, перемещенным с вершины бывшего БП.

Растрескиванием криогенным называют расчленение трещинами массива мерзлых почв и пород в результате суммарной объемной усадки при понижении температуры. Расширение замерзающей при этом связанной воды с избытком компенсируется усадкой обезвоживаемого мелкозема главным образом вследствие коагуляции коллоидных частиц. Система трещин, как правило, имеет полигональный порядок, нередко полигоны характеризуются прямыми углами.

В пределах СМС и СТС интенсивному растрескиванию горных пород способствует частая смена фазовых переходов вода — лед.

Жильные образования. В мерзлых пылевато-глинистых породах и торфяниках морозное растрескивание представляет собой условие возникновения тонких элементарных жилок льда и мощных повторножильных ледяных залежей, составляющих объемную полигональную решетку в мерзлых отложениях. Местами торфяно-глинистые породы между такими жилами сохраняются лишь в виде более узких вертикальных колонн. На поверхности грунта растущие жилы проявляются в виде полигональной сети иногда обвалованных трещин (полигонально-валиковый рельеф). Ширина полигонов обычно составляет от 5 до 20 м, высота валиков — 0,1—0,3 м.

Полости, образующиеся при вытаивании жил льда, в большинстве случаев заполняются материалом вышележащих отложений. Таким образом создаются псевдоморфозы (вторичные гуртовые жилы) по ледяным жилам.

Останцово-полигональные формы. Морозное растрескивание нередко определяет направление стока поверхностных вод по трещинам. В северных районах специфическое проявление эрозии обусловлено также наличием в осадочных породах подземного льда. В таких условиях формируется своеобразный останцово-полигональный микро- и мезорельеф.

Структурными почвами («*грунтами*») называют образования, возникшие в слое сезонного промерзания и протаивания вследствие криогенной сортировки обломочных пород и обладающие совокупностью характерных форм микрорельефа.

Различают пятна-медальоны, бугристость (кочковатость), каменные многоугольники, каменные кольца (венцы), каменные поля, или россыпи (моря), каменные потоки (курумы), каменные полосы (пашневидные склоны).

Наиболее типичные участки пятнистой тундры приурочены к относительно охлаждаемым, выступающим формам рельефа — вершинам холмов, бровкам террас и т. д. Поэтому пятнистая тундра служит известным индикатором инженерно-геокриологических условий местности.

Наледью М. И. Сумгин [14] называет излияние воды зимой вследствие уменьшения живого сечения русла и подруслового потока реки, от образовавшегося покрова льда и промерзания берегов, не помещающегося в этом сечении. Вода под давлением напора вытекает на поверхность льда реки или на поверхность берегов приречной долины. Растекаясь по этим поверхностям, вода замерзает слой за слоем, образуя пласты слоистого льда. Наблюдаются также наледи только подземных вод, источники которых выходят на водоразделах и на склонах долин. В питании наледей большое значение нередко имеет снег.

Наиболее постоянные наледи, развивающиеся на протяжении всей зимы, питаются подземными водами глубинных горизонтов, выходящими по зонам разломов, тектоническим трещинам, контактам пород различного возраста и состава. Максимальной минерализации питающая вода достигает к весне. Подземные воды в большинстве случаев выходят в руслах рек и в озерах. Если в восходящих субаквальных источниках температура воды превышает 1—2°, то ниже по течению зимой в ледяном покрове образуются полыньи.

Гидроэффузивами или тарынами П. Ф. Швецов и В. П. Седов называют ледяные покровы, которые образовались путем последовательного замерзания наледей и, как правило, имеют горизонтальнослоистое строение из-за перемежаемости водного и снежного льда, обусловливающего соответствующее расположение включений пузырьков газа. При промерзании толстых изолированных слоев или линз наледной воды часть ее оказывается заключенной в ледяной оболочке. Под действием возрастающего гидростатического давления ледяная кровля выгибается и рвется, на поверхности гидроэффузивов формируются ледяные бугры пучения иногда с заключенными в них воздушными полостями.

Площади гидроэффузивов нередко превышают 100 км^2; толщина их превосходит 5 м. По времени существования они бывают сезонными, летующими и многолетними. Крупные многолетние наледные поля называются тарынами; наиболее широко тарыны распространены в горах на северо-востоке Сибири.

Термокарстом называют вытаивание подземного льда, обязательно сопровождающееся деформацией пород — возникновением осадки и провальных форм рельефа или образованием полостей в них. Просадки вызывают уплотнение пород.

Термокарстовые явления. Термокарстовый процесс четко проявляется в формировании отрицательных форм рельефа. Величина их определяется в значительной мере объемом вытаивающего подземного льда, на месте которого частично сохраняются полости, определяющие криогенно-остаточную текстуру пород (посткриогенную). Остаточные полости способствуют активизации движения подземных вод.

В результате проявления термокарста образуются большие западины-аласы озера, местами составляющие до 70% площади территории. Наглядным признаком термокарстовых форм являются трещины, параллельные бровкам склонов западин, в некоторых случаях концентрические. Кроме того, показателен наклон деревьев в западину, затопление оснований стволов и гибель на корню деревьев, заболачиваемость участка и т. д.

Криогенными склоновыми процессами называют гравитационные смещения горных пород по склонам, вызванные систематическим промерзанием и протаиванием верхнего слоя пород, его нагреванием и охлаждением, увлажнением и осушением (крип), а также постоянно мерзлым состоянием подстилающей толщи.

Солифлюкция — сложное движение увлажненных пылевато-глинистых пород вниз по склону вследствие проявления криогенных процессов и силы тяжести.

Важным условием проявления солифлюкции являются уклоны поверхности. Это движение наблюдается на склонах крутизной 2° и более. Увеличение крутизны склона способствует движению, если при этом не уменьшается увлажнение пород.

Скорость солифлюкционного перемещения весьма разнообразна.

Солифлюкционные образования. В результате солифлюкции на пологих склонах образуются потоки, заканчивающиеся языками, и сплывы. У основания склонов возникают шлейфы, часть толщи которых принадлежит к солифлюкционно перемещенному материалу. Поверхность таких шлейфов нередко характеризуется прерывистыми валами, созданными вследствие напора солифлюкционных потоков.

IV. ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Промерзающими называют породы, в которых в данный момент происходит процесс кристаллизации содержащейся в них свободной воды.

Мерзлыми называют породы, в которых хотя бы часть свободной и капиллярной воды превращена в лед.

П р о т а и в а ю щ и м и (оттаивающими) называют породы, в которых в данный момент происходит процесс перехода содержащегося в них льда в свободную и капиллярную воду.

Кроме того, выделяют породы м о р о з н ы е, т. е. не содержащие ледяных включений при отрицательной температуре, а также т а л ы е и н е м е р з л ы е — все породы при положительной температуре, соответственно бывшие или не бывшие до этого мерзлыми.

С и н г е н е т и ч е с к и й т и п мерзлых толщ дисперсных пород — пылеватых песков, супесей, суглинков, глин и торфов — характеризуется четко выраженной спецификой состава и строения: большой льдистостью, равномерным распределением довольно однородных шлиров льда по глубине, сетчатой или слоистой криогенной текстурой. Важными признаками этого типа толщ являются также нахождение в них мощных повторножильных, повторносегрегационных (с нечеткими контурами) и погребенных залежей льда. Формирование таких толщ происходило при одновременном накоплении и промерзании осадков.

Э п и г е н е т и ч е с к и й т и п м е р з л ы х т о л щ характеризуется своеобразным составом и строением — в целом небольшой льдистостью, резко убывающей с глубиной, разреживающимся по глубине распределением неоднородных шлиров льда и преобладанием массивных и слоистых криогенных текстур. Размеры шлиров льда, как правило, увеличиваются до глубины 15—20 м. Подобное криогенное строение имеют толщи, промерзшие после образования всей толщи.

Т а л и к о м называют слой, линзу, массив талых пород среди мерзлой толщи.

С о д е р ж а н и е л ь д а и н е з а м е р з ш е й в о д ы в к р и о г е н н ы х п о р о д а х в значительной степени определяет их механические и другие свойства.

Промерзание пород начинается с кристаллизации содержащейся в них свободной воды и наименее прочно связанных ее видов. При нуле или близких к нему значениях отрицательной температуры в породах со слабо минерализованной поровой влагой замерзает свободная и капиллярная вода.

В зависимости от интенсивности фазовых переходов поровой воды при различных значениях отрицательной температуры выделяют три температурные области промерзания пород.

1. Область значительных фазовых переходов $\left(\frac{\partial i_0}{\partial \theta} \geqslant 0{,}01 \text{ 1/град}\right)$; в пределах области обычно соблюдается условие: $W_н < W_{мм}$.

2. Переходная область фазовых превращений $\left(0{,}001 \frac{1}{\text{град}} \leqslant \frac{\partial i_0}{\partial \theta} \leqslant 0{,}01 \frac{1}{\text{град}}\right.$; $\left. W_{пс} < W_н < W_{мм}\right)$.

3. Область практически замерзшего состояния:

$$\frac{\partial i_0}{\partial \theta} \leqslant 0{,}001 \frac{1}{\text{град}},$$

где $\frac{\partial i_0}{\partial \theta}$ — изменение относительной льдистости в долях единицы при изменении температуры породы на 1°;

$W_н$ — содержание незамерзшей воды;

$W_{мм}$ — влажность, соответствующая максимальной молекулярной влагоемкости;

$W_{пс}$ — количество прочносвязанной воды (близко к максимальной гигроскопической влажности).

В породах трещиноватых, крупнообломочных и песчаных, обладающих малой удельной поверхностью, прочно связывающей лишь незначительное

количество воды, почти вся вода находится в свободном состоянии. Промерзание и оттаивание таких пород при малом содержании в них водорастворимых соединений происходит в узком интервале температур (от нуля до 0,2°), после чего процесс кристаллизации практически прекращается и порода считается полностью промерзшей.

Супесчаные, суглинистые, глинистые и торфяные породы отличаются высокоразвитой удельной поверхностью и в ряде случаев обладают ультрапористостью. Такие породы способны удерживать в связанном состоянии большое количество воды, часть которой не замерзает даже при 30°.

Зависимость содержания незамерзшей воды $W_н$ (θ) в криогенных породах от температуры θ в общем виде выражается так:

$$W_H = W_0 + A\left[\frac{1}{(1 + a\,\Delta\theta + b\,\Delta\theta^2)^2} - 1\right],$$

где W_0 — начальное содержание связанной воды в породе;

A, a, b — диаметры, характеризующие состав, строение и свойства породы, обменный комплекс, определяемые экспериментально:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0;$$

θ — температура начала промерзания породы.

При повышении содержания водорастворимых соединений температура промерзания — оттаивания породы понижается в соответствии с концентрацией и ионным составом раствора.

При увеличении плотности (уменьшении влажности) дисперсных пород происходит понижение температуры с начала их промерзания, обусловливаемое отжатием менее связанной воды и соответствующим понижением температуры кристаллизации оставшейся, более прочно связанной воды.

Зависимость содержания незамерзшей воды $W_н$ от уплотняющего давления p во влажных породах ($W > W_{мм}$) можно выразить равенством

$$W_н(p) = W + K(\theta)\,p,$$

где W — содержание незамерзшей воды при $p = 0$ и температуре θ;

K (θ) — коэффициент, зависящий от температуры;

В породах, компрессионно уплотненных до влагосодержания $W < W_{мм}$, изменения давления в обычных для практики пределах не оказывают существенного влияния на содержание в них незамерзшей воды.

V. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОМЕРЗАЮЩИХ, МЕРЗЛЫХ И ОТТАИВАЮЩИХ ПОРОД

Определение величины пучения пород при промерзании. Поднятие поверхности в результате пучения зависит главным образом от минерального и гранулометрического состава породы, ее влажности, скорости промерзания и возможности свободного доступа воды к фронту промерзания из нижележащих непромерзающих слоев.

При оценке возможной величины пучения следует выяснить, в каких условиях будет происходить промерзание — в условиях открытой или замкнутой системы, т. е. при наличии или отсутствии подтока воды к фронту промерзания из смежных непромерзающих слоев породы.

Для замкнутой системы считают, что породы не подвержены пучению при следующих условиях влажности:

глинистые породы — $W \leqslant W_р$;

крупноскелетные породы — $W \leqslant 92\,\dfrac{(\Delta - \gamma_с)\,\Delta_0}{\Delta\gamma_с}$,

где W — весовая влажность породы, %;
$W_р$ — влажность на границе раскатывания;
Δ, Δ_0 — плотность минерального скелета и воды;
$\gamma_с$ — объемная масса скелета породы.

Если указанные неравенства не соблюдаются, то величину пучения определяют по формулам:

а) при неполностью водонасыщенных породах:

$$h = \left[\frac{\gamma_с}{\Delta_0}\left(1{,}09W - 0{,}09W_н + \frac{\Delta_0}{\Delta}\right) - 1\right] z;$$

б) при полностью водонасыщенных породах:

$$h = 0{,}09\Delta \frac{W - W_н}{\Delta_0 + W\Delta} z,$$

где $W_н$ — содержание незамерзшей воды;
z — глубина промерзания породы.

При промерзании в условиях открытой системы величину пучения вычисляют по различным формулам в зависимости от глубины залегания подземных вод H_0 и влажности пород.

1. *Участки с глубоко залегающими подземными водами.*

Влажность $W < 0{,}6W_т$, где $W_т$ — предел текучести;

$$h = \frac{3{,}08J}{\sqrt{a_0} - \sqrt{a_1}} \sqrt{T};$$

здесь J — комплексный параметр, учитывающий начальную влажность породы, ее влагопроницаемость. Приближенно принимают следующие значения: глины — 0,12; пылеватые суглинки и суглинки — 0,14; пылеватые супеси — 0,31; легкие супеси — 0,19; супеси — 0,17; пылеватые пески — 0,16;

$$a_0 = \frac{z^2}{2T_з},$$

где z — среднее многолетнее значение наибольшей глубины промерзания;
$T_з$ — длительность зимы в данном районе;

$$a_1 = \frac{z_1^2}{2T_1},$$

где z_1 — глубина проникания в породу изотермы —3° за время T_1;
T_1 — время с начала промерзания породы.

Влажность $W > W_т$

$$h = 1{,}26\,(W_0 - W_{мм})\sqrt{k_к T},$$

где W_0 — начальная влажность;
$W_{мм}$ — максимальная молекулярная влагоемкость;
$k_к$ — коэффициент капиллярной влагоемкости пород (см/сут), равный для глин — 0,17; для суглинков — 10,0; для супесей и пылеватых супесей — 6,6.

2. *Участки с близко залегающими подземными водами.* Величина пучения в этом случае определяется по формуле

$$h = \frac{2{,}2\,(W_к - W_0)}{a_0}\left(2{,}3H_0 \lg \frac{H_0}{H_0 - z} - z\right),$$

здесь H_0 — глубина залегания подземных вод от поверхности;
z — наибольшая глубина промерзания;
$W_к$ — капиллярная влагоемкость породы.

Крупноскелетные породы в условиях открытой системы при промерзании пучатся незначительно, их пучение выражается в долях процента. Это объясняется легкостью отжатия воды от фронта промерзания в сторону незамерзшей породы.

Определение величины осадки породы при протаивании. Осадка пород при оттаивании происходит главным образом в результате уменьшения размеров макропор, образовавшихся после вытаивания льда и уплотнения минеральных агрегатов.

Относительная осадка пород, оттаивающих под умеренной нагрузкой, выражается зависимостью

$$S = A + ap,$$

где S — величина осадки;
A — коэффициент оттаивания;
a — коэффициент уплотнения (сжимаемости);
p — уплотняющая нагрузка.

Коэффициенты A и a могут значительно изменяться по глубине, причем это изменение, как правило, происходит скачкообразно. Поэтому для сильнольдистых пород численные значения коэффициентов необходимо определять не реже чем через 0,5 м по глубине, а для умеренно льдистых — через 1 м. Осадку, возникающую за счет ледяных прослоек значительной толщины, следует учитывать отдельно. Величины A и a определяют в лабораторных условиях на образцах с ненарушенным сложением, которые испытывают в одометрах. Осадка оттаявшей породы под действием собственного веса определяется по формуле

$$S = \sum_1^n A_i h_i + \sum_1^n a_i F\gamma_i + \sum_1^n l_i,$$

где A_i и a_i — коэффициенты оттаивания и уплотнения отдельного слоя;
h_i — толщина этого слоя за вычетом крупных прослоек льда в нем;
$F\gamma_i$ — площадь эпюры давлений от собственного веса породы в пределах слоя;
Σl_i — сумма толщин крупных ледяных прослоек в пределах i-го слоя.

Максимально возможную осадку пород при оттаивании можно определить по формуле

$$S_{макс} = \frac{(1 + 0{,}09 i_0)\, W - W_р + \dfrac{V_0 - V_п}{\gamma_с}}{(1 + 0{,}09 i_0)\, W - W_р + \dfrac{1 - V_п}{\gamma_с}},$$

где W — суммарная весовая влажность породы в долях единицы;
$W_р$ — влажность на границе раскатывания в долях единицы;
V_0, $V_п$ — количество воздуха в породе в естественном состоянии и после уплотнения; для приближенных расчетов V_0 и $V_п$ можно принять равными нулю;
$\gamma_с$ — объемная масса скелета породы;
i_0 — относительная льдистость.

Фактическая осадка составляет часть максимальной и приближенно вычисляется по формуле

$$S = kS_{макс},$$

где k — эмпирический коэффициент ($k \leqslant 1$).

Определение показателей физических и механических свойств мерзлых горных пород. Мерзлые породы представляют собой поликомпонентные многофазные системы, отличающиеся от пород немерзлых своим составом (наличием льда) и строением (криогенной текстурой). Лед в мерзлых породах служит породообразующим минералом и цементом, с в я з ы в а ю щ и м минеральные частицы и увеличивающим прочность породы.

Особенности строения мерзлых пород, связанные с протекавшими в них криогенными процессами (замерзанием поровой влаги, миграцией воды к фронту промерзания и избыточным льдовыделением, изменением первичной текстуры под воздействием растущих кристаллов льда), характеризуются к р и о г е н н о й т е к с т у р о й.

В зависимости от размеров, формы ледяных включений и их взаимного расположения с составляющими породу компонентами различают три основных типа криогенной текстуры: 1) *массивную* — породы, не содержащие обособленных ледяных включений; 2) *слоистую* — породы, в которых ледяные включения расположены в виде более или менее параллельных прослоек и линз; 3) *сетчатую* — с хаотическим расположением ледяных включений, образующих более или менее непрерывную пространственную решетку (сетку).

Зависимость пластично-вязких свойств льда от температуры и неустойчивость в соотношении количества льда и незамерзшей воды в породе предопределяют нестабильность свойств мерзлых пород, резко проявляющуюся при температурах, близких к нулю.

О б ъ е м н у ю м а с с у м е р з л ы х п о р о д, с учетом находящегося в них льда и незамерзшей воды, определяют путем гидростатического взвешивания или с помощью объемомера. Можно определить объемную массу γ расчетом по данным фазового состава воды в породе:

$$\gamma = \frac{0{,}9\Delta\,(100 + W)}{90 + \Delta\,(W - 0{,}1W_{н})},$$

где Δ — плотность минеральных частиц;

W — общая (суммарная) влажность в % к массе сухой породы;

$W_{н}$ — количество незамерзшей воды в % к массе сухой породы.

Объемную массу скелета в полевых условиях приближенно можно подсчитать по формуле

$$\gamma_{ск} = \frac{100\gamma}{100 + (W_{н} + 1{,}09W_{л})}$$

где γ — объемный вес мерзлой породы;

$W_{н}$ — количество незамерзшей воды в долях единицы от массы сухой породы;

$W_{л}$ — льдистость.

В л а ж н о с т ь и л ь д и с т о с т ь. Общей (суммарной) влажностью мерзлых пород называют отношение массы незамерзшей воды $g_{н}$ и льда $g_{л}$ к массе сухой породы $g_{п}$ в процентах:

$$W = \frac{g_{н} + g_{л}}{g_{п}} \cdot 100\%.$$

В породах массивной криогенной текстуры общую влажность можно определять по образцам, отобранным из отдельных точек массива. При определении общей влажности льдистых грунтов наилучшие результаты дают способы средней пробы и бороздковый.

Влажностью минеральных прослоев $W_{мн}$ называют влажность прослоек сравнительно уплотненной породы, не содержащих заметных включений льда и находящихся между ледяными жилами или прослойками льда; $W_{мн}$ определяется по образцам, отобранным из отдельных точек массива.

Содержание незамерзшей воды $W_н$ в мерзлых породах выражается в процентах к массе сухой породы $g_п$.

$$W_н = \frac{q_н}{q_п} \cdot 100\%.$$

Здесь количество незамерзшей воды при данной отрицательной температуре $g_н$ вычисляется по разности

$$q_н = q_в - q_л$$

между общим содержанием воды $g_м$ и количеством льда $g_л$. Последнее количество определяется обычно в лабораторных условиях дилатометрическим или калориметрическим способом — по изменению объема породы при оттаивании или по количеству выделяющейся при этом скрытой теплоты. Для приближенных расчетов значение $W_н$ берут по типовым графикам или таблицам. В песках содержание незамерзшей воды ничтожно, и ее можно не учитывать.

Льдистостью $W_л$ называют количество льда в породе (влажность, приходящаяся на долю льда) и выражают ее в долях единицы от массы сухой породы.

Весовая льдистость, или льдонасыщенность, i представляет собой отношение массы льда $g_л$ к массе мерзлой породы, выраженное в долях единицы:

$$i = \frac{g_л}{g_п + g_в} = \frac{W - W_н}{1 + W}.$$

Здесь влажность также выражена в долях единицы.

Объемная льдистость i' показывает отношение объема льда к объему мерзлой породы:

$$i' = \frac{\gamma}{\Delta_в} \frac{W - W_н}{1 + W} \cong \gamma i,$$

где γ — объемная масса мерзлой породы;

$\Delta_в$ — плотность воды.

Относительная льдистость i_0 или коэффициент льдистости равен отношению массы льда $g_л$ к массе воды $g_в$, содержащейся в породе:

$$i_0 = \frac{g_л}{g_в} = 1 - \frac{W_н}{W}.$$

Объемная льдистость за счет льда — цемента $i'_ц$ и за счет льда — прослоек i':

$$i'_ц = \frac{\Delta (W_{мн} - W_н)}{90 + \Delta (W - 0{,}1 W_н)} \cdot 100\%,$$

$$i'_л = \frac{\Delta (W - W_{мн})}{90 + \Delta (W - 0{,}1 W_н)} \cdot 100\%;$$

здесь Δ — удельный вес породы;

$W_{мн}$ — влажность мерзлых минеральных прослоек в % к массе сухой породы.

Степень заполнения пор породы льдом и незамерзшей водой:

$$m = \frac{\gamma_{ск}\,(1{,}09W_л + W_н)}{n},$$

где n — пористость породы в долях единицы.

Фильтрационные свойства. Коэффициент фильтрации песчаных и водонасыщенных пород при промерзании резко уменьшается, и для мерзлых песков практически может быть принят равным нулю. Глинистые породы, содержащие известное количество незамерзшей воды, сохраняют в некоторой *степени водопроницаемость*. Так, *при температуре* —1° *коэффициент электроосмотической* водопроницаемости тяжелого мерзлого суглинка при влажности 24% равен $\sim 14 \cdot 10^{-10}$ см/с. Однако, чтобы вызвать движение воды в такой породе, необходимо приложить большой начальный градиент напора. При частичном заполнении пор водой пески в мерзлом состоянии обладают некоторой водопроницаемостью.

При оттаивании мерзлые породы некоторое время частично сохраняют криогенную текстуру — в местах вытаивания ледяных включений остаются макропоры. По этим макропорам может происходить фильтрация воды. Коэффициент фильтрации в породах с остатками криогенной текстуры определяется количеством макропор, их размерами и расположением (*макропористостью*), а также водопроницаемостью агрегатов минеральных частиц, заключенных между микропорами (*микропористость*).

Пылеватые оттаявшие суглинки, обладающие в ненарушенном состоянии коэффициентом фильтрации порядка 10^{-7} см/с, после нескольких циклов сезонного промерзания — оттаивания обнаруживают в условиях ненарушенного залегания повышенный коэффициент фильтрации, близкий к $3 \cdot 10^{-4}$ см/с. Увеличение коэффициента фильтрации за счет криогенной макропористости возможно и при оттаивании многолетнемерзлых пород.

Анизотропность криогенной текстуры может обусловить изменение коэффициента фильтрации оттаявших пород в 3—4 раза в зависимости от направления потока фильтрации относительно преимущественной ориентации макропор.

Электропроводность мерзлых пород определяется их составом, в первую очередь количеством и степенью минерализации незамерзшей воды и льда, а также криогенной текстурой. Большое разнообразие сочетаний факторов, действующих в природных условиях, предопределяет невысокую сходимость результатов испытаний образцов с ненарушенным сложением.

При промерзании породы ее электропроводность вначале уменьшается очень быстро, а потом значительно медленнее. Это соответствует постепенному замерзанию поровой влаги, в различной степени связанной.

Диэлектрическая проницаемость мерзлых пород в основном зависит от количества содержащейся в них незамерзшей воды и от частоты колебаний электрического поля f. Диэлектрическая постоянная мерзлых пород изменяется в пределах $2 < E < 80$. Ее значения определяются величиной диэлектрической проницаемости воды $E_в = 80$CGSE и льда $E_л = 2$CGSE.

Теплоемкость мерзлых пород подразделяется на эффективную и аддитивную.

Эффективная $C_{эф}$ равна количеству тепла, необходимого для изменения температуры мерзлой породы на 1°, включая теплоту фазовых переходов воды:

$$C_{эф} = \frac{C_м g_м + C_л g_л + C_н g_н + 80\,\dfrac{\Delta g_л}{\Delta\theta}}{g_м + C_л + g_н}.$$

Аддитивная $C_{ад}$ не учитывает теплоту фазовых переходов воды

$$C_{ад} = \frac{C_м g_м + C_л g_л + C_н g_н}{g_м + g_л + g_н};$$

здесь м, л, н — индексы, относящиеся соответственно к минеральной составляющей породы, льду и незамерзшей воды;

C — теплоемкость, кал/г · град;

g — масса, г;

$\frac{\Delta g_л}{\Delta \theta}$ — изменение количества льда (в граммах) при изменении температуры на 1°; принимается по экспериментальным данным.

Понятие эффективной теплоемкости применяется при некоторых приближенных теплофизических расчетах. Разность между $C_{эф}$ и $C_{ад}$ может достигать значительных величин.

Коэффициент теплопроводности мерзлых пород λ_0 зависит от состава и строения породы и изменяется с ее температурой.

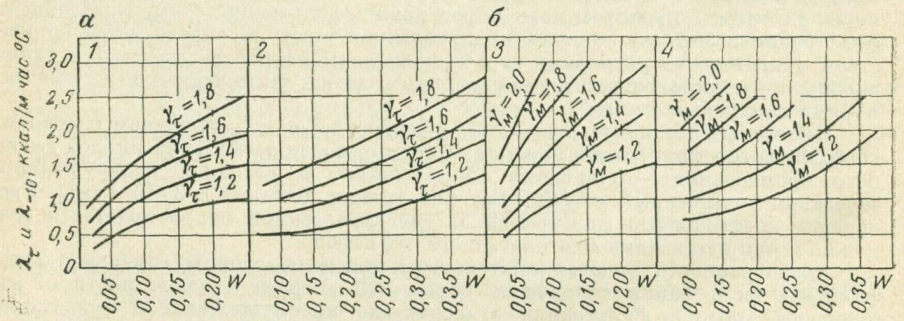


Рис. 83. Коэффициент теплопроводности: *а* — талых; *б* — мерзлых пород *1* и *3* — в песчаных отложениях; *2* и *4* — в глинистых отложениях

В лабораторных условиях значение λ_0 определяют по методу регулярного или стационарного режима на монолитах с ненарушенным сложением. Размеры монолита должны быть достаточно велики, чтобы особенности криогенной текстуры не отражались на результатах. При полевых исследованиях для определения λ_0 применяют шаровые зонды, цилиндрические иглы, пластины, служащие мгновенными или изотермическими источниками тепла и позволяющие охарактеризовать теплофизические свойства отдельных напластований.

Осредненные значения теплофизических характеристик многолетнемерзлых пород с учетом всех видов теплообмена в породе могут быть получены путем расчета, проведенного на основе метода температурной волны. Для расчета необходимо знать влажность и объемную массу породы и дважды в течение лета измерить глубину протаивания и температуру на трех глубинах, включая глубину, на которой сезонные колебания не превышают 0,1—0,2° С.

Приближенное значение λ_0 для песчаных и глинистых пород и его изменения в зависимости от температуры θ также можно рассчитать на основании значений объемная масса породы γ, ее влажности W и температуры θ по эмпирической формуле

$$\lambda_\theta = \lambda_{-10} - \frac{W_н}{W}(\lambda_{-10} - \lambda_0).$$

Значения коэффициентов теплопроводности при $\theta = -10°$ (λ_{10}) и $\theta = (\lambda_0)$ берут по графику, изображенному на рис. 83.

Прочность и деформируемость мерзлых пород зависят главным образом от гранулометрического состава, текстуры и влажности породы, ее температуры, а также времени действия нагрузки. Мерзлые породы обладают свойствами ползучести и релаксации напряжений. Эти свойства выражаются в том, что при постоянной деформации сопротивление пород непрерывно уменьшается во времени.

Вследствие свойств ползучести и релаксации прочность мерзлых пород является в значительной степени понятием условным, так как она зависит от продолжительности действия нагрузки. При кратковременной нагрузке порода может выдержать значительно большие напряжения, чем при длительной.

Сопротивление пород одноосному сжатию и растяжению приближенно описывается зависимостью

$$t = \sigma_{дл} + (\sigma_{мгн} - \sigma_{дл})\, e^{-\frac{1}{a}},$$

где t — время от момента приложения нагрузки до момента разрушения породы под этой нагрузкой;

$\sigma_{мгн}$ — минимальное напряжение, вызывающее мгновенное разрушение;

$\sigma_{дл}$ — максимальное напряжение, при котором порода не разрушается неопределенно долго;

a — «время релаксации», характеризующее вязкие свойства породы.

Значения $\sigma_{мгн}$, $\sigma_{дл}$, a определяются экспериментально.

Сопротивление породы чистому сдвигу приближенно равно

$$\frac{b}{\tau} = \ln \frac{t}{B}, \qquad (1)$$

где t — время от начала приложения сдвигающего усилия до момента разрушения породы;

b, B — параметры, определяемые опытным путем. Сначала измеряют время разрушения породы при действии двух нагрузок τ_1 и τ_2, затем вычисляют значения b и B из системы уравнений

$$\frac{b}{\tau_1} = \ln \frac{t_1}{B}; \quad \frac{b}{\tau_2} = \ln \frac{t_2}{B},$$

подставляют полученные величины в уравнение (1) и находят окончательно длительное сопротивление породы сдвигу $\tau_{дл}$, принимая условно $t = 50$ годам.

В общем случае сопротивление мерзлых пород сдвигу определяется законом Кулона:

$$\tau = C + p \operatorname{tg} \varphi,$$

где C — сцепление;

p — нагрузка, приложенная нормально к плоскости сдвига;

φ — угол внутреннего трения породы.

Величины C и φ для данной породы постоянны только при неизмененной температуре и определенном времени действия нагрузки. Часто принимают $\varphi = 0$. Это допущение компенсируется введением условного эквивалентного сцепления

$$\tau = C_{экв}.$$

$C_{экв}$ может быть определено экспериментально способом шариковой пробы. Измеряя глубину h погружения шарика диаметром D в породу под нагрузкой p, вычисляют $C_{экв}$, соответствующее различным моментам времени, по формуле

$$C_{экв} = 0{,}18 \frac{p}{\pi D h}.$$

Длительное эквивалентное сцепление определяют как $C_{экв.\,дл} = 0{,}75\, C_{экв.\,8}$, где $C_{экв.\,8}$ — сцепление, соответствующее погружению шарика через 8 ч после приложения нагрузки.

Прочность мерзлых пород в значительной степени зависит от их гранулометрического состава. При прочих равных условиях с увеличением дисперсности мгновенная прочность мерзлых пород понижается. У глин она в несколько раз меньше, чем у песка, что объясняется большим количеством незамерзшей воды в глинах по сравнению с песком.

Наибольшее влияние на прочность мерзлых пород оказывает температура, с понижением которой прочность возрастает. Особенно сильно это влияние проявляется в зоне интенсивных фазовых переходов, поэтому при испытаниях мерзлых пород необходимо точно выдерживать заданный температурный режим.

VI. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКАЯ СЪЕМКА И ИЗЫСКАНИЯ

Общие геокриологические исследования осуществляются с целью выявления местных, региональных и зональных закономерностей формирования многолетнемерзлых толщ и массивов, их распространения, состава, строения, свойств, температурного режима и криогенных процессов (явлений), происходящих в породах.

Методы этих исследований, кроме общепринятых в инженерной геологии, дополняются специальными инженерно-геокриологическими, поскольку промерзающие, мерзлые и протаивающие породы, содержащие в своем составе подземные льды и незамерзшую воду и обладающие криогенной текстурой, резко отличаются по своим свойствам от пород немерзлых.

Основой инженерно-геокриологических исследований является *комплексная инженерно-геокриологическая съемка*, осуществляемая в зависимости от конкретных целей в различных масштабах (от 1 : 200 000 до 1 : 500).

Съемка предусматривает проведение комплексных полевых наблюдений природных условий (геоморфологических, геологических, гидрогеологических, почвенно-геоботанических, климатических), формирование мерзлых пород, их состава, температурного режима, криогенных текстур и явлений (процессов) с целью оценки инженерных свойств пород для всех стадий проектирования сооружений.

Наиболее полно на стадии полевых исследований следует изучать мерзлые породы (табл. 116). При этом должны быть изучены физические и механические свойства мерзлых пород и установлены их отличия от пород немерзлых того же литолого-генетического типа. К числу таких свойств относятся: суммарная влажность — льдистость, количество незамерзшей воды, объемный вес породы при ненарушенной структуре и ее осадка при оттаивании, температурный режим.

В зависимости от конкретных целей исследований и масштаба съемки в состав последней входят также специальные стационарные наблюдения за режимом некоторых криогенных процессов (динамикой СТС, СМС и слоя с годовыми теплооборотами; криогенной деформацией земной поверхности; формированием снежного и ледяного покровов и др.), а также опытные полевые работы по изучению прочностных свойств криогенных пород: силы смерзания с различными материалами; опытные нагрузки на мерзлые, оттаивающие и про-

Таблица 116

Состав полевых инженерно-геокриологических исследований

Объект исследований	Состав определений
Распространение мерзлых пород	1. Глубина залегания верхней и нижней поверхностей мерзлой толщи, ее мощность 2. Прерывистость толщ по площади и глубине (талики — их генезис, тип, приуроченность к формам рельефа, мощность, формы)
Сезонномерзлый и сезонноталый слой	1. Динамика толщины слоев 2. Зависимость от литологии и текстуры пород, форм рельефа, ориентации склонов, степени льдонасыщения и пр. 3. Режим надмерзлотных вод
Типы криогенных текстур	1. Тип и элементы текстуры (монолитная, сетчатая, слоистая) 2. Генезис 3. Зависимость от состава, рельефа и пр.
Температура	1. Температурное поле 2. Зависимость от гидрогеологических условий, рельефа, водоемов, водотоков, снежного и растительного покровов
Криогенные явления	1. Процессы 2. Формы рельефа 3. Гидрогеологические условия

мерзающие породы; длительная прочность и реологические свойства многолетнемерзлых пород при их различном температурном режиме и др.

На основе собранного материала составляют следующие карты: 1) распространения сезонно- и многолетнемерзлых пород с указанием мощности пород, условий их залегания, прерывистости, состава, типов криогенных текстур, температуры пород; 2) СТС и СМС на геолого-литологической и гидрогеологической основе; 3) современных физико-геологических (в том числе и криогенных) явлений и распространения подземных вод на той же основе; 4) и нженерно-геокриологического районирования с прогнозом инженерно-геокриологических явлений при освоении территории.

Для получения инженерно-геокриологических сведений о местности и горных породах применяют известные методы, которые в районах с многолетнемерзлыми породами используются в значительной мере с учетом геокриологических условий.

Геоморфологические методы помимо выявления происхождения, возраста и распространения обычных форм мезо- и микрорельефа

позволяют установить также формы, возникшие в процессе промерзания и протаивания (термокарст, солифлюкция, бугры пучения, полигональные формы рельефа, образованные жильными льдами, пятна-медальоны и многие другие).

Геоботанические методы помогают установить взаимосвязь между растительным покровом и его субстратом, на котором он формируется (почвой и подпочвой).

Геоботаническими методами исследования в комплексе с другими методами устанавливается распространение характерных растительных сообществ, целый ряд криогенных явлений, протекающих в породах: льдонасыщенность, наличие таликов, типы СТС и СМС и др.

Аэрометоды (аэрофотосъемка и аэровизуальные наблюдения) весьма эффективно применяются при инженерно-геокриологических исследованиях значительных площадей, как правило, труднодоступных для наземного изучения. Произведя предварительное дешифрирование контактных отпечатков, можно выделить на исследуемой территории характерные ландшафты и эталонные (опорные) участки, выделенные по геоморфологическим и геоботаническим признакам. Масштаб контактных отпечатков должен быть в два раза больше масштаба проводимой геокриологической съемки. Хорошо поддаются дешифрированию такие важные для геокриологических исследований элементы, как полигональные формы рельефа, термокарст, бугры пучения, наледи, снежники, пятна-медальоны, каменные кольца и многоугольники, солифлюкционные образования и др.

Геологоразведочные методы посредством закопушек, расчисток, канав, дудок, шурфов и скважин дают возможность изучить состав, строение и свойства мерзлых пород непосредственно в натуре, а в лаборатории путем анализирования представительных проб-монолитов.

Горные выработки и скважины в мерзлых породах целесообразно проходить в период с отрицательными температурами воздуха, т. е. до начала формирования СТС. При этих условиях обеспечивается достаточно продолжительная возможность изучить породы в их ненарушенном состоянии и без применения дорогостоящих крепежных и гидроизоляционных работ.

Проходить горные выработки в мерзлых породах наиболее целесообразно шпуро-взрывным способом, позволяющим получить для лабораторных исследований монолиты любых размеров. При проходке шурфов в летнее время необходимо предотвращать интенсивное протаивание СТС в месте проходки выработки путем отвода поверхностных и надмерзлотных вод, крепления устья шурфа на глубину, превышающую СТС, и забивкой пазух между крепью и породой термогидроизоляционным слоем (глиной и торфом).

Во избежание образования термокарстовых очагов на месте заброшенных шурфов последние необходимо тщательно засыпать и проводить послойную трамбовку и термоизоляцию с поверхности.

Бурение скважин для целей инженерно-геокриологической съемки, как правило, производят на глубину 15—25 м, обычно соответствующую подошве слоя с годовыми теплооборотами. Скважины диаметром 75—100 мм целесообразно проходить вращательным бурением «всухую» или с продувкой забоя сжатым охлажденным воздухом. При бурении таким способом можно получать хорошие монолиты в виде керна, нарушенного лишь по периферии, применяя специальные наконечники в виде особо заправленных коронок и армированных ложек.

При механическом бурении скважин в мерзлых породах необходимо соблюдать следующие условия: 1) температуру промывочной жидкости поддерживать ниже температуры проходимых мерзлых пород; 2) при авариях и вынужденных остановках не допускать замерзания промывочной жидкости; 3) защищать устье скважины от размыва промывочной жидкостью; 4) следить за концентрацией промывочной жидкости, поскольку разрушающее воздействие соли на лед — цемент возрастает по мере увеличения концентрации промывочного раствора.

При бурении в мерзлых породах хорошие результаты дает продувка сжатым и охлажденным воздухом. Скорость бурения при этом увеличивается от 2 до 6 раз по сравнению бурением с промывкой, а термическое состояние пород почти не нарушается.

Гидрогеологические наблюдения выполняют для установления характера связи и взаимодействия между мерзлыми подошвами и подземными водами и для выявления условий водообмена последних с поверхностью (условия их питания, характер движения, области разгрузки).

При проведении гидрогеологических наблюдений кроме родников и колодцев обследуют также болота, озера и реки, изучая дебит подземных и поверхностных вод, их взаимосвязь, химический состав, температуру, состав водовмещающих и водоупорных пород и пр. Одновременно проводятся наблюдения за режимом и динамикой СТС, СМС и снежного покрова, определяются мощность мерзлых толщ и их прерывистость в разрезе и по площади, температура пород и подземных вод, виды таликов и их генезис, характер полыней, наледей, бугров пучения, свойства подземных льдов, интенсивность термокарста и пр.

Геофизические методы изучения мерзлых пород основаны на резких различиях их физических свойств.

Мерзлые дисперсные породы, содержащие подземный лед и незамерзшую воду, обладают вследствие этого физическими свойствами, отличными от пород немерзлых того же литолого-генетического состава: повышенным удельным электросопротивлением, резко отличными диэлектрическими постоянными, скоростью прохождения продольных волн и др.

Геофизические методы исследования мерзлых толщ позволяют устанавливать их верхнюю и нижнюю поверхности, мощность, прерывистость наличия таликов, залежи подземных льдов и другие криогенные особенности.

В настоящее время при геокриологических исследованиях из геофизических методов наиболее широко используют методы электрометрии и термометрии: вертикальное электрозондирование (ВЭЗ), электропрофилирование (ЭП) и электротермокаротаж. Электрометрические методы особенно успешно применяются при разведке и картировании залежей жильных подземных льдов, установлении термокарста, таликов и др.

Температурные наблюдения занимают важное место во всех геокриологических исследованиях. Изучение температурного поля мерзлых пород и его динамики совершенно необходимо при решении вопросов происхождения, формирования и дальнейшего развития этих пород. Кроме того, как известно, от теплового состояния мерзлых пород в большой степени зависят их прочностные свойства, особенно в интервалах температур, близких к нулю (минус 0,2—1°).

Изучение мерзлых пород, их температуры и сопутствующих им криогенных явлений связано с фактором времени, а потому все исследования должны опираться на материалы, полученные в результате длительных стационарных наблюдений, проведенных в натуре. Полученные материалы позволят с наибольшей вероятностью судить о динамике мерзлых толщ и изменениях свойств пород во времени; они могут служить надежной эмпирической основой при составлении инженерно-геокриологических прогнозов для освоения новых площадей.

Для температурных наблюдений по возможности используют все скважины, пройденные при инженерно-геокриологической разведке, но при обязательном условии, чтобы каждая из скважин успела «выстояться», т. е. принять истинную температуру пород, нарушенную при бурении. Сроки «выстойки» скважин зависят от многих причин и составляют от нескольких суток до нескольких лет.

В зависимости от конкретных задач исследований задают специальные температурные скважины определенной глубины на характерных участках и элементах рельефа: террасах, склонах разной ориентации, водоразделах, берегах водоемов и водотоков, а также вблизи существующих сооружений и зда-

ний, дорог, насыпей, плотин и т. д. Целями исследований определяются и сроки наблюдений.

Наибольшую ценность для температурных наблюдений представляют скважины, не вскрывшие водоносных горизонтов и пройденные без промывки.

При длительных стационарных наблюдениях скважины специально и надежно оборудуют: обсаживают прочными и нержавеющими трубами на глубину не менее двойной-тройной мощности СТС; выступающую над землей часть трубы тщательно изолируют и закрывают плотной деревянной пробкой, затрубное пространство плотно забивают глиной. Температуру в скважинах измеряют «заленивленными» ртутными термометрами с ценой деления 0,2°, термопарами электротермометрами сопротивления и полупроводниковыми термисторами.

Опускать связки термометров на разных тросах не рекомендуется. Для измерения температуры в скважинах глубиной 15—25 м пользуются одновременно несколькими термодатчиками, соединенными в гирлянду; с глубины 20 м измерения обычно производят одиночными датчиками. Во время выдержки термодатчиков скважина должна быть закрыта пробкой. Выдержка считается достаточной, когда разность между последовательными отсчетами становится меньше $\pm 0{,}05°$. Время, прошедшее после опускания термометра в скважину и до начала измерения температуры, должно в 5—10 раз превышать время тепловой инерции термометра. Скорость подъема термометра назначают, исходя из его тепловой инерции.

Процесс измерения температуры одним термометром рекомендуется начинать сверху, чтобы избежать перемешивания воздуха в скважине и ускорить момент установления температурного равновесия между термометром и средой.

При изучении влияния снежного и растительного покровов на температурный режим мерзлых толщ рекомендуется проводить наблюдения одновременно на трех различных, но близко расположенных участках в одинаковых природных условиях: первый участок с ненарушенными покровами; второй — без снежного покрова; третий — без снежного и растительного покровов.

Представительные пробы, как и при опробовании любых полезных ископаемых, отбирают различными способами: точечным, монолитным, бороздковым, задирковым и валовым. Помимо числовых и качественных показателей физических и механических свойств дисперсных пород, которые определяются при обычных инженерно-геологических исследованиях, для мерзлых пород необходимо определять суммарную (весовую) влажность — льдистость, объемный вес монолита в целом и отдельно его минеральных прослоек, количество незамерзшей воды, влажность — льдистость минеральных прослоек, структуру подземного льда в породах, а также временное сопротивление сжатию при различных значениях отрицательных температур, силу сцепления, коэффициенты оттаивания и уплотнения, смерзаемость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакакин В. П. Основы ведения горных работ в условиях вечной мерзлоты. М., Металлургиздат, 1958, 231 с.
2. Втюрина Е. А., Втюрин Б. И. Льдообразование в горных породах. М., «Наука», 1970, 279 с.
3. Доклады на Международной конференции по мерзлотоведению. М., Изд-во АН СССР, 1963, 259 с.
4. Докучаев В. В. Расчет фундаментов на вечномерзлотных грунтах по предельным состояниям. Л., Стройиздат, 1968, 120 с.
5. Достовалов Б. Н., Кудрявцев В. А. Общее мерзлотоведение. Изд-во МГУ, 1967, 403 с.
6. Жуков В. Ф. Предпостроечное протаивание многолетнемерзлых горных пород при возведении на них сооружений. М., Изд-во АН СССР, 1958, 147 с.
7. Иванов Н. С. Теплообмен в криолитозоне. М., Изд-во АН СССР, 1962, 198 с.
8. Лукьянов В. С., Головко М. Д. Расчет глубины промерзания грунтов. М., Трансжелдориздат, 1957, 164 с.
9. Основы геокриологии (мерзлотоведения). Ч. I, II. М., Изд-во АН СССР, 1959, 459 с. 366 с.

10. Павлов А. В. Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М., «Наука», 1965, 254 с.
11. Полевые геокриологические (мерзлотные) исследования. М., Изд-во АН СССР, 1961, 423 с.
12. Порхаев Г. В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. М., «Наука», 1970, 208 с.
13. Пузаков Н. А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. М., Автотрансиздат, 1960, 168 с.
14. Сумгин М. И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Владивосток, 1927, 402 с.
15. Сумгин М. И., Качурин С. П. и др. Общее мерзлотоведение. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1940, 340 с.
16. Строительные нормы и правила. Ч. II. Разд. Б, Гл. 6. Основание и фундаменты зданий и сооружений на вечномерзлотных грунтах. Нормы проектирования. СНиП II-Б. 6-66. М., Госстройиздат, 1967, 31 с.
17. Ушкалов В. П. Исследование работы протаивающих оснований и их расчет по предельным деформациям сооружений. М., Изд-во АН СССР, 1962, 220 с.
18. Хакимов Х. Р. Вопросы теории и практики искусственного замораживания грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1957, 191 с.

Глава девятая

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕЛИОРАЦИЯ ПОРОД

1. НАЗНАЧЕНИЕ МЕЛИОРАЦИИ ПОРОД

Назначение технической мелиорации (*melioratio* (лат.) — улучшение) состоит в регулировании и преобразовании состояния и свойств пород в заданном направлении. Техническая мелиорация представляет собой учение о качественных преобразованиях пород и является новым прогрессивным направлением в современном грунтоведении.

Применяемые способы мелиорации позволяют изменять химико-минералогический и гранулометрический состав, структуру кристаллической решетки минералов, строение сольватной оболочки коллоидных частиц, характер связей между минеральными частицами, степень монолитности и физико-механические свойства пород. Изменения состава, структуры и состояния породы влекут за собой изменение ее физико-механических свойств. Таким образом, человек способен искусственно регулировать и управлять состоянием и свойствами пород.

В зависимости от практических целей некоторые (нежелательные) свойства пород можно подавлять или нейтрализовать, а другие (желательные) усиливать или создавать вновь. Отдельные способы мелиорации производят столь глубокие и коренные изменения в породе, что она полностью или почти полностью утрачивает свои природные свойства. Особенно активно и глубоко изменяют породу химические и физико-химические воздействия, сопровождаемые образованием новых минеральных соединений, структур и физико-механических свойств. Например, сыпучие пески в результате двухрастворной силикатизации превращаются в камнеобразную монолитную породу типа песчаника с величиной временного сопротивления сжатию до 60 кгс/см². Глинистые породы после обжига каменеют, достигают высокой механической прочности (до 80—120 кгс/см² при сжатии) и необратимо утрачивают свойства пластичности, набухаемости, размокаемости и др.

Применением современных способов мелиорации достигаются следующие улучшения пород: 1) придание монолитности массиву скальных пород, разбитых трещинами; 2) повышение связности, цементирование раздельнозернистых пород; 3) окаменение связных и других рыхлых пород; 4) понижение водопроницаемости и газопроницаемости; 5) уплотнение, повышение несущей способности; 6) повышение морозо- и раствороустойчивости, в том числе водоустойчивости; 7) изменение консистенции связных пород; 8) понижение коррозийности пород; 9) уменьшение пылимости глинистых пород.

Техническая мелиорация пород применяется в промышленном, гражданском, гидротехническом, дорожном, ирригационном, горном, военном и других видах строительства, во всех тех случаях, когда есть необходимость в искусственном изменении инженерно-геологических свойств пород, являющихся основанием, средой или материалом сооружений.

Техническая мелиорация пород применяется для решения следующих задач: 1) улучшения качества оснований зданий и сооружений, а также дорожных и аэродромных покрытий; 2) повышения плотности и устойчивости грунтов в теле земляных сооружений: плотин, дамб, дорожных и других строительных насыпей; 3) улучшения разрабатываемости мерзлых пород; 4) предотвращения притоков подземных вод в шахты, штольни, тоннели, карьеры, котлованы, траншеи и другие выработки; 5) уменьшения потерь воды на фильтрацию из каналов, прудов и водохранилищ; 6) осушения территорий; 7) создания подземных хранилищ для нефти, газа и других флюидов; 8) закрепления плывунов, сыпучих и развеваемых песков; 9) борьбы с просадками, морозным пучением, оползнями, карстом и другими нежелательными геологическими процессами и явлениями.

Работы по технической мелиорации пород осуществляются по специальным проектам, каждый проект должен получить соответствующее инженерно-геологическое и экономическое обоснование. Он должен быть обеспечен всеми исходными инженерно-геологическими данными, необходимыми для проектирования объемов закрепляемых пород, технологии мелиорации, расчетов оборудования, расхода материалов и пр. При этом учитывается специфика каждого способа мелиорации и его особые требования к освещению инженерно-геологических условий местности.

Для инженерно-геологического обоснования проекта мелиорации пород используются результаты инженерных изысканий, выполненных на строительной площадке в связи с проектированием строительства здания или сооружения.

II. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПОРОДАХ КАК ОБЪЕКТАХ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕЛИОРАЦИИ

Объектами мелиорации служат все породы, нуждающиеся в улучшении состояния и свойств. К мелиорированию пород нужно подходить с позиций современных представлений о природе их прочности, деформируемости и пр. Для целей мелиорации породы удобнее разделять по характеру внутренних связей между минеральными частицами и соответственно по характеру деформируемости на три основные группы: а) скальные породы с жесткими кристаллизационными связями; б) связные породы с преобладанием водно-коллоидных связей; в) раздельнозернистые, несвязные породы.

Породы с жесткими связями (скальные породы). Среди пород с жесткими связями мелиорируются обычно дислоцированные, выветрелые, закарстованные разности с целью придания им монолитности и водонепроницаемости, повышения их механической прочности. При этом применяются такие способы мелиорации, как цементация, глинизация, битумизация замораживание и др.

Связные породы с преобладанием водно-коллоидных связей. Для связных глинистых пород применяются следующие способы мелиорации: электроосмос, электрохимическое закрепление, прогрев, обжиг, замораживание (временное закрепление), однорастворная силикатизация, смолизация (для лёссовых пород), ожелезнение, осолонцевание, применение гигроскопических солей, добавки вяжущих материалов,гранулометрические добавки, гравитационное, сейсмическое, свайное уплотнение, трамбование, укатка и пр.

Для связных мягких органогенных пород применяются: замораживание, электроосмос, электрохимическое закрепление, гравитационное уплотнение пригрузкой, водопонижение и осушение с применением дренажей, гранулометрические добавки и др.

Раздельнозернистые породы (пески, гравий, галечник, валуны). Мелиорация раздельнозернистых пород осуществляется в целях уменьшения водопроницаемости, повышения связности, умень-

шения подвижности, придания породе монолитности, создания новых структур, уменьшения пористости, повышения плотности, увеличения сопротивления сжатию и сдвигу.

Указанные изменения достигаются применением: двухрастворной и однорастворной силикатизации, цементации, холодной битуминизации, смолизации, ожелезнения, кольматации, поверхностного и глубинного виброуплотнения, трамбования, укатки, гидродинамического обжатия, уплотнения взрывом и сваями, водопонижения и осушения, замораживания, регулирования гранулометрического состава (смеси), добавкой органических вяжущих (грунтосмеси) и др.

III. СПОСОБЫ МЕЛИОРАЦИИ ПОРОД

Способы мелиорации классифицируются по разным признакам. В зависимости от характера воздействия на породу они делятся на механические, физические и химические; по времени действия — на долговременные и кратковременные. При классификации основных способов мелиорации пород они группируются в зависимости от характера мелиоративного воздействия на породы, при этом указываются назначение и области применения способов мелиорации.

1. УКРЕПЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

В дорожном строительстве широко используются способы улучшения свойств песчано-глинистых пород путем искусственного регулирования их гранулометрического состава и получения оптимальных грунтовых смесей. В табл. 117 приведен фракционный состав (в %) оптимальных смесей для различных условий. Свойства таких смесей в значительной мере зависят от химико-минералогического состава и степени дисперсности глинистой фракции.

Таблица 117

Состав оптимальных песчано-глинистых смесей (в %)

Размер фракции, мм	Зона недостаточного и нормального увлажнения		Зона избыточного увлажнения	
	тип $А_1$	тип $А_2$	тип $Б_1$	тип $Б_2$
2,0—0,25	45—60	20—45	45—70	25—45
0,25—0,05	10—20	20—40	15—30	25—55
0,05—0,005	15—35	15—35	15—25	15—25
$<$ 0,005	6—12	8—14	3—8	8—10

2. УКРЕПЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМ УПЛОТНЕНИЕМ. ВИБРОУПЛОТНЕНИЕ

Виброуплотнение применяется для повышения устойчивости преимущественно песчаных пород. Под влиянием вибрации минеральные частицы песка испытывают колебательные движения; при этом происходит перемещение зерен и достигается их более плотная укладка. Степень плотности песков D приближается к единице. Различают поверхностное и глубинное виброуплотнение.

Поверхностное виброуплотнение песков достигается при помощи вибрирующей плиты. Существуют поверхностные вибраторы малой и большой мощности.

Вибраторы малой мощности уплотняют песок на глубину до 20 см, мощные вибраторы уплотняют грунт до глубины 3 м, причем возможно увеличение этой глубины до 5—7 м. Существующие модели мощных поверхностных вибраторов уплотняют за смену до 7000—9000 м² площади при обслуживании одним рабочим.

Вибрирование вызывает не только уплотнение породы, но и перемещение вверх тонкодисперсных примесей и более легкого материала, при вибрировании мелкие пылевато-глинистые и органические частицы как бы «всплывают». Способ поверхностного виброуплотнения применяется для уплотнений оснований и одежды дорог и аэродромов, а также для уплотнения песчаных подушек, дамб, плотин и других насыпей.

Способ глубинного гидровиброуплотнения разработан советскими учеными (Д. Д. Баркан, И. А. Физдель, Г. Э. Параубэк и др.). Глубинное виброуплотнение производится при помощи глубинных вибраторов с применением искусственного увлажнения грунта, оно применяется для повышения несущей способности оснований зданий и сооружений.

При вибрировании уменьшаются силы внутреннего трения между частицами, сопротивление сдвигу падает. Частицы песка, находящиеся только под действием сил тяжести, перераспределяются и занимают наиболее плотное и устойчивое положение, соответствующее минимальному значению пористости. Пески, предварительно уплотненные вибрированием, под штампом сжимаются в 8—10 раз меньше, чем неуплотненные.

Трамбование и укатка. Уплотнение породы трамбованием — последовательными ударами — сопровождается выдавливанием газов и воды, сближением твердых частиц. В результате этого уменьшаются пористость и влажность породы, увеличивается объемная масса, повышается сопротивление сжатию и сдвигу, возрастает несущая способность. Трамбование широко применяется в гражданском, промышленном, дорожном, гидротехническом и других видах строительства для уплотнения различного рода насыпей (подушек, дамб, плотин, валов и пр.), грунтовой одежды, покрытий, экранов и т. п.

Укатка широко применяется при строительстве дорог, при вертикальной планировке местности, устройстве массивов из насыпных пород для строительного освоения и т. п. Для уплотнения пород укаткой применяются самоходные и прицепные катки массой от 8 до 100 т и более.

Уплотнение энергией взрыва (сейсмическое уплотнение). Энергия взрыва применяется для устройства поверхностных и подземных выемок различного назначения, а также для уплотнения пород в массиве. Способ взрывов нашел применение при устройстве тоннелей, штолен, штреков, подземных хранилищ, котлованов, траншей, рвов, колодцев, каналов, водохранилищ, плотин, различных насыпей и т. п.

Энергия взрыва используется не только на выброс пород, но и на их перемещение в сторону и уплотнение без выброса наружу. Кумулятивные взрывы направленного действия применяются при устройстве в глинистых породах подземных емкостей для хранения нефти, бензина, газа, кислот и других флюидов, колодцев для целей водоснабжения, отверстий для набивных свай в целях упрочнения оснований зданий и сооружений и т. п.

Для уплотнения рыхлых лёссовых, глинистых, песчаных и других пород в массиве способ кумулятивного взрыва колонковых зарядов может успешно сочетаться с применением набивных грунтовых, железобетонных и других свай. При помощи кумулятивного взрыва устраивается вертикальное отверстие в массиве грунта, которое затем используется для набивной сваи. По данным Гидроспецфундаментстроя, стоимость одного кубометра лёссовых пород, закрепленного способом грунтовых свай с применением взрыва, составляла около 60% стоимости закрепления термическим способом и лишь 20—25% стоимости закрепления способом силикатизации.

Гравитационное уплотнение рыхлых отложений статической пригрузкой. Способ гравитационного уплотнения пригрузкой применяется для повышения

прочности рыхлых свежеосажденных морских, озерных и речных илов и торфяников. Различают наземное и подводное гравитационное уплотнение.

Наземное уплотнение способом пригрузки применяется для предварительного обжатия и повышения несущей способности рыхлых водонасыщенных торфов, залегающих в основании земляных плотин, дамб, железнодорожных насыпей и других сооружений. Для пригрузки используют песок, гравий или гальку в виде слоя мощностью 2—3 м. Пригрузку следует производить постепенно малыми порциями и с перерывами во времени. Под действием нагрузки из торфа отжимается вода, торф уплотняется, улучшаются его физико-механические свойства, что позволяет уменьшить осадку сооружений.

При строительстве морских, в частности портовых, сооружений на глинистых илах применяется способ подводного гравитационного уплотнения отсыпкой песка, под тяжестью которого иловый осадок уплотняется, дегидратируется и приобретает более высокую прочность. Песок подается рефулером и медленно рассеивается в воде наподобие «песчаного дождя». Скорость отсыпки, толщина подушки и крупность песчаных зерен подбираются с таким расчетом, чтобы исключить возможность нарушения очень слабой естественной структуры илистого осадка.

Для отсыпки рекомендуются мелкозернистые и чистые пески без примесей; нужно, чтобы вода, выдавливаемая из илистого осадка, свободно выходила через тело песчаной подушки и не выносила вместе с собой из ила мелкодисперсные частицы.

Механическое уплотнение массива пород сваями. Все виды свай, погруженные в породу без ее выемки, в какой-то мере оказывают уплотняющее действие на массив породы за счет уменьшения пористости породы вокруг свай на величину, равную суммарному объему тела забитых свай.

Набивные сваи устраивают путем приготовления отверстий в породе и заполнения их более плотным и устойчивым материалом, чем сама порода. В зависимости от состава заполнителя набивные сваи бывают бетонными, железобетонными, песчаными, цементно-песчаными и пр. При помощи набивных свай усиливают рыхлые малопрочные песчаные, торфяно-илистые, глинистые (неустойчивой консистенции) породы в активной зоне оснований сооружений.

3. ЦЕМЕНТАЦИЯ ПОРОД

Различают глубинную и поверхностную цементацию. Глубинная (инъекционная) цементация применяется для закрепления трещиноватых и кавернозных скальных и полускальных, а также крупнопористых гравелисто-галечниковых пород. Мелкопористые песчано-глинистые породы, в которые плохо проникает цементный раствор, не поддаются инъекционной цементации.

Цементация применяется как средство борьбы с притоками воды в горные выработки (временные противофильтрационные завесы); для создания постоянных противофильтрационных завес в гидротехнических сооружениях; для усиления естественных оснований зданий и сооружений; для заполнения карстовых и других пустот; для предохранения оснований от химического разрушения и суффозии; для закрытия пустот за стенками сооружений и пр.

Сущность способа состоит в том, что в породу через инъекторы, смонтированные в буровых скважинах, под давлением нагнетается цементный раствор, который заполняет трещины и пустоты, связывается с породой, твердеет и придает ей монолитность и водонепроницаемость.

В кавернозных скальных породах при большой скорости движения подземных вод в качестве вспомогательного способа дополнительно применяется горячая битумизация.

Для цементации пород применяются тампонажные портландцементы и шлако-портландцементы. Для цементации тонкотрещиноватых пород (с шириной трещин до 0,5 мм) применяются цементы повышенной тонкости помола.

Цементация не дает эффекта при наличии подземных вод, сильно агрессивных по отношению к цементу. При значительных скоростях подземных вод применяются быстросхватывающие глиноземистые цементы или портландцементы с добавками хлористого кальция, ускоряющего схватывание цемента.

При значительной трещиноватости и кавернозности и большом водопоглощении пород применяются различные инертные добавки к цементу: песок, суглинок, глина, зола, шлак и другие материалы. Пригодность добавок должна быть подтверждена результатами лабораторных исследований и опытной цементации. Сорт, марка цемента, состав инертных и химических добавок, консистенция раствора устанавливаются проектом в зависимости от назначения цементации, природных условий и степени агрессивности подземных вод.

Консистенция цементного раствора зависит от величины заполняемых пор и трещин и определяется величиной удельного водопоглощения. Отношение цемента к воде по весу обычно колеблется в пределах от 1 : 12 до 1 : 0,6. Чем больше удельное водопоглощение, тем гуще должен быть раствор. При цементации широких трещин растворами с пластифицирующими добавками отношение цемента к воде может быть повышено до 3 : 1. Чем тоньше трещины и пустоты, тем меньше должна быть концентрация раствора, этим достигается более тщательное заполнение пустот. При очень тонкой трещиноватости допускается отношение цемента к воде до 1 : 30.

Радиусы закрепления пород способом цементации зависят от степени трещиноватости пород и технологии цементации. Они колеблются в широких пределах — от 1 до 10 м. Цементный раствор может распространяться в сторону от нагнетательной скважины иногда более чем на 100 м. Расстояния между цементационными скважинами рассчитывают по величине удельного водопоглощения, для надежности закрепления большей частью их принимают от 1 до 4 м (т. е. меньше радиусов распространения цементных растворов).

Цементный раствор нагнетают в скважину через инъекторы гидравлическим (насосами) или пневматическим (сжатым воздухом) способом.

Состав инъекционного оборудования (растворомешалки, насосы, инъекторы, напорные шланги и др.) определяют с учетом водопроницаемости пород, состава и консистенции раствора, величины давления. В качестве цементационных насосов СНиП III-Б.5-62 рекомендуют двухпоршневые грязевые насосы двухстороннего действия, развивающие давление от 30 до 80 ат, с расходом от 100 до 300 *л/мин*, а для очень густых растворов с песком при давлении, не превышающем 6—8 ат, — диафрагмовые насосы.

Работы по цементации состоят из нескольких этапов. Предварительно определяют степень трещиноватости пород и величину удельного водопоглощения. Затем проводят опытные работы с целью установления радиусов закрепления и расстояний между цементационными скважинами; только после этого бурят цементационные скважины, а затем осуществляют цементацию по зонам.

При бурении в неустойчивых породах применяются обсадные трубы. Пробуренные скважины перед цементацией промывают водой или продувают воздухом, иногда применяют специальную промывку трещин и пор пород под давлением. Гидравлическое испытание скважины для определения величины водопоглощения цементируемых пород совмещают с промывкой или производят непосредственно вслед за промывкой. Исходя из требований проекта, определяют параметры гидравлического опробования скважин: продолжительность нагнетания, величину давления, способ цементации (восходящими или нисходящими зонами), величину цементируемых зон, глубину расположения инъекторов, режим цементации.

Величину удельного водопоглощения выражают в литрах в минуту на 1 пог. м длины скважины и на 1 м напора водного столба, ее определяют по формуле

$$q = \frac{Q}{Hl},$$

где q — удельное водопоглощение;

Q — суммарное поглощение воды скважиной (в литрах) за время непрерывного испытания t, мин;

H — постоянное давление при испытании, м. вод. ст.;

l — длина испытываемого участка скважины, м.

Раствор нагнетают непрерывно до отказа, признаком которого служит снижение расхода раствора до 0,5 л/мин, в течение 20 мин при заданном предельном давлении. Режим нагнетания раствора должен обеспечивать: сохранность породы от выпирания, получение наибольшего радиуса цементации, надлежащую плотность цементного наполнителя; нельзя допускать утечки нагнетаемого раствора за пределы зоны, подлежащей цементации.

Контроль за качеством цементации осуществляют при помощи контрольных скважин, а также путем проверки технической документации (буровых, цементационных журналов, результатов лабораторных анализов и др.). Выполненные работы по цементации оформляют соответствующим актом.

В соответствии с требованиями СНиП III-Б.5-62. (Стабилизация и искусственное закрепление грунтов), работы по цементации пород осуществляются по специальному проекту. В состав проектной документации входят: а) конструктивные чертежи сооружения с показанием габаритов противофильтрационных завес по глубине и ширине; б) чертежи с показанием расстояний между скважинами, рядами противофильтрационных завес и расположения контрольных скважин; в) краткие данные о геологическом строении, гидрогелогии площадки и агрессивности грунтовых вод; г) чертежи специального инъекционного оборудования и приспособлений, не предусмотренных в существующих пособиях и инструкциях; д) результаты лабораторных исследований по подбору состава смесей; е) технические условия на производство цементационных работ, в которых отражается специфика условий данного объекта с учетом назначения проектируемых работ.

Особо учитывается следующее:

1. Объем инженерно-геологических изысканий и состав первичной документации для обоснования проекта определяются на основании действующих инструктивных указаний соответствующих ведомств.

2. Технические условия на производство цементационных работ составляются с учетом специально проведенной опытной цементации (на данном объекте) или на основе существующего опыта в аналогичных условиях. Отказ от производства опытных работ должен быть обоснован в проектном задании.

3. При определении объема проектно-сметной документации учитываются стадия проекта и общие указания II части СНиП.

При проектировании и производстве работ по цементации следует руководствоваться действующими нормативными и техническими указаниями:а) строительные нормы и правила, часть III, раздел Б, глава 5 «Стабилизация и искусственное закрепление грунтов». Правила организации, производства и приемки работ (СНиП III-Б.5-62), б) технические условия (ТУ) на производство цементационных работ соответствующих ведомств.

4. ГЛИНИЗАЦИЯ ПОРОД

Способ глинизации состоит в нагнетании под давлением в породу через систему скважин глинистого раствора удельного веса 1,2—1,4. С целью отжима воды из раствора и ускорения оседания глинистых частиц к раствору прибавляют коагуляторы и увеличивают давление при нагнетании. При повышении давления до 30 кгс/см^2 и более вода отжимается из глинистого раствора, происходит опресовка глинистого материала в трещинах и пустотах. Последующее разбухание глинистого осадка улучшает тампонирование трещин и пустот. Глинизация без добавок цемента изменяет только проницаемость породы, но не повышает ее механическую прочность.

Стоимость работ по глинизации ниже, чем работ по цементации; кроме того, глинизация не ограничивается распространением агрессивных подземных вод, обычно она применяется в тех случаях, когда большой расход цемента экономически невыгоден. Применение глинизации дает хорошие результаты при тампонировании больших трещин и пустот, при наличии глинистого или другого рыхлого заполнителя в выветрелых породах. Она применяется для тампонирования сильно фильтрующих трещиноватых, кавернозных и закарстованных скальных пород и гравийно-галечниковых отложений.

Для глинизации можно использовать не все виды глинистых пород. Жирные высокопластичные тонкодисперсные гидрофильные глины монтмориллонитового состава плохо отдают воду, а иногда обладают тиксотропными свойствами. Для глинизации наиболее подходят тощие глины или суглинки каолинитового или гидрослюдистого состава.

Состав и свойства глинистого раствора можно регулировать. В случае применения тощин глин с этой целью вводят диспергаторы (соду, сернистый натрий и др.). В случае жирных глин используют коагуляторы ($CaCl_2$, $Ca(OH)_2$ и др.). Регулирование достигается также специальным подбором песчано-глинистых смесей с различной концентрацией коллоидов.

Технология глинизации и состав оборудования во многом сходны с цементацией. В последнее время глинистые растворы все чаще стали заменять смешанными глинисто-цементными, глинисто-известковыми и другими комбинированными растворами.

Глинисто-цементные растворы имеют ряд преимуществ перед глинистыми. Они не расслаиваются, более однородны, дают высокий выход камня, не размываются водой. Наряду с приданием породе водонепроницаемости глинисто-цементные растворы прочнее, чем глина, связывают агрегаты и блоки породы, создавая монолитность массива.

Для глинисто-цементных растворов используют и высокопластичные разности глин (бентонитовые и монтмориллонитовые). Глинисто-цементные растворы применяются для создания противофильтрационных завес, водонепроницаемых стенок, для усиления оснований зданий и сооружений, для заполнения стыков между зданиями и сооружениями и стенками котлованов, для тампонирования пустот за обделкой тоннелей и в других случаях, когда большой расход цемента экономически невыгоден.

Глинизация дает наилучшие результаты при тампонировании безводных трещиноватых и кавернозных пород, обладающих удельным водопоглощением от 0,1 до 100 л/мин. Применение глинисто-цементного раствора позволяет тампонировать также обводненные трещиноватые, кавернозные скальные и гравелисто-щебенистые породы и галечниковые отложения с коэффициентом фильтрации свыше 100 м/сут.

5. ЗАМОРАЖИВАНИЕ ПОРОД

При искусственном замораживании водонасыщенных пород вода, заключенная в порах и трещинах, превращается в лед, порода цементируется льдом, приобретая при этом новое состояние и свойства, становится водонепроницаемой и значительно более прочной.

В состав оборудования для замораживания входят: замораживающие колонки, холодильная установка, включающая холодильные машины, контрольно-измерительные приборы, наружная рассольная сеть и пр. Технические требования к оборудованию и монтажным работам изложены в СНиП III-Б.5-62. Охлаждение пород производят при помощи системы замораживающих колонок, в которых циркулирует охлажденный рассол.

Замораживание применяется как средство борьбы с обводнением шахт, тоннелей, котлованов и других горных выработок; для временного закрепления плывунных и неустойчивых пород, вскрываемых выработками; для устройства временных мерзлотных стен и противофильтрационных завес.

В зависимости от инженерно-геологических условий и целевого назначения замораживания видоизменяется его технология, применяются способы параллельного, последовательного, выборочного и дифференцированного замораживания.

Преимущество замораживания по сравнению с другими способами закрепления пород состоит в том, что замораживать можно все типы водонасыщенных пород на глубину до нескольких сотен метров, тогда как при других способах глубина закрепления ограниченна. Поэтому замораживание широко вошло в строительную практику.

Работы по замораживанию пород выполняются по специальному проекту, который должен иметь соответствующее инженерно-геологическое обоснование.

Процесс и технология замораживания пород, а также методика и организация работ во многом зависят от инженерно-геологических условий. На процесс замораживания существенно влияют такие факторы, как гранулометрический и химико-минералогический состав пород: их физико-технические свойства (влажность, консистенция, температура, теплопроводность, пористость, водопроводимость и пр.); химический состав, температура и скорости движения подземных вод; условия залегания пород, их мощности, обводненность, закарстованность и т. д. Перечисленные выше инженерно-геологические факторы определяют глубину, скорость и радиус замораживания, температуру замораживающей жидкости, расходы холода, расстояния между скважинами, прочность замороженных пород и пр.

В соответствии с СНиП III-Б.5-62, материалы инженерно-геологических изысканий для объектов, на которых проектируется искусственное замораживание грунтов, должны содержать: а) физико-механические и теплофизические характеристики грунтов (объемный вес, пористость, влажность, коэффициент фильтрации и коэффициент теплопроводности в талом и мерзлом состоянии); б) данные о естественной температуре, засоленности, скорости и направлении фильтрации грунтовых вод; в) данные о наличии горизонтов грунтовых вод и взаимной их гидравлической связи, а также связи их с открытыми водоемами.

В качестве охлаждающих рассолов используются концентрированные растворы солей, чаще хлористых ($CaCl_2$, NaCl, $MgCl_2$), имеющих низкую температуру замерзания. Для рабочей температуры не ниже —45° обычно применяют раствор хлористого кальция. Производителем холода являются хладоагенты (аммиак, углекислота), которые отнимают тепло от рассола. Рассолы охлаждают в холодильных установках при помощи испарения жидкого аммиака.

Расход холода на замораживание пород определяется следующей общей формулой:

$$q = W \cdot \gamma C\,(t_2 - t_1),$$

где q — количество холода, ккал;
W — объем замораживаемой породы, м³;
γ — плотность породы, кг/м³;
C — удельная теплоемкость породы, ккал/кг · град;
t_1 — начальная температура породы или воды, град;
t_2 — конечная температура охлаждения, град.

Для замораживания бурят вертикальные, а в случае надобности наклонные и горизонтальные скважины. Диаметр скважин должен на 50 мм превышать диаметр муфты замораживающей колонки. Бурение скважин в зависимости от их глубины и особенностей геологического разреза производят ударным, вращательным, турбинным и комбинированным способами. Вертикальные скважины глубиной более 75 м, особенно в скальных породах, бурят турбинными и роторными установками, наклонные скважины — преимущественно станками вращательного бурения.

В пробуренную скважину погружают замораживающие колонки с закрытым нижним концом, а в них — питающие трубы меньшего диаметра. Нижний открытый конец питающей трубы устанавливают на 0,4—0,5 м выше нижнего конца замораживающей колонки. Через питающие трубы в замораживающей колонке происходит циркуляция охлажденного рассола. Размеры внешних замораживающих и внутренних питающих труб колонки зависят от количества рассола, пропускаемого в единицу времени.

При бурении замораживающих скважин очень опасно их искривление, оно может вызвать образование «окон» незамороженного грунта, через которые при проходке выработок могут прорываться подземные воды и плывуны.

Величина радиусов замораживания зависит от температуры охлаждающих растворов, продолжительности замораживания, состава и физического состояния пород, в частности — от их теплопроводности, скорости движения подземных вод и пр. Например, в условиях Москвы величина радиусов замораживания в среднем принималась от 1 до 2,5 м.

Для расчета времени замораживания Х. Р. Хакимов (1961) предложил формулу

$$\tau = \frac{1}{2\lambda_1 t_т}\left[(1-n)\,W\gamma i\sigma + C_1\gamma_1 t_e + C_2\gamma_2 t_e\left(\frac{a^2-1}{2\ln a}-1\right)\right] x$$

$$x\left(\xi^2 \ln\frac{\xi}{r} - \frac{\xi^2 - r_0^2}{2}\right) + \frac{c_1\gamma_1}{2\lambda}\cdot\frac{\xi^2 - r_0^2}{2},$$

где τ — время замораживания породы вокруг трубы, ч;
$t_т$ — температура породы, непосредственно прилегающей к поверхности замораживающей трубы, град;
λ_1 — теплопроводность мерзлой породы, ккал/м · ч · град;
n, W — пористость и начальная влажность породы, доли единицы;
γ — плотность породы, кг/м³;
i — льдистость (отношение массы льда к массе всей воды в единице объема породы), доли единицы;
σ — теплота кристаллизации воды, ккал/кг;
$C_1\gamma_1$ — объемная теплоемкость мерзлой породы, ккал/м³ · град;
$C_2\gamma_2$ — объемная теплоемкость талой породы, ккал/м³ · град;
t_e — начальная (естественная) температура породы, град;
r_0 — внешний радиус замораживающей трубы, м;
ξ — радиус промерзания породы вокруг трубы, м.

В практике метростроения Москвы, Киева и Ленинграда на замораживание одной шахты или наклонного хода в среднем затрачивается 40—60 дней.

6. ИСКУССТВЕННОЕ ВОДОПОНИЖЕНИЕ И ОСУШЕНИЕ ПОРОД

Искусственное водопонижение и осушение пород применяют для решения следующих технических задач: 1) защиты поверхностных и подземных выработок от затопления подземными водами; 2) отвода грунтовых вод от фундаментов и подвалов зданий и сооружений; 3) осушения местности, предупреждение заболачивания и подпора грунтовых вод; 4) закрепления плывунов (песков, обладающих водоотдачей); 5) упрочнения пород в основании зданий и сооружений, в земляном полотне дорог; 6) предупреждения оползней, оплывания и других деформаций склонов и откосов выработок.

Для решения перечисленных задач в зависимости от конкретных гидрогеологических условий применяют следующие способы водопонижения и осушения пород: 1) открытый водоотлив; 2) водопонижение с помощью системы трубчатых и шахтных колодцев; 3) водопонижение с помощью системы легких и эжек-

торных иглофильтровых установок; 4) поверхностный горизонтальный дренаж; 5) подземный горизонтальный дренаж; 6) подземный вертикальный дренаж из горных выработок; 7) вертикальный дренаж поглощающими колодцами.

Открытый водоотлив применяется для удаления подземных вод, заключенных в раздельно-зернистых и трещиноватых породах, из котлованов, колодцев и траншей при строительных работах, из шахт, штолен и других подземных выработок при проведении горных работ. Водоотлив должен исключать ухудшение свойств грунтов основания, обеспечивать устойчивость откосов выработок и сохранность вблизи расположенных сооружений.

Для сбора и отвода вод устраивают зумпфы, канавы, лотки, трубопроводы. Для строительного водоотлива применяют центробежные, диафрагмовые и поршневые насосы, для откачки воды из шахт используют насосы высокого давления. В соответствии со СНиП III-5.3-62 (§ 4, 5), водосборники и водоподводящие канавы следует располагать за пределами основания сооружения.

Открытый водоотлив часто сопровождается процессами механической суффозии, нарушения естественной структуры пород, явлениями оседания земной поверхности, деформацией откосов. В тех случаях, когда эти процессы и явления вредят строительству, применяют другие способы водопонижения.

Водопонижение с помощью системы трубчатых и шахтных колодцев. Данный способ эффективен для пород с малой остаточной влажностью и коэффициентом фильтрации более 1—2 м/сут. Водопонизительные колодцы снабжают водоприемными фильтрами и располагают по периметру выемки.

Трубчатые колодцы присоединяют через общий трубопровод к насосу, создавая водоотборную завесу, прикрывающую выемку от проникновения грунтовых вод. В глубоких выемках применяют многоярусные системы водопонизительных установок.

Для глубокого водопонижения применяют глубинные насосы, которые устанавливают непосредственно в шахте или скважине. Применение глубинных насосов позволяет значительно понижать уровень подземных вод, не прибегая к системе многоярусных или многоступенчатых откачек с поверхности, которые суживают фронт земляных работ. Глубинные насосы можно устанавливать на заданной глубине и снижать уровни последовательно. Механическая суффозия предупреждается подбором фильтров и режимом откачки. Применение вакуум-колодцев ускоряет водопонижение и повышает эффект осушения, глубинное вакуумирование дает наибольший эффект при коэффициентах фильтрации в пределах от 5 до 0,1 м/сут.

Водопонижение с помощью системы легких и эжекторных иглофильтровых установок. Различают легкие иглофильтровые установки и эжекторные установки для глубинного водопонижения с вакуумированием и без вакуумирования. Водопонижение иглофильтрами без вакуумирования и без электроосушения дает хорошие результаты в песчаных и супесчаных породах с коэффициентом фильтрации более 0,5—1,0 м/сут.

При сочетании иглофильтрового водопонижения с вакуумированием и электроосушением метод эффективен и в породах с более низкими показателями водопроницаемости. Применять вакуумирующие водопонизительные установки рекомендуется в основном при коэффициентах фильтрации примерно от 3—5 до 0,1 м/сут, а в отдельных случаях и при коэффициентах фильтрации более 5 и менее 0,1 м/сут.

Иглофильтровые водопонизительные линии могут быть разной формы: линейные (большой и малой длины), кольцевые, П-образные и др. При водопонижении легкими иглофильтровыми установками на глубину более 4,5—5,0 м применяются два, три и более ярусов иглофильтров. В состав оборудования каждой одноярусной иглофильтровой установки входят иглофильтры, всасывающий коллектор и насосный агрегат.

При водопонижении для строительных целей применяют иглофильтровое оборудование следующих типов: ПВУ-1, ПВУ-2, ИФУ, ЛИУ-3, Бурводстроя и др. (см. Указания по проектированию легких иглофильтровых установок, М., 1955). Иглофильтры обычно погружают в грунт гидравлическим способом. При наличии в составе пород прослоев валунов, крупной гальки, очень плотных глин и других труднопроходимых разностей, не допускающих применения подмыва, иглофильтры устанавливают в буровых скважинах.

Для повышения эффекта осушения пород, характеризующихся пониженной водопроницаемостью (коэффициент фильтрации $< 0{,}5—0{,}1$ м/сут) и слабой водоотдачей, водопонижение системой иглофильтров и скважин сочетают с вакуумированием и электроосушением.

Вакуумированием называют процесс отсасывания воды из пород под действием вакуума. В результате вакуумирования создается дополнительная разность напоров; достигается ускорение осушения и уменьшение высоты остаточного слоя воды; происходит стабилизация породы за счет извлечения под действием вакуума капиллярной воды и уплотнения водонасыщенного грунта под действием фильтрационного давления.

Электроосушение применяется для отсасывания воды из слабоводопроницаемых пород (с коэффициентом фильтрации $< 0{,}1$ м/сут) под действием электроосмотических сил, возникающих при прохождении через породу электрического тока.

Поверхностный горизонтальный дренаж осуществляют системой открытых и закрытых канав, траншей, колодцев, призм и др. Метод применяется для дренирования не только хорошо фильтрующих грунтов, но и влагоемких пород, медленно отдающих воду (плывунных супесей, суглинков, сапропелей, глинистых илов, торфов и др.). В результате осушения и аэрации достигается незначительное упрочнение структуры пород.

Подземный горизонтальный дренаж осуществляют системой дренажных подземных выработок (штолен, штреков, галерей) для осушения массива обводненных пород, расположенных выше выработок. Метод применяется для стабилизации оползневых массивов, при добыче полезных ископаемых подземным и открытым способами на значительной глубине.

Подземный вертикальный дренаж ведут из горных выработок забивными и сквозными дренажными фильтрами, обычными и вакуум-фильтрами.

Метод применяется при подземном строительстве для предупреждения прорыва плывунов в горные выработки, в некоторых случаях целесообразно сочетать его с устройством системы подземного горизонтального дренажа для ускорения и повышения эффекта осушения. Забивные и сквозные дренажные фильтры применяют также для осушения депрессий (подземных котловин) в рельефе водоупоров, заполненных водонасыщенными и плывунными породами. Эффект осушения песчаных плывунов тонко- и мелкозернистого состава значительно повышается при применении вакуум-фильтров как забивных, так и сквозных совместно с установкой аэрирующих (воздушных) скважин. При таком сочетании увеличивается выход воды из толщи плывунных грунтов. В случае наличия выше водоносного горизонта водоупорного перекрытия нагнетание через аэрирующие скважины сжатого воздуха в зону, расположенную выше уровня подземных вод, обеспечивает не только аэрацию пласта, но и создание дополнительного давления на поверхность водоносного горизонта, что активизирует процесс осушения пород.

Вертикальный подземный дренаж можно осуществлять системой поглощающих колодцев. Этот способ применим при наличии ниже дренируемой толщи под водоупором хорошо фильтрующих сухих или не полностью обводненных пород, обладающих необходимой водоприемной способностью. В эти породы через скважины, а еще лучше через шахтные колодцы спускается вода из осушаемого пласта. Применение поглощающих колодцев допустимо лишь при условии, что исключено загрязнение нижележащего водоносного горизонта, исполь-

зуемого для питьевого водоснабжения. Проект водопонижения системой поглощающих колодцев должен быть согласован с органами санитарной инспекции.

Условия применения, проектирование, технология, организация работ по водопонижению и осушению грунтов регламентируются серией нормативных и руководящих документов, приведенных в списке литературы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарик Г. К. Динамическое и статическое зондирование в инженерной геологии. М., «Недра», 1964, 104 с.

2. Винокуров Е. Ф. Строительные свойства моренных грунтов. Минск, Изд-во АН БССР, 1962, 125 с.

3. Сергеев Е. М., Куприна Г. А. Исследование кольматации песков на опытных котлованах. — «Тр. Совещ. по теоретическим основам техн. мелиорации грунтов.». 1961, с. 41—65.

4. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. Авт.: Ю. Г. Трофименко, Л. И. Воробков, А. И. Смирницкий, Л. А. Бенедиктов. М., Госстройиздат, 1964, 43 с.

5. Хакимов Х. Р. Некоторые теоретические основы усовершенствования искусственного замораживания грунтов. — «Тр. Совещ. по теоретическим основам техн. мелиорации грунтов», 1961, с. 34—48.

Глава десятая

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

1. УСТАНОВКИ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПОРОД

Автоматизированная установка НИИОСП с упорами в стенки шурфа применяется для испытаний песчано-глинистых пород в шурфах глубиной до 1,8—2,0 м.

Максимальное вертикальное давление, создаваемое при помощи вертикального гидродомкрата, равно 3,5 кгс/см². Сдвиг поворотного кольца штампа осуществляется гидродомкратами (табл. 118). Общая масса установки 800 кг.

Автоматизированная установка (рис. 84) НИИОСП с упорами из винтовых анкерных свай позволяет проводить испытания как в шурфах, так и на поверхности земли.

Винтовые анкерные сваи представляют собой толстостенные трубы диаметром 74 или 114 мм, длиной 4,2 м. Вертикальное давление — 3,5 кгс/см², масса установки 900 кг.

Таблица 118

Техническая характеристика гидродомкратов

Параметры	Вертикальный гидродомкрат	Горизонтальный гидродомкрат
Наружный диаметр, мм	230	140
Длина, мм	365	760
Площадь плунжера, см²	254	—
Рабочий ход поршня, мм	150	—
Грузоподъемность, т	100	10
Масса, кг	100	30

Комбинированные штампы НИИОСП позволяют наряду со сжатием определять сопротивление грунта сдвигу.

Комбинированный штамп площадью 5000 см² (внешний диаметр 799 мм) состоит из корпуса, поворотного кольца и сдвигающего устройства. Размеры поворотного кольца (мм): внутренний диаметр — 460, внешний диаметр — 650, толщина — 20. Нижняя поверхность поворотного кольца рифленая или гладкая с выступающими лопатками в количестве от 4 до 12. Глубина погружения лопаток в грунт 25 мм.

К о м б и н и р о в а н н ы е у н и в е р с а л ь н ы е ш т а м п ы со сплошной рифленой поверхностью имеют различную площадь: 1250, 2500 и 5000 см². По всей нижней поверхности штампа расположены «зубы» длиной от 5 до 15 мм с углом заострения 30°.

Штампы рассчитаны на вертикальные нагрузки 4, 8 и 12 кгс/см².

Установка Уральского политехнического института для испытания пород пробными нагрузками. Основные узлы установки представлены на рис. 85.

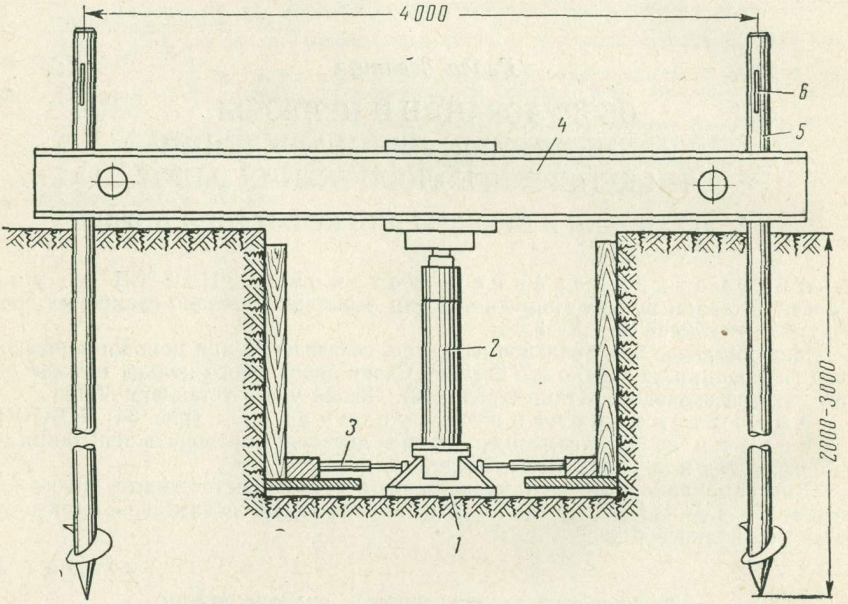


Рис. 84. Автоматизированная установка НИИОСП

1 — комбинированный поворотный штамп; *2* — вертикальный гидродомкрат; *3* — горизонтальный гидродомкрат; *4* — продольная упорная балка; *5* — винтовые анкерные сваи; *6* — отверстие для лома

Давление на прямоугольный или круглый штамп площадью 5000 см² создается домкратом. Время загружения и смену нагрузок можно автоматизировать по определенной программе.

Р ы ч а ж н ы й п р е с с НИАИ предназначен для испытания песчаных и глинистых грунтов пробными нагрузками с поверхности земли.

При транспортировке установка размещается на автомобильном прицепе. При испытаниях можно применять штампы площадью 1000, 2000, 3000 и 4000 см². Пригрузка создается при помощи массы автомашины и прицепа, для чего у краев полуфермы сделаны опорные площадки для колес.

У с т а н о в к а Н о в о с и б и р с к о г о и н с т и т у т а инженеров железнодорожного транспорта (НИИЖТ) сравнительно легко монтируется. Анкерное устройство состоит из двутавровых балок длиной 2 м, вдавленных в углы шурфа. Зимой длину балок можно уменьшить до 1,5 м. Нагрузка на штамп передается от вертикального гидродомкрата. Анкерное устройство выдерживает нагрузку до 20—25 т.

У с т а н о в к а Х а р ь к о в с к о г о и н ж е н е р н о - с т р о и т е л ь н о г о и н с т и т у т а (ХИСИ) с упорами из винтовых анкерных свай пред-

назначена для испытаний пород пробными нагрузками с поверхности земли и в шурфах глубиной до 5 м.

Давление в системе создается ручным насосом и через стабилизатор давлений передается на плунжер домкрата. Осадка штампа определяется прогибометрами, прикрепленными к углам реперной обноски.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Площадь квадратного штампа, см²	5000
Размеры упорной балки, м:	
толщина	0,5
длина	4,8
Диаметр стойки, мм	273
Мощность домкрата, т	100
Максимальное давление, кгс/см²	6

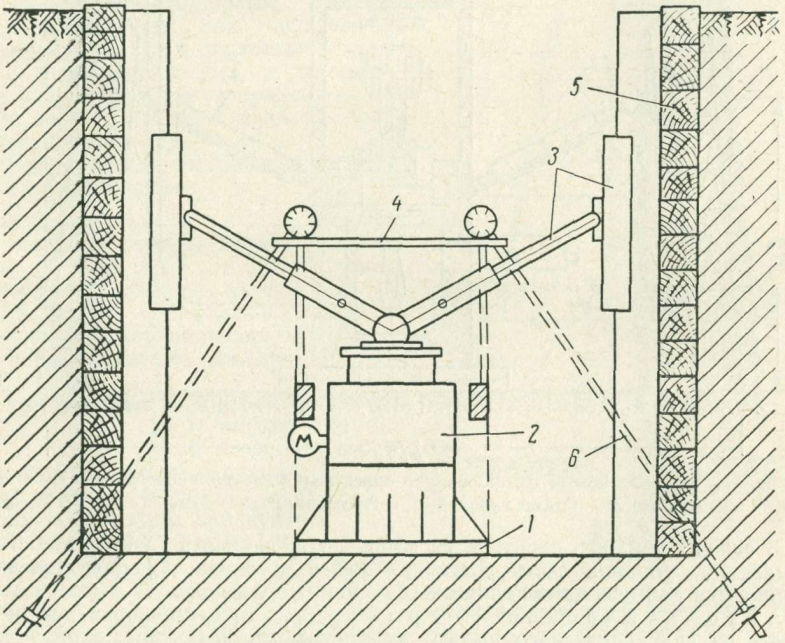


Рис. 85. Установка УПИ

1 — штамп; *2* — гидродомкрат; *3* — подкосная система; *4* — индикаторная установка; *5* — сруб из брусьев; *6* — анкерные свайки индикаторной установки

Стабилизатор рассчитан на поддержание постоянного давления в течение 12 ч.

Автоматизированные установки Института строительства и архитектуры АН БССР разработаны в двух вариантах.

Установка для испытания пород с применением квадратного штампа (рис. 86) состоит из квадратного штампа площадью 5000 см² (70,7 × × 70,7 мм) и толщиной 13 мм (с ребрами жесткости), домкрата мощностью 50 или 100 т; автоматического устройства и упоров в стенки шурфа, которые можно заменить упорами из винтовых анкерных свай.

Осадку штампа определяют прогибомерами или нивелировкой. Точность измерения осадки 0,1 мм.

Установка для испытания пород с применением сферического штампа аналогична вышеописанной. Штамп сферический, диаметром 50 см. Домкрат гидравлический, грузоподъемностью 5 т.

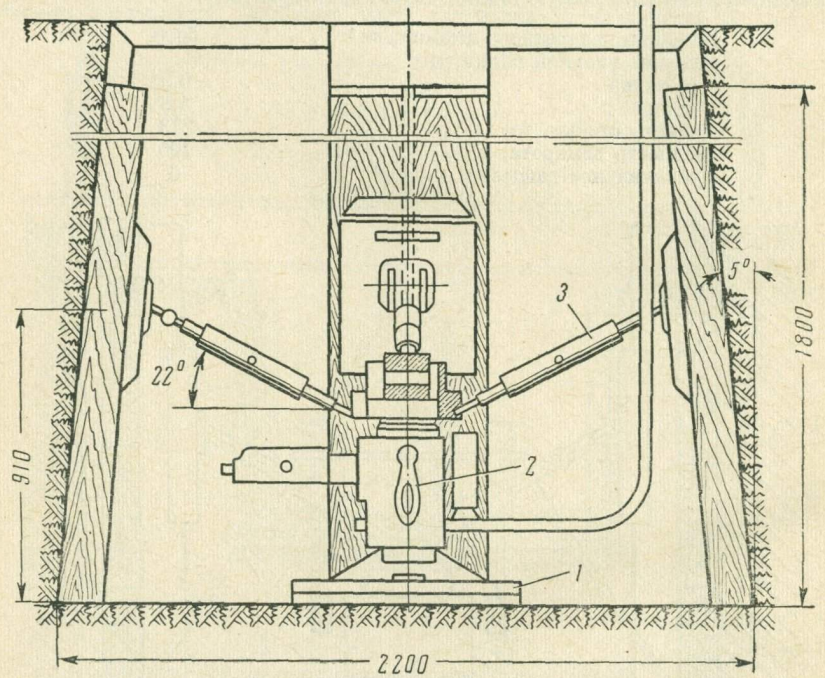


Рис. 86. Автоматическая установка для определения несущей способности грунтов
1 — опорная часть — штамп плоский; *2* — гидродомкрат; *3* — упоры в стенки шурфа

В связи с тем, что нагрузка на сферический штамп в 7—9раз меньше, чем на плоский, упорная часть установки менее массивна. Сферический штамп применяется для испытаний глинистых пород и торфяников.

Автоматическое устройство, применяемое в установках, состоит из гидравлического насоса, механического редуктора, электромотора и блока управления и сигнализации. Гидравлический насос создает давление 200—300 кгс/см². Механический редуктор с передаточным числом 98 на выходе дает 30 об/мин. Электромотор реверсивный, сериесный, типа МУ-320, мощностью 100 в, с числом оборотов 3000 об/мин; питание от аккумулятора напряжением 12—24 в.

УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПОРОД В СКВАЖИНАХ

Штамп конструкции ВИОС круглый, площадью 600 см² ($d = 277$ мм). Основные размеры и наименование деталей указаны на рис. 87. Давление на штамп создается путем загрузки грузовой платформы.

Автоматизированная установка Института строительства и архитектуры АН БССР применяется для испытаний грунта пробными нагрузками в скважинах глубиной более 1 м.

Штамп может быть как круглым, плоским, площадью 600 см², так и сферическим, диаметром 20 см. Упорная стойка монтируется из металлических труб длиной 1 м и диаметром 10 см.

Штамп конструкции Гипростройдормаша (Ростов-на-Дону) для испытаний водоносных и маловлажных грунтов снабжен приспособлением для зачистки забоя непосредственно перед испытанием. Самозачиститель состоит из ножей, которые могут закрываться и открываться, поворачиваясь вокруг оси при помощи штанг с ключом. Площадь штампа — 600 см².

Прессиометры. Прессиометр ИГП-21 конструкции СКБ — ВСЕГИНГЕО Министерства геологии СССР применяется для определения модуля деформации и параметров прочности песчано-глинистых и глинисто-щебнистых пород (при содержании включений до 30%). Схема прибора представлена на рис. 88.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Диаметр скважины, мм	108—112
Максимальная глубина испытаний, м	25
Максимальное давление на породу, кгс/см²	24
Измеряемая деформация породы в стенках скважины (по диаметру), мм:	
при давлении до 6 кгс/см²	100—220
до 15 кгс/см²	100—180
до 24 кгс/см²	100—140
Основная погрешность показаний прибора, %	±4
Размах температуры, при которой возможно применение прибора, °С	—10 +40
Масса прибора, кг	85

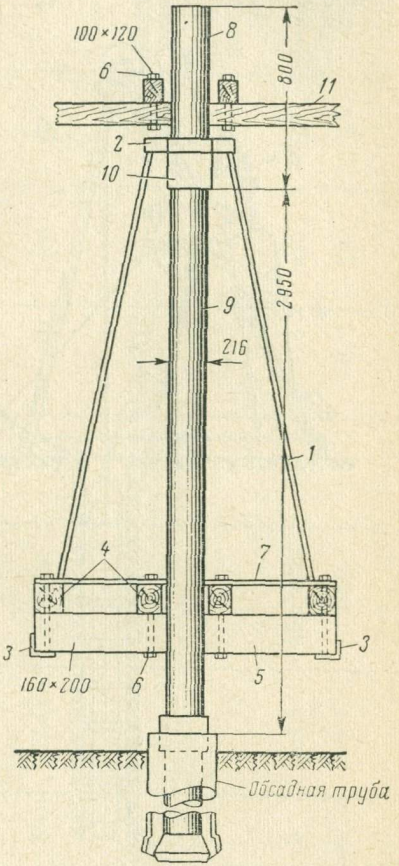


Рис. 87. Установка конструкции ВИОС для определения несущей способности грунтов в буровых скважинах

1 — тяга; *2* — хомут; *3* — уголок № 15—134; *4—5* — брусья; *6* — болт; *7* — настил; *8—9* — трубы; *10* — муфта; *11* — направляющие брусья, прикрепленные к буровой вышке

Прибор выпускается серийно заводом геологоразведочной аппаратуры и средств автоматизации Министерства геологии СССР.

Прессиометр НИИОСП, разработанный Ю. В. Перковым и Е. С. Пригожиным, предназначен для испытаний (определение упругих свойств) скальных пород. Деформации стенок камеры измеряются при помощи щупов, соединенных с тензометрическим блоком.

Прессиометр Уральского политехнического института (УПИ) П-89 отличается от рассмотренных тем, что давление в нем создают при помощи ручного насоса. Техническая характеристика прессиометра приведена в табл. 119.

Прессиометр Фундаментпроекта ПС-1 применяют для определения сопротивления сдвигу и модуля деформации песчано-глинистых

пород в буровых скважинах. При производстве испытаний всю систему заполняют водой. Давление в приборе создается при помощи баллона со сжатой углекислотой.

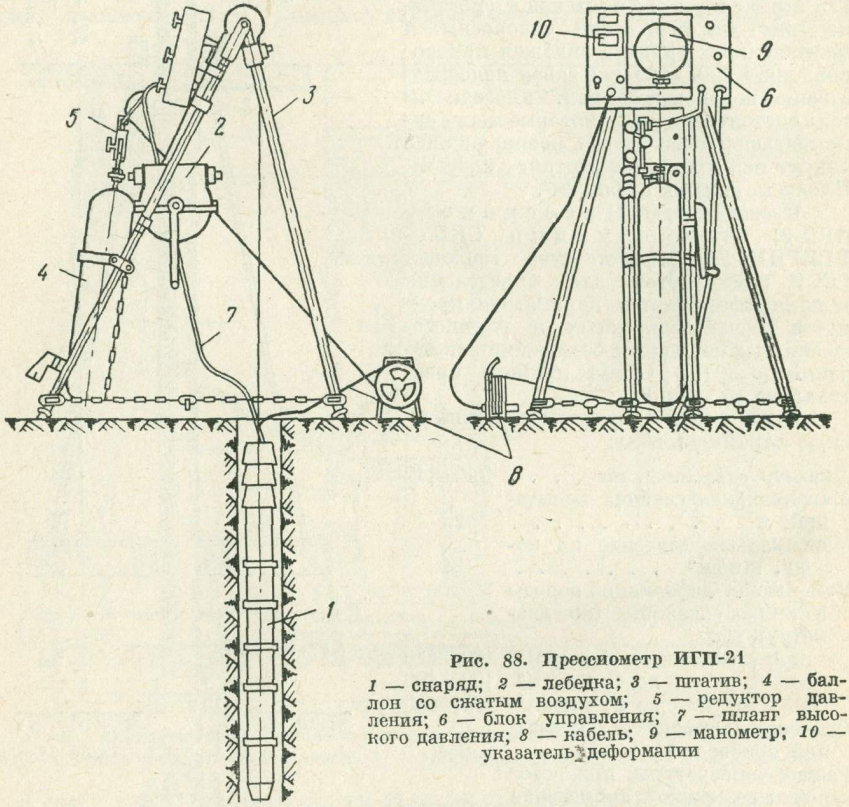


Рис. 88. Прессиометр ИГП-21

1 — снаряд; *2* — лебедка; *3* — штатив; *4* — баллон со сжатым воздухом; *5* — редуктор давления; *6* — блок управления; *7* — шланг высокого давления; *8* — кабель; *9* — манометр; *10* — указатель деформации

Крыльчатые зонды и искиметры

Лопастная установка УИГС ЦНИИС для испытания глинистых пород. Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Максимальная глубина испытаний, м	25
Максимальная величина удельного сопротивления сдвигу, кгс/см²	1,5
Точность измерений:	
угла поворота, градусы	0,1
крутящего момента, кг·см	3—16
удельного сопротивления грунта сдвигу, кгс/см²	0,005—0,03
Диаметр штанг, мм	33,5—34
Пружины динамометра рассчитаны на измерение усилий, кгс	10, 20, 40, 60

Лопастная установка НИИОСП позволяет определять сжимаемость и сопротивление сдвигу грунтов в стенках буровых скважин на любой заданной глубине.

Таблица 119

Техническая характеристика некоторых конструкций прессиометров
(по С. Л. Кореневой и Г. К. Бондарику)

Тип и конструкция прессиометра	Максимальное давление на породу, кгс/см²	Точность измерения давления от верхнего предела измерений, %	Точность измерения деформаций, мм	Максимальная глубина проведения испытаний, м	Диаметр скважины, мм	Опробуемый интервал глубины скважины, мм	Масса прибора, кг	Область применения прибора
Трехкамерные								
Прессиометры Л. Менара . .	20—500	1—4	0,0001	50	32—115	450—600	До 100	Рыхлые и скальные породы в зависимости от конструкции
Прессиометр ГПИ фундаментпроекта ПС-1	8	±4	±1	15	110	500	До 100	Песчано-глинистые породы
Прессиометр Уральского политехнического института П-89	5	±4	Нет данных	5	90—100	400	20	То же
Однокамерные								
Прессиометр ИГП-21 конструкции СКБ—ВСЕГИНГЕО . .	24	±4	±3	25	108—112	500	8,5	Песчано-глинистые и обломочные (до 30% крупных включен. породы)
Макет малого прессиометра ВСЕГИНГЕО	5	±1,5	Нет данных	5	35—50	550	10	Песчано-глинистые породы
Прессиометр НИИОСП ПС-46	250	±3—5	0,0003	5	46	750	3,5	Скальные породы

Особенностью установки являются выдвижные лопасти, убирающиеся в щелевые вырезы. Их выдвижение производится с помощью внутренних поворотных труб. Внешние поворотные трубы служат для установки прибора на определенной глубине и осуществления поворота. Сдвигающие усилия передаются на поворотные рычаги от ручной тали.

Универсальная установка ВСЕГИНГЕО * (рис. 89). Установка предназначена для определения параметров прочности песчано-глинистых и глинисто-щебнистых пород на поверхности и в шурфах методами кругового

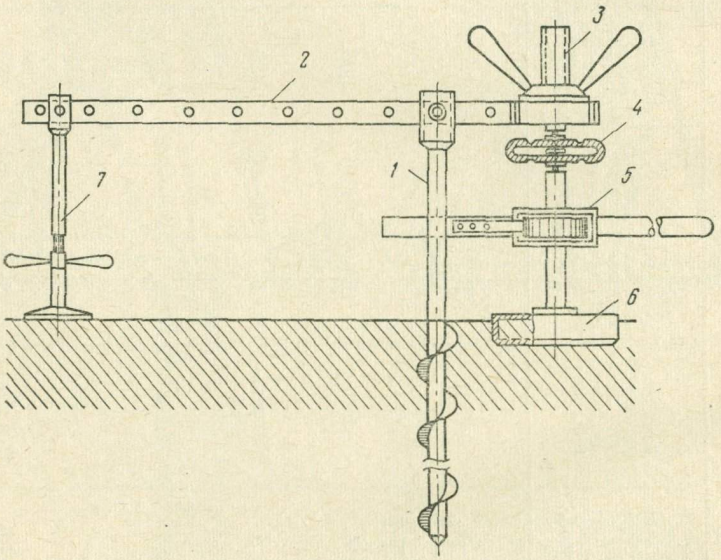


Рис. 89. Универсальная установка ВСЕГИНГЕО

1 — стойка-анкер; *2* — упорная балка; *3* — нагрузочный винт; *4* — динамометр; *5* — поворотный рычаг с динамометром; *6* — поворотное кольцо; крыльчатка или режущее кольцо; *7* — аутригер

среза и среза пород по круглоцилиндрической поверхности, а также для вырезания из массива крупных образцов цилиндрической формы в кольцо-обойму.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Предельная осевая нагрузка, кгс	1000		
Предельный момент, кгс · см	8000		
Высота в рабочем положении, см	60		
Длина рычага, см	85		
Длина упорной балки, см	80		
Диаметры и высота (в знаменателе) поворотных колец, см	7 / 3,5	14 / 5	20 / 5
То же крыльчатых наконечников, см	7 / 35	14 / 7	20 / 10
Масса в сборе, кг	25		

* Конструкция Г. К. Бондарика и Е. А. Воробьева.

Скважинный искиметр ВСЕГИНГЕО (рис. 90) предназначен для испытания песчано-глинистых пород в скважинах на глубину до 30 м. В процессе испытаний получают график «усилия резанию — глубина».

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Минимальный диаметр скважины, мм	68
Максимальное удельное сопротивление резанию, кгс/см²	50
Площадь резания ножа, см²	5,22
Масштаб записи самописца:	
усилия резания . . .	1 мм = 1 кг
глубины	1 : 20
Габариты прибора, м . . .	0,5 × 0,6 × 2,1
Глубина опробования, м . .	30
Масса в сборе, кг	60
Скорость опробования пород в скважине, м/мин	1,0—2,5

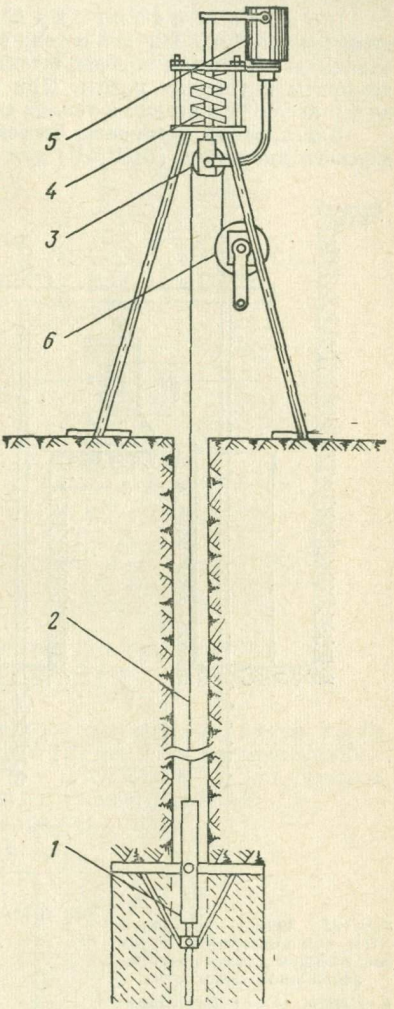


Рис. 90. Скважинный искиметр ВСЕГИНГЕО

1 — нож; *2* — трос; *3* — ролик динамометра с гибким валиком; *4* — динамометр; *5* — самописец; *6* — лебедка

Установки для обрушения, выпирания и сдвига целиков

Установки для обрушения, выпирания и сдвига целиков применяются для определения прочностных характеристик неоднородных слоистых пород и пород, содержащих крупные включения в условиях естественного залегания.

Установка УПИ для испытания пород методом обрушения. Обрушению подвергаются две рядом расположенные и открытые с трех сторон призмы породы. Размеры призмы обрушения в плане 0,4 × 0,4 или 0,6 × 0,6 м; высота 0,8 или 1,2 м; усилие обрушения 0,9—1,5, расстояние от стенки до домкратов $^1/_3$ *a* и $^2/_5$ *a*; эксцентриситет *e* (0,1—0,17), где *a* — размер стороны призмы.

Установка УПИ для испытания пород методом раздавливания свободной призмы изображена на рис. 91. Сторона поперечного сечения призмы *a* больше размера включений в 5 раз, но не меньше 40 см.

Установка имеет следующие размеры:

Высота призмы, м	1,5
Толщина штампа, мм	6—8
Грузоподъемность домкрата, т	3—5

Раздавливающая нагрузка, тс	1,5—2,5
Ступени приложения нагрузки, т	0,25
Время выдержки каждой ступени, мин . .	20

Полевая сдвиговая установка УПИ. Основными узлами конструкции (рис. 92) являются: кольцо диаметром 0,5 мм и высотой 0,25 м, охватывающее целик породы, штамп, вертикальный и горизонтальный винтовые домкраты и упорные плиты. При вертикальных давлениях в интервале от 0,5 до 1,0 кгс/см² сдвигающее усилие достигает 0,8—1,6 тс.

Конструкция установки Всесоюзного научно-исследовательского маркшейдерского института (ВНИМИ) для испытания пород на сдвиг в полевых усло-

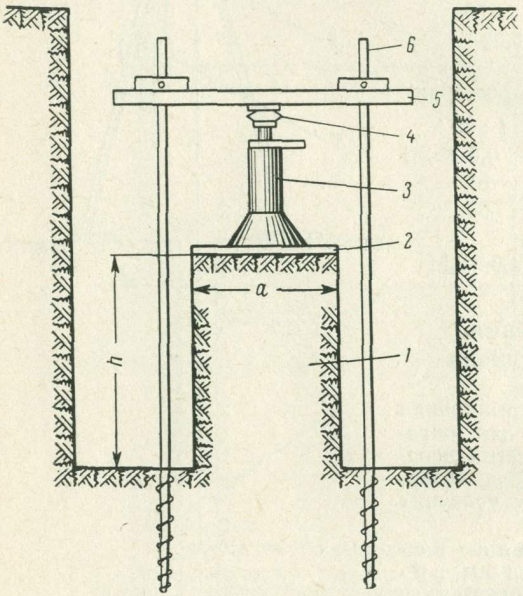


Рис. 91. Схема установки УПИ
1 — призма; *2* — металлический штамп; *3* — домкрат; *4* — динамометр; *5* — упорная балка; *6* — винтовые сваи

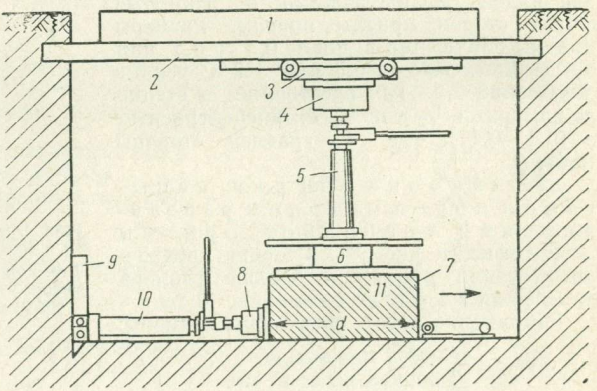


Рис. 92. Схема установки УПИ для испытания грунтов методом сдвига в горизонтальной плоскости
1 — груз; *2* — горизонтальная упорная плита; *3* — тележка; *4*, *8* — динамометры; *5*, *10* — винтовые домкраты; *6* — штамп; *7* — кольцо; *9* — вертикальная упорная плита; *11* — целик грунта

виях. Особенностью схемы испытаний, изображенной на рис. 93, является то, что нормальные и касательные напряжения создаются одним усилием, направленным под углом к плоскости скольжения. Испытания ведут, сдвигая породу по плоскости ослабления или под углом к плоскости ослабления.

Размер призмы — 0,5 × 0,5 × 0,7 м, иногда больше. Площадь среза в зависимости от способа испытаний равна 2300, 2850, 4000 и 10 000 см².

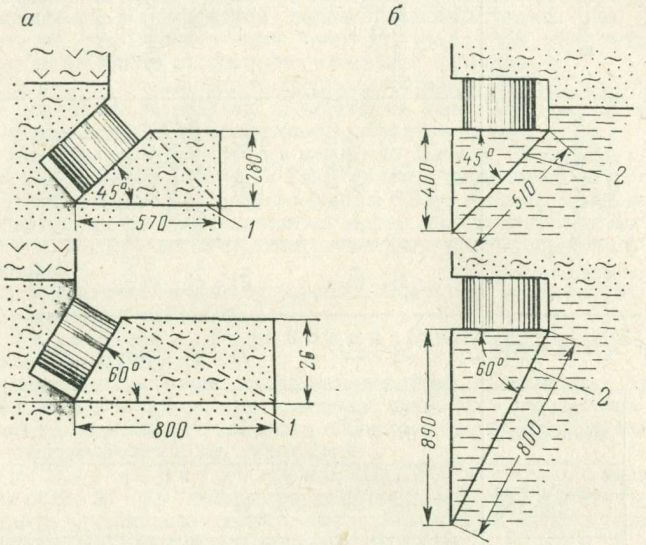


Рис. 93. Схема полевых испытаний на сдвиг по методу ВНИМИ
а — по контактам пород; *б* — вкрест слоистости в отвалах
1 — контакт; *2* — плоскость среза

Сдвигающее усилие создается гидродомкратом или гидравлической подушкой. Масса домкрата 35 кг, рабочий ход поршня 120 мм, грузоподъемность 70 т.

Стендовая установка ДИИТ — ВСЕГИНГЕО * для определения прочностных параметров пород на образцах большого размера.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Высота образца, см	до 13
Диаметр образца, см	21
Площадь образца в плоскости сдвига, см²	330
Вертикальное давление, кгс/см²	до 25
Сдвигающее усилие, кгс/см²	до 25
Деформация сдвига, см	до 7
Габариты прибора, см:	
длина	80
высота	45
ширина	22
Общая масса прибора, кг	60

Установки динамического и статического зондирования, пенетрационно-каротажные станции. Установки динамического зондирования имеют следующие технические параметры (табл. 120).

* Конструкция ДИИТ в модернизации ВСЕГИНГЕО.

Таблица 120

Технические параметры отечественных установок динамического зондирования

Тип и конструкция	Параметры зонда				Масса молота, кг	Высота падения, см	Предельная глубина пенетрации, м	Привод	Примечания
	диаметр конуса, мм	угол раскрытия, градусы	диаметр штанг, мм	длина звена штанг, м					
УБП-15	74	60	42	1,4	60	80	15	Двигатель Л-6	
Ручной динамический зонд ЦНИИС . .	35,6	60	22	1,0	10	50	Данные отсутствуют	—	Предназначен для пенетрации с забоя скважин
Ручной динамический зонд ВСЕГИНГЕО	35,6	60	22	1,0	20	50	До 10	—	—
Ручной зонд ЦНИИС для исследования дна водоемов	35,6	30	27	—	10	100	2 (от дна водоема)	—	—
Копровая установка НИИОСП	74	60	50	1,5	60, 80, 100	До 100	Данные отсутствуют	Электроталь ТЭ-0,25	—
Навесной автоматический пенетрометр НАП-10	74	60	42	—	60	80—120	До 10	—	Используют в комплексе с буровой установкой БУЛИЗ-15
Ударник Физделя	60	60	60	2	9	100	2	—	—

Установки Гидропроекта УБП-15 и УБП-15М смонтированы на прицепе. Они состоят из складной мачты, механизма для ее подъема, бензинового двигателя Л-6 и лебедки для подъема молота с приводом. Опытные серии установок выпускает Центральный ремонтно-механический завод Гидропроекта.

Динамический пенетрометр Центрального научно-исследовательского института транспортного строительства (ЦНИИСа) предназначен для пенетрации с забоя проходимых скважин. Конструкция предусматривает также возможность зондирования водонасыщенных песков без ослабления удара молота за счет герметизации ударного узла. Для облегчения снаряда буровые штанги заменены легкими дюралиевыми трубками.

В установке для исследования грунтов водоемов ЦНИИСа предусмотрено размещение ударного устройства недалеко от дна. Конический наконечник приспособлен для подъема на поверхность образцов грунта.

Автоматические установки динамического зондирования АДЗ-1С-15 и АДЗ-2Т-25 конструкции института «Киевгипротранс» смонтированы на базе бурового станка БУКС и предназначены для динамической пенетрации песчано-глинистых пород на глубину соответственно 15 и 25 м. Процесс зондирования и регистрации результатов испытаний полностью автоматизирован.

Установки статического зондирования. Основные технические параметры установок приведены в табл. 121.

Зондировочная установка БашНИИстроя С-832 смонтирована на автомашине ГАЗ-63.

Зонд-наконечник снабжен тензометрическими датчиками. Вдавливание и извлечение зонда, завинчивание анкерных свай, а также перевод установки из транспортного положения в рабочее и обратно производится с помощью гидравлических механизмов с пульта управления.

Установка конструкции ЦНИИСа разборная с массой отдельных узлов не более 50 кг. Общее сопротивление пенетрации и статическое сопротивление породы вдавливанию конуса измеряют отдельно. Выпускаются опытные образцы экспериментальными мастерскими ЦНИИСа.

Установка Фундаментпроекта С-979. Зондирование производится путем одновременного вдавливания в породу конуса на штанге и наружной трубы. Диаметр штанг 18 мм, диаметры трубы: внутренний — 20 мм, внешний — 36 мм, скорость вдавливания зонда — 0,5 м/мин.

Пенетрационно-каротажные станции. Пенетрационно-каротажные станции предназначены для изучения разреза песчано-глинистых пород методами пенетрации и ядерных каротажей. Они позволяют получать в процессе испытаний пород непрерывные диаграммы изменения с глубиной естественной радиоактивности, объемного веса, естественной влажности (гамма-, гамма-каротаж, нейтрон-нейтронный каротаж), статического сопротивления пенетрации, трения по боковой поверхности. Установки выпускаются серийно.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

База установки	ЗИЛ-131 и ГАЗ-66
Глубина зондирования, м	>25
Максимальное осевое усилие, тс	11
Диаметр зонда, мм	62
Диаметр штанг, мм	50
Длина звена штанг, м	6,5
Производительность, пог. м/смену	50

Станция СПК-Т в отличие от СПК размещена на одной автомашине и оснащена одним комбинированным зондом (вместо двух на СПК). Глубина завинчивания анкеров увеличена до 4 м.

Таблица 121

Основные параметры отечественных установок статического зондирования

Наименование параметра	Единицы измерения	С-979	УСЗК-3	Установка ЦНИИСа	УЗУ-1	С-832
Тип	—	Перевозимая	Перевозимая	Стационарная	Самоходная на базе автомобиля ГАЗ-69	Самоходная на базе автомобиля ГАЗ-63
Предельная глубина зондирования	м	15	15	20	До 10	15
Максимальное усилие вдавливания зонда	т	10	10	10	4	10
Скорость вдавливания зонда	м/мин	0,25—0,50	0,5	—	1,0	0,01—3,0
Максимальная скорость извлечения зонда	»	2,0	—	—	—	3
Диаметр основания конуса наконечника	мм	35,6	35,6	35,6	35,6	35,6
Привод установки	—	Бензиновый двигатель	Бензиновый двигатель Д-3000	Бензиновый двигатель 2СД	От двигателя автомобиля	От двигателя автомобиля
Мощность привода	л. с.	—	6	2	—	—
Метод завинчивания анкерных свай		Вручную	Вручную	Механический	Механический	Механический
Общая масса установки	кг	760	—	400	1900	2600 (без автомобиля)

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

База установки	ЗИЛ-131
Глубина зондирования, м	30
Максимальное осевое усилие, тс	19
Диаметр зонда, мм	80
Диаметр штанг, мм	63
Длина звена штанг, м	6,0
Производительность, пог. м/смену	до 70

Подводная пенетрационно-каротажная станция ПСПК предназначена для исследования донных отложений акваторий при глубине водоема до 30 м. Оснащена теми же методами испытания, что и наземные станции, кроме ННК. Управление станцией — дистанционное.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

База	Специальное плавсредство типа катамарана
Глубина зондирования донных отложений, м	до 25
Максимальное осевое усилие, тс	12
Диаметр зонда, мм	80
Диаметр штанг, мм	63
Производительность, пог. м/смену	до 50

Полевые приборы для определения порового давления имеют следующие параметры (табл. 122).

Приборы выпускаются малыми сериями (заводами и механическими мастерскими ведомственного подчинения).

Приборы для определения деформационных и прочностных свойств пород, применяемые в условиях полевых нестационарных лабораторий. Настольный прибор трехосного сжатия конструкции ЛИИЖТа * приведен на рис. 94. Он относится к типу полуавтоматических стабилометров с заданной скоростью деформации.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Диаметр штампа, см	4
Диаметр и высота образца, см	4; 8
Максимальная вертикальная нагрузка, кгс/см²	200
Предельное боковое давление, кгс	6
Диапазон скоростей деформирования образца, мм/мин	0,003—4
Габариты, см	30 × 30 × 60
Масса, кг	15

Питание — от электросети 220 в

Прибор одноосного сжатия ВСЕГИНГЕО ОСВ-1 для определения прочности глинистых пород (рис. 95). Результаты испытаний получают в виде графика, «нагрузка — деформация» — в прямолинейной системе координат.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Минимальное усилие сжатия, кгс	500
Предельная величина деформации, мм	25
Габариты, см	75 × 25 × 25
Масса, кг	15

* Конструкция Н. Н. Сидорова.

Таблица 122

Краткая характеристика полевых приборов для измерения порового давления

Название и конструкция прибора	Материал фильтра	Тип датчика	Точность измерения порового давления, кгс/см²	Расход воды, см³ / Давление, кгс/см²	Примечания
Прибор с дистанционным манометром Днепропетровского ин-та инженеров транспорта (ДИИТ)	Пористый камень	Дистанционный манометр с сильфоном	0,1	—	Измеряется только положительное поровое давление
Прибор конструкции ДИИТ с индуктивным датчиком	Пористый камень	Индуктивный дифференциальный	—	—	Измеряется положительное и отрицательное поровое давление
Прибор со струнным датчиком конструкции Гидропроекта	Кварцевый песок, склеенный бакелитовым лаком на латунной сетке	Струнный тензометр	10 мм вод. ст.	0,04 / 3	То же
Приборы конструкции ВНИИГ им. Веденеева типа ПТН-1, ПТН-2, ПТН-3	Стекловолокно, стекловата на латунной сетке	Струнный тензометр ДГС-118	0,02	0,01 / 1	»
Прибор с масляным дистанционным манометрическим датчиком Шведского геотехнического ин-та	Карборундовый камень	Диафрагменный датчик, соединенный с масляным манометром	0,02	—	»

Прибор одноосного сжатия ИГП-10 конструкции СКБ—ВСЕГИНГЕО Министерства геологии СССР.

Общий вид прибора приведен на рис. 96. Прибор предназначен для испытания образцов пород высотой до 120 мм с параллельными торцами, вписыва-

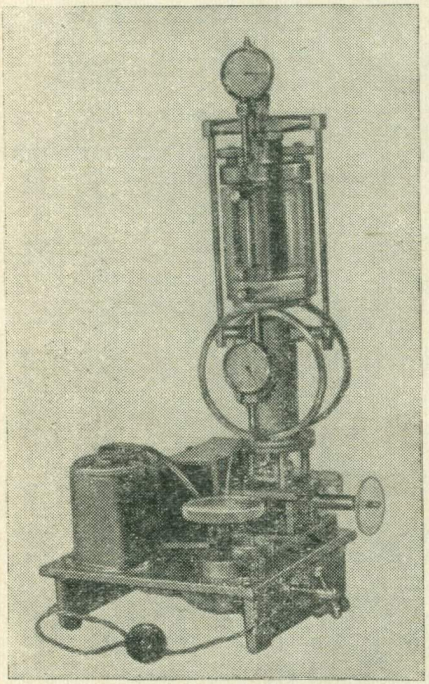


Рис. 94. Настольный стабилометр ЛИИЖТ

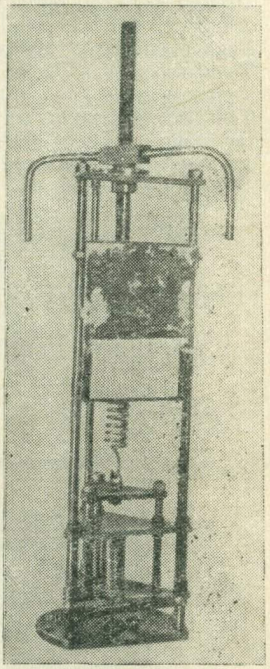


Рис. 95. Прибор одноосного сжатия ОСВ-1

ющимися в круг диаметром 75 мм. Прибор автоматический с управляемой деформацией. Результаты испытаний получают в виде графика, «нагрузка-деформация» — в прямоугольной системе координат.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Максимальное усилие сжатия, кгс	1840
Максимальная величина деформации (ход столика прибора), мм	40
Скорость деформирования образцов, мм/мин . .	0,26; 0,80; 2,50
Основная погрешность измерения:	
сопротивление сжатию, %	±5
деформации (%) от максим. хода столика .	±1
Питание прибора от сети 220 в или аккумулятора 12 в (при ручном приводе)	
Масса прибора, кг	34

Выпускается серийно заводом геологической аппаратуры и средств автоматизации Министерства геологии СССР.

Прибор конструкции ВСЕГИНГЕО* для испытания пород методом сжатия — растяжения ОСР-1. Прибор предназначен для определения параметров прочности глинистых пород в условиях сжатия — растяжения. Общий вид прибора приведен на рис. 97. Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Высота образца, см	8—9
Диаметр образца, см	4
Гидростатическое давление, кгс/см²	до 10
Точность измерения давление, кгс/см²	0,01
Точность измерения линейной деформации, мм	0,01
Точность измерения объемной деформации, см³	0,001
Создание нагрузки на образец	Гидростатически
Габариты прибора, см	35 × 25 × 22
Общая масса прибора, кг	до 3

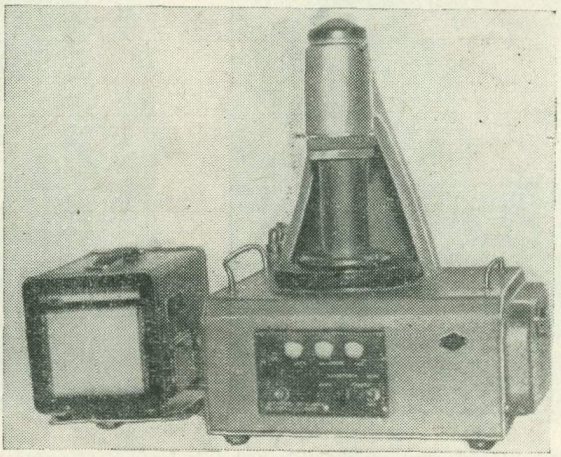


Рис. 96. Прибор одноосного сжатия ИГП-10

Сдвиговой прибор Гидропроекта ВСВ-1 применяется для определения сопротивления сдвигу песчаных и глинистых грунтов. Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Предельное вертикальное давление, кгс/см²	10
Площадь поперечного сечения плоскости срезывателя, см²	40
Габариты прибора, см	40 × 20 × 30
Масса прибора с динамометрами, кг	18

Прибор для определения сцепления грунтов в полевых условиях. Принцип действия прибора (рис. 98) основан на разрыве образца под действием собственного веса. Испытанию подвергается образец грибовидной формы, вырезанный по шаблону из монолита размером 230 × 230 × × 350 мм.

* Конструкция З. Г. Тер-Мартиросяна и Е. А. Воробьева.

Резцом при вращении на подвешенном за «шляпку» образце вырезается шейка до тех пор, пока нижняя часть образца не упадет. Прибор используется для определения сцепления в грунтах твердой и полутвердой консистенции.

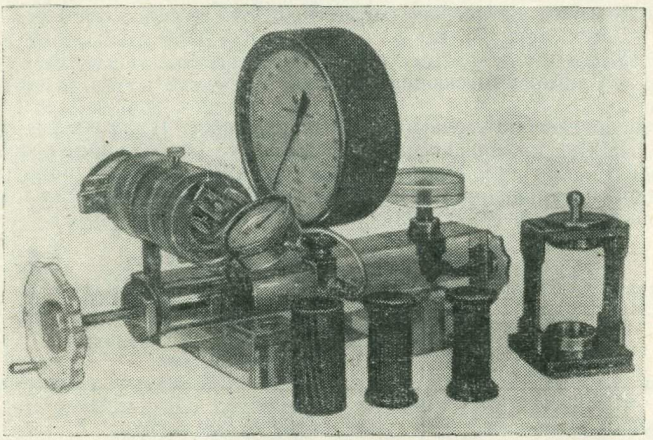


Рис. 97. Прибор для испытания пород методом сжатия — растяжения ОСР-1

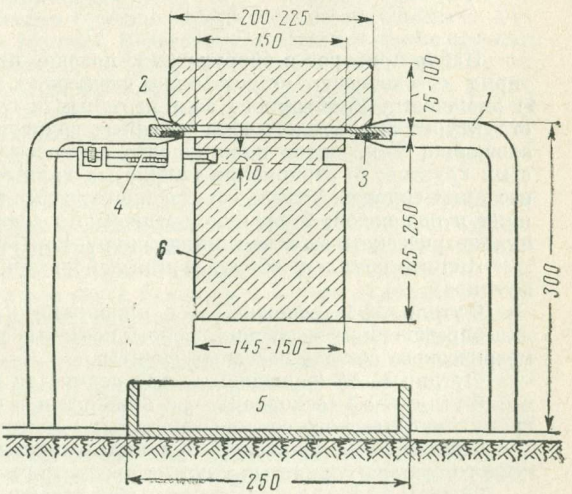


Рис. 98. Прибор для определения сцепления грунтов в полевых условиях

1 — станина; *2* — опорное кольцо; *3* — вращающееся кольцо; *4* — подрезной нож; *5* — поддон; *6* — образец

Микропенетрометр ВСЕГИНГЕО МВ-2 применяется для опробования песчаных и глинистых грунтов в полевых и лабораторных условиях. Принцип действия прибора заключается в измерении глубины погружения подпружиненного конуса.

Прибор имеет следующую техническую характеристику:

Высота конуса, мм	25
Угол при вершине конуса, град.	30
Начальное натяжение пружины, кгс	0,55
Конечное натяжение пружины, кгс	2,55
Длина прибора, мм	300
Масса, кг	0,3

Прибор выпускается серийно.

Полевые инженерно-геологические лаборатории. Полевая лаборатория ЛИГП-1 предназначена для массового определения основных физических свойств и гранулометрического состава песчано-глинистых грунтов ненарушенной и нарушенной структуры при гидрогеологических и инженерно-геологических работах (табл. 123).

Таблица 123

Габариты и масса лаборатории ЛИГП-1

Футляр	Габариты (длина, ширина, высота), мм	Масса, кг
№ 1 (основной)	597 × 520 × 300	35,0
№ 1А (запасной)	560 × 272 × 241	10,0
№ 2 (основной)	525 × 355 × 406	20,8
№ 2А (запасной)	525 × 345 × 432	20,6
№ 3	772 × 372 × 215	23,4
№ 4 (тарный)	1016 × 458 × 340	43,0

Набор приборов и оборудование полевой инженерно-геологической лаборатории обеспечивают определение следующих показателей свойств грунтов: 1) влажности; 2) объемного веса песчаных и глинистых грунтов ненарушенной структуры; 3) объемного веса песчаных грунтов в наиболее рыхлом и плотном сложении; 4) пределов пластичности глинистых грунтов; 5) набухания глинистых грунтов; 6) размокания глинистых грунтов; 7) коэффициента фильтрации песчаных грунтов; 8) угла естественного откоса песчаных грунтов в сухом состоянии и под водой; 9) гранулометрического состава песчаных грунтов; 10) гранулометрического состава глинистых грунтов; 11) плотности.

Полный комплект оборудования лаборатории ЛИГП-1 размещается в шести футлярах.

Футляр № 1 (основной) — с приборами и оборудованием, необходимыми для определения физических свойств песчаных и глинистых грунтов и гранулометрического состава песчаных грунтов.

Футляр № 1А (запасной) — с бюксами для определения влажности.

Футляр № 2 (основной) — с приборами и оборудованием для определения гранулометрического состава глинистых грунтов ареометрическим методом.

Футляр № 2А (запасной) — с цилиндрами для определения гранулометрического состава глинистых грунтов ареометрическим методом.

Футляр № 3 — с приборами и оборудованием для отбора образца грунтов с ненарушенной и нарушенной структурой и полевого опробования грунтов в обнажениях, шурфах, расчистках и т. п.

Футляр № 4 (тарный, запасной) — с подсобным оборудованием, снаряжением и запасными принадлежностями и материалами.

Всего в состав ЛИГП входят: 21 основной прибор и 45 наименований запасных частей, вспомогательного оборудования и материалов.

Общая масса комплекта лаборатории — 152,8 кг.

Лаборатории выпускаются серийно.

Полевая лаборатория системы И. М. Литвинова (тип-9) предназначена для исследования физико-механических свойств песчано-глинистых пород.

Приборы размещены в двух футлярах: в футляре с основным комплектом и в футляре с компрессионной частью. Кроме того, в состав лаборатории входит портативный сушильный шкаф массой около 1,5 кг.

Лаборатория дает возможность определять: естественную влажность, объемную массу, пластичность, гранулометрический состав песчаных грунтов, угол естественного откоса песков (в сухом состоянии и под водой), компрессионные свойства грунтов, максимальную молекулярную влагоемкость грунтов, структурную связность пластичных глинистых грунтов, сцепление на срез и ориентировочные границы пластичности по данным испытаний на расплющивание. Лаборатория тип-9 дополнена полевым прибором системы Н. А. Цытовича для проведения сдвиговых испытаний грунтов.

II. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ БУРОВЫХ И ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТ

Классификация скважин на изысканиях, рекомендуемые способы и установки для их бурения. По назначению инженерно-геологические скважины подразделяются на картировочные (зондировочные), разведочные, гидрогеологические и скважины специального назначения.

Назначение различных скважин, их диаметры и рекомендации по отбору образцов при бурении указаны в табл. 124.

По глубине бурения скважины условно подразделяются: а) до 10—15 м; б) до 25—30 м; в) до 100 м; г) свыше 100 м.

По условиям транспортирования бурового оборудования выделяются легкие, средние, тяжелые и особые условия. В легких условиях возможен подъезд автотранспортом любой проходимости; в средних — подъезд автотранспортом высокой проходимости при устройстве временных подъездных дорог или транспортом на гусеничном ходу; в тяжелых — подъезд обычными видами транспорта практически исключен, возможно передвижение пешеходов; в особо тяжелых условиях необходимо использовать специальные виды транспорта (плавучие средства и т. д.); пешеходам район работ недоступен.

Буровые станки и установки. Выбираемые для целей инженерно-геологического бурения станки и установки должны быть в достаточной степени эффективными технически и экономически; обладать необходимой надежностью и хорошей транспортабельностью (в случае больших габаритов и веса — возможностью разборки на отдельные транспортабельные блоки, а в случае самоходности — высокой проходимостью, маневренностью, достаточной скоростью передвижения); обеспечивать возможность бурения несколькими способами; укомплектовываться надежным в работе и удобным в обращении буровым и вспомогательным инструментом; обеспечивать простоту проведения ремонта; обеспечивать возможность обслуживания минимальным числом рабочих с незначительными затратами труда, а также удобство, простоту и безопасность работы.

Для некоторых из них приводятся основные технические данные, рекомендуемые к использованию при инженерно-геологических изысканиях (табл. 125). Ниже дается краткое описание некоторых из них.

Установка для поискового бурения УПБ-25 включает раму в сборе с направляющими стойками, укосину, вращатель с двигателем и топливным баком, лебедку, механизм подачи с пружинным аккумулятором и пневматические колеса. В процессе бурения установка закрепляется на поверхности грунта с помощью специальных штырей.

Таблица 124

Назначение инженерно-геологических скважин, их диаметры и правила отбора образцов

Тип скважин по назначению	Диаметр * скважины, мм	Рекомендации по отбору образцов при бурении	Цель отбора образцов грунта и виды работ в скважинах
Картировочные (зондировочные)	57—127	Образцы для документации отбираются через определенные интервалы	Геологическая документация. Отбор образцов с нарушенной структурой
Разведочные	108—219	Непрерывный отбор образцов для документации, допускается отбор образцов через определенные интервалы; монолиты отбираются по всему интервалу бурения либо с определенных участков	Геологическая документация. Отбор монолитов для определения физико-механических свойств грунтов
Гидрогеологические	До 426	Производится отбор образцов для документации	Гидрогеологическая документация, проведение опытно-фильтрационных исследований
Специального назначения	426 и более в зависимости от цели бурения	Правила отбора образцов определяются специальными требованиями	Специальные опытные работы, отбор качественных монолитов

* Диаметр скважин условно указан по стандартизованному диаметру обсадных труб.

Вращатель представляет собой двухскоростную передаточную коробку, которая может перемещаться вдоль направляющих стоек. Двухскоростная ручная лебедка предназначена для производства спуско-подъемных операций и для зарядки пружинного аккумулятора механизма подачи. Последний передает давление на забой с усилием 250—300 кгс. Лебедка крепится на укосине. Установка может транспортироваться вручную, а также в кузове автомашины.

Буровая пенетрационная установка УБП-15М представляет собой прицеп, на раме которого смонтированы бензиновый двигатель, трансмиссия, планетарная лебедка, ручная червячная лебедка подъема мачты, направляющий ролик, станина мачты и мачта. Мачта состоит из двух соединенных шарнирами половин, складывающихся в транспортном положении.

Станок ударно-канатного бурения БУКС-ЛГТ целесообразно использовать в местах, где применение самоходных буровых установок затруднено. Станок состоит из одноосного прицепа, треноги из труб, двигателя и лебедки. Станок (рис. 99) может перевозиться мотоциклом.

Универсальная самоходная буровая установка БУЛИЗ-15 состоит из базового автомобиля, мачты, лебедки, откидного вращателя, механизма подачи инструмента, рычагов управления. Установка комплектуется вибромолотом с приводом от двигателя автомашины посредством гибкого вала.

Таблица 125

Рекомендуемые буровые станки и установки

Глубина скважин, м	Условия транспортировки бурового оборудования	Преобладающие в районе работ грунты			
		скальные	крупнообломочные и песчаные	глинистые	мерзлые
До 10—15	Легкие	УПБ-25	БУЛИЗ-15 АВБ2М (ПВБСМ-15, БУВ-1Б)	Д10М М1 УБП-15М БУЛИЗ-15 АВБ2М (ПВБСМ-15, Д—5-15)	БУЛИЗ-15 (ПВБСМ-15)
	Средние	УПБ-25	Д10М БУКС-ЛГТ (ПВБСМ-15, Д—5-15, БУВ-1Б)	Д10М М1 БУКС-ЛГТ (ПВБСМ-15, Д—5-15)	Д10М (ПВБСМ-15)
	Тяжелые	УПБ-25	Д10М (ПВБСМ-15)	Д10М (ПВБСМ-15)	Д10М (ПВБСМ-15)
От 10—15 до 25—30	Легкие	УПБ-25 УГБ-50М ЛБУ-50	АВБ-2М УГБ-50М ЛБУ-50 БУКС-ЛГТ УБП-15М Д—5-25 (УРБ-2А) БУВ-1Б	АВБ-2М УГБ-50М ЛБУ-50 БУЛИЗ-15 БУКС-ЛГТ УБП-15М (Д—5-25, УРБ-2А)	УГБ-50М ЛБУ-50 АВБ-2М БУЛИЗ-15 (УРБ-2А)
	Средние	УПБ-25 БСК2М1-100	БУКС-ЛГТ (УРБ-1В, БУВ-1Б)	БУКС-ЛГТ (УРБ-1В)	—
	Тяжелые	УПБ-25 БСК2М1-100	—	—	—
От 25—30 до 100 м	Легкие	УГБ-50М СБУДМ-150-ЗИВ, СБУЭМ-150-ЗИВ	УГБ-50М СБУДМ-150-ЗИВ СБУЭМ-150-ЗИВ (УРБ-2А, БУГ-100)	УГБ-50М СБУДМ-150-ЗИВ СБУЭМ-150-ЗИВ (УРБ-2А)	АВБ-Т БСК2М1-100
	Средние	АВБ-Т БСК2М1-100	АВБ-Т	АВБ-Т	АВБ-Т
	Тяжелые	БСК2М1-100	—	—	—

Продолжение табл. 125

Глубина скважин, м	Условия транспортировки бурового оборудования	Преобладающие в районе работ грунты			
		скальные	крупнообломочные и песчаные	глинистые	мерзлые
Свыше 100 м	Легкие	СБУДМ-150-ЗИВ СБУЭМ-150-ЗИВ УРБ-ЗАМ ЗИФ-300М (УРБ-2А)	СБУДМ-150-ЗИВ СБУЭМ-150-ЗИВ УРБ-ЗАМ УКС-22М (УРБ-2А) УКБ-200/300	СБУДМ-150-ЗИВ СБУЭМ-150-ЗИВ УРБ-ЗАМ УКС-22М УКБ-200/300	СБУДМ-150-ЗИВ СБУЭМ-150-ЗИВ УРБ-ЗАМ УКС-22М УКБ-200/300
	Средние	ЗИФ-300М УКБ-200/300	ЗИФ-300М УКБ-200/300	ЗИФ-300М УКБ-200/300	ЗИФ-300М УКБ-200/300
	Тяжелые	—	—	—	—

Примечания: 1. В скобках указаны станки, хорошо зарекомендовавшие себя при бурении инженерно-геологических скважин на изысканиях, но в настоящее время не выпускаемые серийно либо выпускаемые малыми сериями.

2. В дальнейшем для бурения инженерно-геологических скважин могут быть использованы специальные буровые комплексы, разрабатываемые СКБ МГ СССР – УКБ-12/25; УКБ-50/100; УБР-2А; установка Гидропроекта БУГ-50 и др.

3. Для граф, в которых стоит прочерк, соответствующее буровое оборудование не разработано.

Агрегат для вибробурения АВБ2М (рис. 100) состоит из следующих основных узлов: рамы, коробки отбора мощности, раздаточного редуктора, лебедки с планетарным редуктором, генератора, трубчатой мачты, механизма подъема мачты, электрооборудования и рычагов управления. Агрегат комплектуется основным рабочим вибропогружателем ВБ-7. При переездах вибропогружатель транспортируется на мачте. В отличие от других виброустановок агрегат может обслуживаться двумя рабочими.

Установка гидрогеологического бурения УГБ-50М может быть использована для бурения инженерно-геологических и гидрогеологических скважин. Она состоит из следующих основных узлов: базовой автомашины, двигателя, коробки передач, подвижного вращателя, мачты, лебедки, механизма для ударно-канатного бурения, гидравлической системы подачи инструмента на забой и спуска и подъема мачты. Установка может транспортировать специально оборудованный двухосный автоприцеп с комплектом рабочего инструмента.

Установка УГБ-50М (УГБ-50А) является наиболее распространенной на инженерных изысканиях.

Самоходная установка ЛБУ-50 помимо бурения гидрогеологических и инженерно-геологических скважин может быть использована для проходки шурфов-дудок. Основной способ бурения установкой — шнековый.

Бурение шурфов-дудок на установке производится специальным буром. Бур опускается на забой по гладкой бурильной колонке и поднимается с забоя на канате при помощи лебедки. Разгрузка бура на поверхности, уборка грунта от устья и крепление шурфа механизированы. В комплект установки входят:

инструмент и принадлежности для бурения скважин, слесарный инструмент и запасные части.

Буровой инструмент. В состав бурового инструмента при проходке инженерно-геологических скважин входят: породоразрушающие наконечники, керноприемники, бурильные и обсадные трубы. При каждом способе бурения применяется свой специализированный буровой инструмент.

Инструмент для колонкового бурения включает в себя коронки для твердосплавного, дробового и алмазного бурения, колонковые и шламовые трубы, переходники, бурильные трубы. Для колонкового бурения рекомендуется следующий породоразрушающий инструмент (табл. 126).

Колонковые трубы для бурения твердосплавными, дробовыми и алмазными коронками изготовляют по ГОСТ 6238-52 следующих размеров: 34, 44, 57, 73, 89, 108, 127, 146, 168 и 219 мм. Аналогичных размеров выпускаются и обсадные трубы. Переходники изготавливают по ГОСТ 8004-56.

Бурильные трубы для колонкового бурения изготавливают: муфтово-замкового соединения диаметром 42; 50 и 63,5 мм (по ГОСТ 7909-56) и ниппельного соединения диаметром 33,5; 42 и 50 мм (по ГОСТ 8467-57).

Следует отметить, что на инженерных изысканиях колонковое бурение в большинстве случаев производится «всухую», реже с призабойной циркуляцией промывочной жидкости и еще реже с промывкой водой или глинистым раствором, или продувкой сжатым воздухом. При бурении «всухую» углубка скважин нередко осуществляется грунтоносами обуривающего типа, различными разъемными бурами (типа бура — грунтоноса МГРИ) и наконечниками для ручного и ударно-вращательного бурения (змеевики, ложковые буры и т. д.).

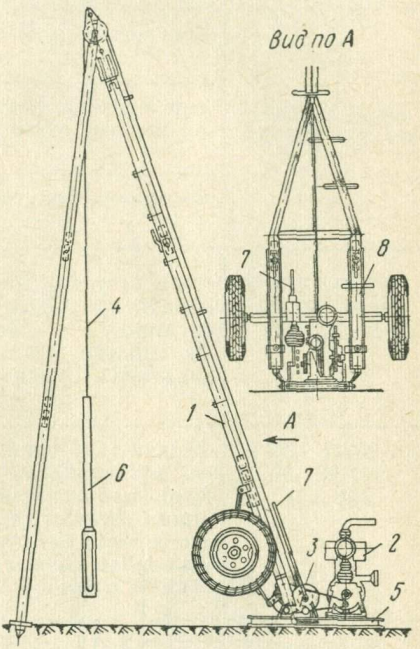


Рис. 99. Станок БУКС-ЛГТ в рабочем положении

1 — тренога; *2* — двигатель; *3* — лебедка; *4* — канат; *5* — рама; *6* — буровой инструмент; *7* — рукоятка управления лебедкой; *8* — вилка опорной стойки

Инструмент для шнекового бурения состоит из комплекта шнеков и бурового наконечника. В мягких и рыхлых грунтах рекомендуется применять трехлопастные долота (конструкции СКБ МГ СССР), долото змеевикового типа (конструкции ВСЕГИНГЕО и Щигровского ОКБ), различные двухлопастные долота со сменной лопастью (конструкции Щигровского ОКБ и КазГИИЗа). В крепких породах применяют специальные долота. При шнековом бурении кольцевым забоем применяют магазинные шнеки и специальные коронки.

Инструмент для ударно-канатного бурения кольцевым забоем состоит из забивного стакана и утяжеленной ударной штанги (при «клюющем» способе) или ударного патрона (при забивном способе).

Стаканы изготовляются нескольких типоразмеров: с наружным диаметром 89, 108, 127, 146, 168 и 219 мм; длина стаканов изменяется от 0,4 до 1,0 м. Нижняя часть стакана оборудуется рабочим кольцом, верхняя — переходником.

Как правило, стакан по всей длине имеет прорезь. В слабосвязных грунтах используют стаканы с клапаном.

Значительным распространением пользуются разъемные стаканы конструкции Гидропроекта.

Широкий ассортимент инструмента для ударно-канатного бурения кольцевым забоем выпускает Угличский ЭРМЗ Гидропроекта.

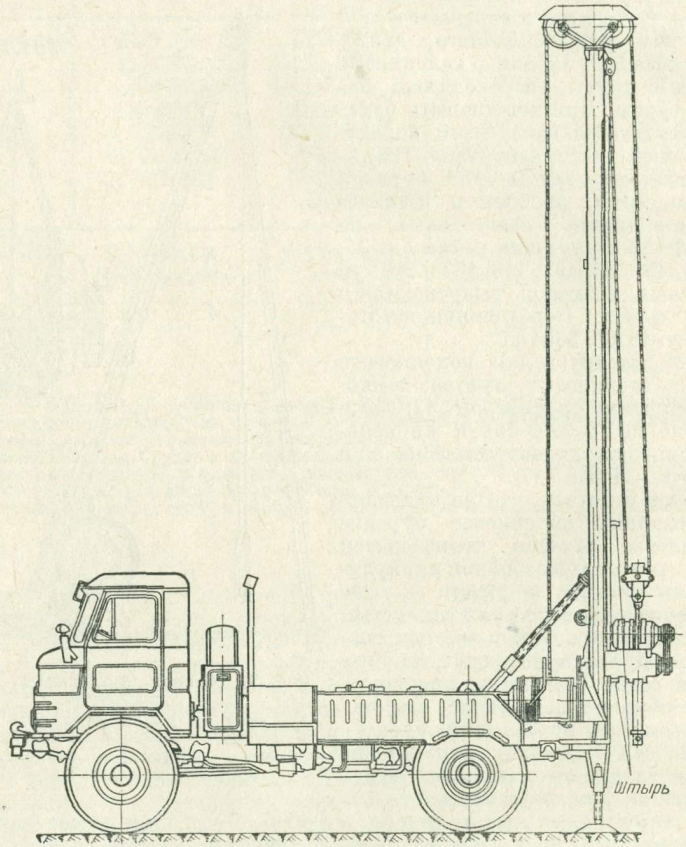


Рис. 100. Агрегат для вибробурения АВБ2М

Инструмент для вибрационного бурения состоит из зондов и бурильных труб. Диаметры зондов те же, что и стаканов при ударно-канатном бурении. Длина зондов колеблется от 0,6 до 3,0 м. Для бурения связных глинистых грунтов применяют зонды с одной прорезью, для бурения слабосвязных грунтов — зонды с клапаном. Геометрия рабочего кольца зонда выбирается в зависимости от проходимых грунтов.

В качестве бурильных труб при вибрационном бурении чаще используются бурильные трубы для колонкового бурения с замковыми соединениями (диаметром 50 и 63,5 мм), реже специальные трубы, изготовленные из колонковых труб диаметром 57 или 73 мм.

Таблица 126

Породоразрушающий инструмент для колонкового бурения

Разновидность колонкового бурения	Тип коронки	Область применения	Номер стандарта и диаметры коронок (размер дроби), мм
Бурение твердосплавным породоразрушающим инструментом	М1 (КР-1)	I—III, мягкие однородные породы	ГОСТ 10502-69 93, 112, 132, 151
	М2 (КР-2)	II—IV, мягкие породы с прослойками более твердых пород	
	М5 (КР-4, КР-5)	II—IV, мягкие однородные породы	
	СМ3 (С)	IV—VI, малоабразивные монолитные породы (аргиллиты, алевролиты, глинистые и филлитовые сланцы, доломиты, гипсы известняки и т. п.)	ГОСТ 11108-70 46, 59, 76, 93, 112, 132, 151
	СМ4 (МР2НП-1)	V—VI, частично VII; малоабразивные монолитные и перемежающиеся породы (алевролиты, аргиллиты, глинистые и песчаные сланцы, известняки, слабые песчаники, базальты, дуниты и т. п.)	ГОСТ 11108-70 76, 93, 112, 132, 151
	СМ5 (1НМ)	V—VI, малоабразивные монолитные и слаботрещиноватые породы (доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты и т. п.)	ГОСТ 11108-70 36, 46, 59, 76, 93, 112, 132, 151
	СМ6 (16НА)	VI—VIII, малоабразивные монолитные и слаботрещиноватые породы (доломиты, известняки, серпентиниты, перидотиты и т. п.)	ГОСТ 11108-70 46, 59, 76, 93, 112, 132, 151
	СТ2 (СТ-6)	IV—VI, малоабразивные трещиноватые и перемежающиеся породы (известняки, доломиты, частично окремненные сланцы с твердыми включениями и т. п.)	ГОСТ 11108-70 46, 59, 76, 93, 112, 132, 151

Продолжение табл. 12

Разновидность колонкового бурения	Тип коронки	Область применения	Номер стандарта и диаметры коронок (размер дроби), мм
	СА1	VI—VIII, абразивные плотные тонко- и мелкозернистые монолитные породы (песчаники, песчаные сланцы, грубые алевролиты, порфириты, габбро и т. п.)	ГОСТ 11108-70 36, 46, 59, 76, 93, 112, 132
	СА2 (БТ4)	VI—VIII, частично IX; абразивные монолитные и перемежающиеся породы (песчаники, алевролиты, диориты, габбро, порфириты, окварцованные известняки и т. п.)	ГОСТ 11108-71 36, 46, 59, 76
	СА3 (КН1)	VI—VIII, частично IX; абразивные монолитные и перемежающиеся породы (песчаники, алевролиты, диориты, габбро, порфириты, окварцованные известняки и т. п.)	ГОСТ 11108-71 93, 112, 132
	СА4 (БТ-45а)	VI—VIII, частично IX; абразивные, монолитные и слаботрещиноватые породы (габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны и т. п.)	ГОСТ 11108-71 46, 59, 76, 93, 112, 132
Бурение дробью	Чугунная дробь	VIII—X	2,5; 3,0; 4,0
	Стальная дробь	IX—XII	2,0; 2,5; 5,0; 5,5
	Дробовые коронки К75, К91, К110, К130, К150	—	ГОСТ 6250-65 75, 91, 110, 130, 150

Продолжение табл. 126

Разновидность колонкового бурения	Тип коронки	Область применения	Номер стандарта и диаметры коронок (размер дроби), мм
Бурение алмазным породоразрушающим инструментом	М-6 (шестислойные)	XI—XII, малоабразивные породы	36, 46, 59, 76 и 93
	ИМВ-1А, ИМВ-1Б (импрегнированные)	X—XII, малоабразивные породы	
	АК-1 (однослойные) АК-5 (трехслойные) МВС-2	VIII—IX, среднеабразивные породы	
	А-5 (пятислойные), ИМВ-2А, ИМВ-2В (импрегнированные)	X—XII, абразивные породы	
	МВ-5 (трехслойные)	IX—XII, абразивные породы	
	МВ-1 (однослойные)	VII—IX, абразивные породы	
	ОА (однослойные)	VIII—IX, абразивные породы	
	М-1-26, М-4-26	VIII—XII	26
Бурение гидроударниками (Г-3А, ГМД-2, Г-5А и др.)	КГ1	VI—VIII, пластичные и вязкие породы (глинистые сланцы, аргиллиты, хлорито-серицитовые породы и др.)	ГОСТ 12735—67 96, 115
	КГ2	VI—X, однородные и переслаивающиеся породы (алевролиты, алевропилиты, туфы, базальты, граниты и др.)	

Продолжение табл. 126

Разновидность колонкового бурения	Тип коронки	Область применения	Номер стандарта и диаметры коронок (размер дроби), мм
Бурение гидроударниками (Г-3А, ГМД-2, Г-5А и др.)	КГ3	VI—VIII, абразивные породы (песчаники, песчаные сланцы, серицито-кварцевые породы и др.)	ГОСТ 12735—67 96, 115
Бурение пневмоударниками (РП-112А, РП-133А и др.)	КП-113 КП-132	VII—X	113, 132

Грунтоносы. При бурении инженерно-геологических скважин грунтоносы используют для отбора образцов с ненарушенным природным сложением (монолитов).

Углубку скважины, из которой монолиты не отбираются, производить грунтоносами не рекомендуется.

При отборе монолитов грунтоносами следует руководствоваться следующими правилами.

1. Отбор монолитов должен производиться в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-72 (грунты, отбор, упаковка, хранение и транспортирование образцов).

2. Забой скважины должен быть тщательно очищен от шлама.

3. В глинистых грунтах твердой и полутвердой консистенции рекомендуется применять обуривающие грунтоносы; в грунтах тугопластичной, мягкопластичной и текучепластичной консистенции — вдавливаемые грунтоносы. Забивные и вибрационные грунтоносы допускается применять в соответствии с ограничениями, накладываемыми ГОСТ 12071-72.

4. Грунтоносы перед спуском в скважину должны быть тщательно очищены от грязи и смазаны. Грунтоносы, имеющие механические повреждения корпуса, керноприемных гильз и других частей, к использованию не допускаются.

5. При использовании обуривающих грунтоносов скорость их вращения при отборе монолита не должна превышать 60 об/мин, а давление на забой — 150—300 кгс.

6. Величина заглубления грунтоноса не должна быть меньше полутора его диаметра и не больше 0,4 м. Минимальный внутренний диаметр грунтоноса должен составлять 80 мм.

7. Диаметр скважины, в которую опускается грунтонос, должен быть на 15—20 мм больше наружного диаметра грунтоноса.

Оборудование для горнопроходческих работ. При инженерно-геологических изысканиях для изучения грунтов используются следующие виды горных выработок: расчистки, закопушки, канавы, траншеи, шурфы, штольни и шахты. Основным видом горных выработок, проходимых на изысканиях, являются шурфы.

Рациональными сечениями шурфов, проходимых горным способом, являются: при глубине шурфа до 3 м — 1,25 × 1 и 1,5 × 1 м, при глубине шурфа более 3 м — 2,0 × 1,25 м.

Углубка (отбойка) шурфов может производиться: ручным способом с использованием шанцевого инструмента (лопат, кайл, ломов и т. д.) и механизированным способом с использованием отбойных молотков, пневмолопат и т. д.

При проходке шурфов в плотных и крупнообломочных грунтах для эффективной отбойки целесообразно применять бетоноломы и пневмоотбойные молотки типа ОМ-1, ОМСП-5, пневмоперфораторы ПР-12, ПР-20 с приводом от компрессора (ЗИФ-55, ПКС-5 и др.).

Выделяются следующие виды транспортирования породы на поверхность: 1) подъем породы на выброс (при глубине шурфов не более 2,5 м); 2) подъем породы с помощью бадей малой емкости (не более 0,02 м³) вручную (при глубине шурфов не более 5 м); 3) подъем породы бадьями (емкостью не более 0,03 м³) с применением ручных деревянных или облегченных металлических воротков (при глубине шурфов более 5 м); 4) подъем породы бадьями (емкостью 0,1—0,2 м³) с применением различных механизированных устройств (специальными лебедками, кранами-укосинами и др.).

Рекомендуемыми механизированными средствами для подъема породы из шурфов являются: шурфопроходческий кран КШ-1, кран Т-108 «Пионер», кран-укосина КШ-100 (табл. 127).

Таблица 127

Технические характеристики механизированных средств для подъема породы из шурфов

Параметры	Единица измерения	КШ-1	Т-108 «Пионер»	КШ-100
Тип	—	Полноповоротный	Полноповоротный	Полноповоротный
Вылет стрелы	мм	2400	—	2000
Грузоподъемность	кг	230	500	100
Скорость подъема	м/с	0,72	0,5	0,75
Масса установки	кг	1235	1164	225

В зависимости от свойств проходимых грунтов применяют следующие виды крепления шурфов: 1) распорное с забутовкой (в сравнительно устойчивых породах); 2) сплошное венцовое (в рыхлых и сыпучих породах); 3) венцовое на стойках (в сравнительно устойчивых породах); 4) шпунтовое и опускное (в водонасыщенных породах и плывунах); 5) каркасно-спускное (в сыпучих и обваливающихся породах).

При буровом способе шурфы (дудки) могут проходиться специализированными шурфопроходческими установками, а также установками, используемыми для бурения скважин. Диаметр дудок может изменяться от 0,65 до 1,5 м.

К специализированным самоходным шурфопроходческим установкам относятся: БКГМ-66, МРК-1А, ЛБУ-50, КШК-30А и КШС-40 (табл. 128).

При проходке песчаных и крупнообломочных грунтов может быть использована установка УБСР-25 конструкции ЦНИГРИ. Для проходки шурфов рекомендуются к использованию виброгрейферы ВНИИГСа — ПВ-1, ПВ-2, ПВ-3П и ПВ-4П.

Для проходки шурфов могут быть использованы также буровые установки УРБ-2А, УГБ-50М, СБУДМ-150-ЗИВ, АВБ2М и др.

Бурение шурфов может производиться вращательным и ударно-канатным способами.

Вращательный способ целесообразно применять при проходке шурфов диаметром 650—900 мм, глубиной до 5—7 м в сравнительно плотных глинистых грунтах. При вращательном способе в качестве буровых наконечников исполь-

Таблица 128

Основные технические данные по специализированным установкам для проходки шурфов

Параметр	Единица измерения	БКГМ-66	ЛГ-1А
База установки	—	ГАЗ-66	ЗИЛ-157КЕ
Максимальная глубина бурения	м	2,5—3	3,5
Диаметр бурения	мм	500—800	650
Скорость вращения бура	об/мин	50—100	27—94
Грузоподъемность лебедки	кг	1000	—
Полная масса	кг	4800	9200

Продолжение табл. 128

Параметр	БКМ-483П	КШК-30А	КШС-40
База установки	ЗИЛ-130	Двухосный прицеп	Урал 375Е
Максимальная глубина бурения	4,5	30	40—45
Диаметр бурения	300—1000	1230—1300	750—1300
Скорость вращения бура	60—140	10—20	10—20
Грузоподъемность лебедки	—	2000	3800
Полная масса	6370	3000	17156

зуют: однозаходные и двухзаходные шнековые буры; ложковые буры с расширителем, конусные буры.

Ударно-канатный способ целесообразно применять при проходке сравнительно глубоких шурфов (свыше 5—7 м) диаметром 0,65—0,9 м, главным образом в лёссовых грунтах. При этом способе следует применять ячеистый забивной стакан с ударной штангой. Высота подъема инструмента при ударном способе не должна превышать 5—6 м.

Преимуществом ударно-канатного способа являются высокая производительность, простота производства работ, сохранение вертикальности ствола шурфа и пр.

ПНИИИСом предложен комбинированный способ проходки шурфов, состоящий в том, что начальные интервалы шурфа проходятся вращательным способом, а последующие ударно-канатным. Для этой цели может быть использована буровая установка УГБ-50А (М). В отдельных случаях хорошие результаты может дать предложенный ПНИИСом и ВНИИГИСом вибрационный способ проходки шурфов (со спуском вибромолота вместе с наконечником к забою шурфа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкатов Д. Н., Васильев А. В. Методические указания по геологической документации скважин шнекового бурения при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., 1964, 34 с. (ВСЕГИНГЕО).

2. Башкатов Д. Н., Олоновский Ю. А. Вращательное шнековое бурение геологоразведочных скважин. М., «Недра», 1968, 194 с.
3. Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. И. Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., «Недра», 1967, 372 с.
4. Коломенский Н. В. Общая методика инженерно-геологических исследований. М., «Недра», 1968, 342 с.
5. Ребрик Б. М. Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях. М., «Недра», 1973, 260 с.
6. Ребрик Б. М. Вибротехника в бурении. М., «Недра», 1966, 134 с.
7. Рекомендации по проходке шурфов в песчаных и глинистых грунтах при производстве инженерно-геологических изысканий для строительства. М., Стройиздат, 1971, 49 с.
8. Скоростные методы инженерно-геологических исследований для целей массового строительства. М., «Недра», 1964, 289 с. (Тр. ВСЕГИНГЕО).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3

Глава первая. **Основные положения и сведения из сопредельных наук, используемые при инженерно-геологических исследованиях.** *Редактор М. В. Чуринов* 4

I. Геология. *В. П. Лазарева* 4
II. Геоморфология. *В. П. Лазарева* 21
III. Топография и рельеф. *В. П. Лазарева* 24
IV. Метеорология и климат. *И. М. Цыпина* 28
V. Гидрология. *И. М. Цыпина* 34
VI. Гидрогеология. *И. М. Цыпина* 36
Список литературы 44

Глава вторая. **Грунтоведение.** *Редактор Е. Г. Чаповский* 46

I. Основные методы лабораторных определений физико-механических свойств песчано-глинистых грунтов. *Л. И. Одинцова* . . . 46
II. Статистическая обработка данных лабораторных испытаний пород. Обобщенные и расчетные показатели. *Г. К. Бондарик* . . 69
III. Вода в песчано-глинистых породах. *Н. П. Затенацкая* 73
IV. Основные методы лабораторных определений физико-механических свойств скальных пород. *С. В. Николаев* 77
Список литературы 92

Глава третья. **Механика грунтов.** *Редактор А. Н. Цытович* 94

I. Общие положения. *И. С. Комаров* 94
II. Основные положения теории линейно деформируемой среды . . 98
III. Распределение напряжений в массиве грунта 99
IV. Расчеты естественных оснований сооружений по предельным состояниям 106
V. Условия предельного равновесия и несущая способность грунтов. *В. И. Ферронский* 114
VI. Давление грунтов на ограждения. *В. И. Ферронский* 123
VII. Давление пород в горных выработках. *В. И. Ферронский* . . . 125
VIII. Устойчивость откосов. *В. И. Ферронский* 128
Список литературы 133

Стр.

Глава четвертая. **Современные геологические и инженерно-геологические процессы.** *Редакторы Е. Г. Чаповский и М. В. Чуринов* 134

I. Гравитационные смещения. *Е. П. Емельянова* 135
II. Процессы, связанные с действием поверхностных вод. *Е. В. Трепетцов* 52
1. Переработка берегов водохранилищ 152
2. Болота и заболоченные земли | *С. С. Соколов* | 158
3. Сели. *И. А. Моссаковская* 159
III. Процессы, связанные с действием подземных вод 164
1. Карстовые процессы. *Н. В. Родионов* 164
2. Суффозия. *В. Н. Славянов* 172
3. Плывунные явления в песках. *В. Н. Славянов* 175
IV. Процессы развевания и выветривания 176
1. Эоловые процессы — развевание и перевевание песков. *В. Н. Славянов* 176
2. Выветривание горных пород. *М. П. Панюкова* 178
3. Трещиноватость горных пород. *М. В. Рац* 182
4. Зоны поверхности ослабления в массивах горных пород. *В. Н. Славянов* 185
V. Сейсмические процессы. *В. В. Попов* 187
VI. Инженерно-геологические процессы 197
1. Явления, связанные с водоотливом (искусственное понижение уровня подземных вод). *В. Н. Славянов* 197
2. Горное давление и сдвижение пород под горными выработками. *Г. Г. Скворцов* 199

Список литературы 201

Глава пятая. **Инженерно-геологические исследования.** *Редакторы Е. Г. Чаповский и М. В. Чуринов* 203

I. Задачи, виды и общая характеристика инженерно-геологических работ. *В. П. Лазарева* 203
II. Региональные инженерно-геологические исследования, инженерно-геологическая съемка и карты. *В. П. Лазарева* 204
III. Проектирование и организация инженерно-геологических исследований. *В. П. Лазарева* 221
IV. Разведочные буровые работы. | *С. С. Соколов* | 223
V. Камеральная обработка полевых материалов. | *С. С. Соколов* | 225
VI. Опробование горных пород при проведении инженерно-геологических работ. *Г. К. Бондарик* 226
VII. Опытные полевые инженерно-геологические работы. *Г. К. Бондарик* 233

Список литературы 261

Стр.

Глава шестая. **Специальные методы исследований.** *Редактор М. В. Чуринов* 262

I. Геофизические методы исследований. *А. А. Огильви* 262
II. Радиоизотопные и пенетрационно-каротажные методы исследований. *В. И. Ферронский* 270
III. Применение аэрометодов при инженерно-геологических исследованиях. *И. С. Комаров* 277
IV. Геоботанические методы. *В. С. Викторов, Е. А. Востокова* . . 288

Список литературы 292

Глава седьмая. **Особенности инженерно-геологических исследований для различных видов строительства.** *Редакторы С. С. Соколов, М. В. Чуринов* 293

I. Инженерно-геологические исследования для промышленного и гражданского строительства. *М. И. Хазанов* 293
II. Инженерно-геологические исследования для гидротехнического строительства. *Е. С. Карпышев, А. Н. Марков* 297
III. Инженерно-геологические исследования для строительства тоннелей и других видов подземных сооружений. *Г. И. Сазонов* . . 309
IV. Инженерно-геологические исследования для строительства автомобильных и железных дорог. *Ф. С. Канаев* 318
V. Инженерно-геологические исследования для строительства трубопроводов. *М. И. Хазанов, Б. П. Богословский* 319
VI. Инженерно-геологические исследования для строительства линий электропередач. *М. И. Хазанов, Б. П. Богословский* 322
VII. Инженерно-геологические исследования для строительства аэродромов. *М. И. Хазанов, Б. П. Богословский* 323

Список литературы 325

Глава восьмая. **Инженерная геокриология.** *Редактор П. Ф. Швецов* . . . 326

I. Физико-географические и геологические условия сезонного промерзания почв и горных пород, формирования и режима мерзлых слоев и толщ. *П. Ф. Швецов* 326
II. Теплофизические закономерности (основы расчета) процессов промерзания и протаивания земной коры в естественных и искусственно измененных условиях теплообмена с атмосферой. *С. Г. Цветкова* 333
III. Физические процессы в промерзающих, мерзлых и протаивающих породах и криогенные явления. *Н. Г. Бобов* 335
IV. Особенности состава и строения мерзлых пород. *С. Г. Цветкова, Г. Д. Потрашков* 342
V. Методы изучения промерзающих мерзлых и оттаивающих пород. *Г. Д. Потрашков, С. С. Цветкова* 344
VI. Инженерно-геологическая съемка и изыскания. *Б. С. Павлов* 352

Список литературы 356

Стр.

Глава девятая. **Техническая мелиорация пород** 358

I. Назначение мелиорации пород. *Ф. В. Котлов* 358
II. Современные представления о породах как объектах технической мелиорации 359
III. Способы мелиорации пород 360
Список литературы 370

Глава десятая. **Оборудование и приборы, применяемые при проведении инженерно-геологических работ** 371

I. Установки и приборы для испытания пород. *Г. К. Бондарик* . . 371
II. Оборудование для буровых и горнопроходческих работ. *Б. М. Ребрик* 391
Список литературы 402

Коллектив авторов

СПРАВОЧНИК ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

Редактор издательства *Л. Г. Китаенко*

Технический редактор *А. Г. Иванова*

Корректор *С. С. Борисова*

Сдано в набор 21/VIII 1973 г.
Подписано в печать 11/IV 1974 г. Т-07627.
Формат 60 × $90^1/_{16}$. Бумага № 2.
Печ. л. 25,5. Уч.-изд. л. 33,47. Тираж 30 000 экз.
Заказ № 486/4364-2. Цена 1 р. 87 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 6
«Союзполиграфпрома» при Государственном
комитете Совета Министров СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, г. Ленинград, Московский пр., 91.

1р.87к.

1042

Ин. геолог. школа
2

НЕДРА - 1974