

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

по инженерно-
геологическому
изучению
горных пород



МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

по инженерно-
геологическому
изучению
горных пород

В двух томах

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ *Е. М. СЕРГЕЕВА*

Том 1

ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ

4276



МОСКВА "НЕДРА" 1984



Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. В 2-х томах. Том 1. Полевые методы/Под ред. Е. М. Сергеева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 423 с.

Изложены полевые методы изучения горных пород в инженерно-геологических целях: математические, наземных наблюдений, инженерно-геологического опробования горных пород, геофизические, аэрокосмические, пенетрационно-каротажные и др. Во 2-м издании (1-е изд.— 1968) учтены новейшие достижения в области инженерно-геологического изучения пород и опыт ряда производственных организаций.

Для специалистов геологических, изыскательских, научно-исследовательских, проектно-конструкторских и строительных организаций. Может быть использовано в качестве учебного пособия студентами геологических факультетов вузов.

Табл. 32, ил. 106, список лит.— 50 назв.

Рецензент— д-р геол.-минер. наук *И. Г. Коробанова* (ПНИИИС)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород — результат коллективного труда сотрудников кафедры грунтоведения и инженерной геологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО), Производственного и научно-исследовательского института изысканий в строительстве (ПНИИИС), Московского геологоразведочного института (МГРИ) и института Гидропроект.

Новое (2-е) издание построено по несколько иным принципам, чем первое. Первый том посвящен полевым методам инженерно-геологического изучения горных пород; во втором — представлены лабораторные методы и методы математической обработки инженерно-геологической информации. В каждом томе выделены части, посвященные методам изучения компонентного состава, строения, состояния и свойств горных пород. В пределах каждой из этих частей рассмотрены соответствующие методы применительно к скальным и дисперсным породам. Такое построение, во-первых, позволяет более полно охватить существующие полевые и лабораторные методы инженерно-геологических исследований горных пород; во-вторых, помогает читателям ориентироваться в выборе методов и, в-третьих, теснее связывает свойства грунтов с их составом и строением.

Не менее важной особенностью настоящего издания является рассмотрение методов инженерно-геологических исследований горных пород на различных уровнях — от микроскопического до массива, — что отражает общую методологическую направленность инженерно-геологических исследований от частного к общему, от микро- до макроуровня. Большое внимание, которое уделяется в последние годы изучению толщ и массивов горных пород, требует широкого использования методов их исследования непосредственно в полевых условиях. При этом породы, слагающие толщи и массивы, рассматриваются как сложные, многокомпонентные динамические системы, состоящие из твердого вещества, воды, газа и микроорганизмов.

За время, прошедшее с момента выхода первого издания пособия, полевые и лабораторные методы инженерно-геологического изучения горных пород претерпели существенное изменение; появились многочисленные принципиально новые методы, вошедшие в практику инженерно-геологических исследований. Наряду с ними в пособии рассматриваются и традиционные методы, раскрыты их достоинства и недостатки; основное внимание уделено методам, которые хорошо зарекомендовали себя на практике.

Кроме того, в пособие включены новые разделы, посвященные, например, методам изучения биотической компоненты (микроорганизмов) в породах, рациональным схемам сочетания частных методов при изучении пород и т. д.

Авторы с благодарностью примут все критические замечания по настоящему изданию, которые следует направлять по адресу: 119899, Москва, В-234, МГУ, геологический факультет, кафедра грунтоведения и инженерной геологии.

ВВЕДЕНИЕ

История развития инженерной геологии в СССР

В середине XIX в. в России было опубликовано значительное число монографий и статей, в которых авторы, будучи инженерами, рассматривали горные породы как основания, массивы и материалы при постройке заводских зданий, плотин и других сооружений и называли их грунтами.

Знаний инженеров-строителей оказалось недостаточно, когда началось строительство железных дорог. Были привлечены крупнейшие русские геологи — И. В. Мушкетов, А. П. Павлов, В. А. Обручев, А. П. Карпинский, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, С. А. Яковлев и др.; в геологии наметилось новое, «инженерное» направление. В начале XX в. в России широкое распространение получили термины «геолого-технические» и «техико-геологические» изыскания.

С развитием сельского хозяйства появилась необходимость изучения почв в больших масштабах. Исследования почв на громадной территории России, отличающейся разнообразием природных условий, дали возможность русским ученым В. В. Докучаеву, Н. М. Сибирцеву, П. А. Костычеву, В. Р. Вильямсу, К. К. Гедройцу и другим создать науку о почве — почвоведение, — сформулировать основное ее положение — свойства почв формируются в процессе их генезиса — и разработать физико-химические методы изучения почв. Позднее все это было перенесено в грунтоведение и инженерную геологию учениками и последователями В. В. Докучаева, и в первую очередь П. А. Земляченским, Н. И. Прохоровым, Ф. П. Саваренским, М. М. Филатовым и др. Таким образом, в начале XX в. в России существовали определенные предпосылки для развития геологической науки, связанной со строительством. Она должна была возникнуть на стыке геологии с техникой, механикой и физикохимией.

Можно считать, что инженерная геология как наука зародилась в 1923 г., когда в Петрограде Н. И. Прохоров, П. А. Земляченский и Н. Н. Иванов приступили к изучению грунтов в связи со строительством дорог. Возникло грунтоведение, в дальнейшем превратившееся в один из основных разделов инженерной геологии.

Почти одновременно с грунтоведением в геологии сформировалось еще одно научное направление, связанное с гидротехническим строительством и получившее название инженерной геологии. Сущность его заключалась в том, что наряду с изучением пород большое внимание уделялось геологическому строению территории, гидрогеологическим условиям и геологическим процессам, как природным, так и инженерно-геоло-

гическим (антропогенным, техногенным). Различные геологические процессы были главным объектом изучения инженерной геологии, которая возникла в нашей стране благодаря работам Ф. П. Саваренского, Г. Н. Каменского, Н. Ф. Погребова и др.

В 1929 г. была организована первая кафедра инженерной геологии в Ленинградском горном институте, в 1930 г. — первая кафедра грунтоведения в Ленинградском университете. Создание этих кафедр свидетельствует о том, что уже к началу 30-х годов страна нуждалась в специалистах подобного профиля. Большое значение имела организация кафедры инженерной геологии в Московском геологоразведочном институте (1931 г.) и кафедры грунтоведения в Московском университете (1938 г.).

Нельзя изучать процессы вне пород, в которых они развиваются, и породы без учета процессов, под влиянием которых они изменяются. Поэтому по мере развития грунтоведения и инженерной геологии (по существу, инженерной геодинамики) связи между ними расширялись.

После Великой Отечественной войны перед инженерной геологией встала новая задача: характеристика крупных регионов, перспективных для народнохозяйственного освоения, таких, как Западная и Восточная Сибирь, Средняя Азия и др. Это привело к возникновению региональной инженерной геологии, основоположником которой является И. В. Попов.

В результате инженерная геология превратилась в науку, состоящую из трех основных разделов, каждый из которых имеет собственный объект изучения: грунтоведение (любые горные породы и почвы), инженерная геодинамика (экзогенные, эндогенные и антропогенные геологические процессы) и региональная инженерная геология. Объектами изучения инженерной геологии стали грунты, геологические процессы и территории.

Необходимо подчеркнуть, что грунты в нашей стране с самого начала их изучения рассматривались как динамичные во времени природные многокомпонентные системы, состав, строение и свойства которых определяются условиями их формирования и постгенетическими преобразованиями. С этих позиций были выполнены фундаментальные исследования влияния химико-минерального состава и строения грунтов на их свойства, изучены закономерности физико-химических процессов при взаимодействии различных компонентов грунта, разработана теория формирования свойств дисперсных грунтов в ходе литогенеза, внесен существенный вклад в познание природы сжимаемости, прочности, ползучести, просадочности, пльвунности, тиксотропии грунтов, а также разработаны теоретические основы и методы искусственной литификации грунтов, нашедшие широкое применение в практике строительства.

В настоящей книге отражен подход к грунтам как к много-

компонентным системам. Это очень важно, так как только при таком подходе можно решать проблемы рационального использования и охраны геологической среды.

Понятие о геологической среде. Научно-технический прогресс выдвинул проблему рационального использования и охраны окружающей среды. Не только деятельность человечества зависит от окружающей природной среды, но и сам человек может существенно влиять на нее. Это стало возможным на определенном уровне развития производительных сил.

В начале XIX в. уровень развития производительных сил был настолько низким, что даже у передовых, прогрессивных ученых существовало твердое убеждение, что силы человечества несоизмеримы с силами природы.

Например, в монографии «Основные начала геологии» (1831—1833 гг.) Ч. Лайель писал, что силы человечества ничтожны по сравнению с природными силами. По мере развития производительных сил роль человека в природе неизмеримо повысилась. В. И. Вернадский в статье «Несколько слов о ноосфере» (1944 г.) писал об этом так: «Ноосфера — есть новое геологическое явление на нашей планете. В ней впервые человек становится крупнейшей геологической силой. Он может и должен перестраивать своим трудом и мыслью область своей жизни, перестраивать коренным образом по сравнению с тем, что было раньше. Перед ним открываются все более и более широкие творческие возможности... Меняется лик Земли, исчезает девственная природа».

В. И. Вернадский характеризует роль человека не только по отношению к литосфере. С его точки зрения, под влиянием человека находится вся природа в целом, потому что литосфера, гидросфера, биосфера и атмосфера тесно связаны между собой. Если человек «становится крупнейшей геологической силой» (а теперь, через 40 лет после выхода в свет статьи В. И. Вернадского, можно говорить, что человек стал этой силой), т. е. если под его влиянием изменяется литосфера, то еще большие изменения претерпевает биосфера, атмосфера и гидросфера.

Безусловно, на Земле сохранились еще природные условия, которые не изменены деятельностью человека. Они изменяются там, где на них воздействует человек. Деятельность человека тоже определяется конкретными природными условиями, которые его окружают. Отсюда и появился термин «окружающая среда». В окружающую среду входят четыре основных компонента природной среды: литосфера, гидросфера, атмосфера и биосфера. Все они находятся во взаимодействии между собой и с человеческим обществом.

В. И. Ленин в «Философских тетрадах» выделял «две формы объективного процесса: природа (механическая и химическая) и целелогающая деятельность человека».*

* Ленин В. И. Философские тетради.— Полн. собр. соч., т. 29, с. 169—

среда развивается под влиянием этих двух форм и поэтому является новым естественно-социальным понятием, возникшим в результате научно-технического прогресса.

Литосферу изучает геологическая наука, и поэтому та часть ее, которая рассматривается как один из компонентов окружающей среды, может быть названа геологической средой.

Человек живет и действует на поверхности и в приповерхностной части литосферы; к этой части и приурочена геологическая среда. Именно здесь независимо от человека, интенсивно развиваются различные геологические процессы. А. В. Сидоренко в 1967 г. писал: «Ныне внимание человечества обращено на освоение космоса. Одновременно геологи планируют проникновение в глубокие недра Земли для достижения так называемой верхней мантии. Бесспорно, что познание этого уровня земной коры будет иметь огромное значение для понимания многих геологических процессов, проходящих в земной коре, и в первую очередь причин тектонических движений ее — ведущих процессов развития Земли. Однако нельзя забывать и огромного значения тех геологических процессов, которые протекают непосредственно на поверхности и в приповерхностной части Земли. Проблема изучения этих процессов, особенно учитывая вмешательство в них человека, имеет не меньшее значение, чем проблема освоения космоса, околоземного пространства или глубоких недр Земли».

Итак, геологическая среда приурочена к той части Земли, где активно действуют геологические процессы, имеющие огромное влияние как на формирование самой литосферы, так и на деятельность человека.

А. В. Сидоренко правильно подчеркивает, что значение их возрастает из-за вмешательства человека. В 1975 г. инженерные сооружения занимали 5 % суши Земли; прогноз на 2000 г. — 15 %. При этом надо учитывать неравномерность их распределения по площади. Свыше 8 % территории нашей страны приходится на тундровую зону, около 10 % — это сильно заболоченные пространства, почти 5 % относится к высокогорным районам, более 3 % площади занимают подвижные пески. Таким образом, более 25 % страны представляют собой территории, неудобные для возведения на них инженерных сооружений.

При такой нагрузке параметры некоторых инженерных сооружений соизмеримы с отдельными параметрами Земли. Например, длина береговой линии водохранилищ, построенных в СССР, в 1968 г. составляла 33 000 км. На всем этом протяжении идет процесс переработки берегов, который сопровождается в зависимости от природных условий заболачиванием, засолением, возникновением оползней и другими процессами.

Протяженность магистральных оросительных каналов достигает в СССР 300 000 км, а шоссейных и железных дорог —

1 млн. км: в первом случае это $\frac{3}{4}$ расстояния от Земли до Луны, а во втором — в 2,5 раза больше. И оросительные каналы и дороги оказывают определенное влияние на геологическую среду.

Особая роль принадлежит городам, где к концу XX в. предположительно будет жить более половины населения планеты. Уже сейчас по переписи населения 1979 г. в городах Советского Союза проживает 62 % населения страны. Город — это территория, где воздействие человека на поверхностную часть литосферы наиболее интенсивно, разнообразно и весьма значительно; оно может достигать значительной глубины.

При строительстве различных инженерных сооружений в первую очередь изменяется компонентный состав горных пород (твердый, жидкий, газообразный и живой (биотический) компоненты). В результате этого геологическая среда на территории строительства по своему компонентному составу и по составу самих компонентов в той или иной степени отличается от остальной части литосферы.

Исходя из сказанного под геологической средой следует понимать любые горные породы и почвы, слагающие верхнюю часть литосферы и находящиеся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека. Последнее приводит к изменению состава (и, следовательно, свойств) горных пород и природных геологических процессов, а также к возникновению антропогенных геологических процессов, которые могут изменять инженерно-геологические условия определенной территории. Геологическая среда отличается от остальной литосферы особенностями горных пород и протекающих в них геологических процессов.

По мере развития научно-технического прогресса воздействие человека на литосферу становится разнообразнее. Человек все глубже проникает в недра Земли. Следовательно, особенности геологической среды становятся более разнообразными, а мощность ее увеличивается.

При добыче полезных ископаемых мощность геологической среды наибольшая — 1000 м и более, при городском и гидротехническом строительстве (плотины, гидроэлектростанции) она может быть условно принята равной 100 м, а при мелиоративном, дорожном и массовом строительстве в сельской местности — 10 м. В соответствии с этим анализ изменения геологической среды под влиянием человека удобно производить по трем указанным грациям.

Проблеме окружающей среды (а следовательно, и геологической среды) было уделено большое внимание на XXIV, XXV и XXVI съездах КПСС. Ее значение будет возрастать со временем. Из всех геологических наук ближе всех к проблеме рационального использования и охраны геологической среды стоит инженерная геология, так как именно она рассматривает взаимодействие человека с литосферой. Поэтому, как считает

Е. М. Сергеев *, на современном уровне развития инженерная геология может быть охарактеризована как наука о геологической среде.

Таким образом, познание состава, строения и свойств горных пород в инженерно-геологическом плане необходимо для решения не только конкретных вопросов, связанных с отдельными видами строительства, но и глобальных проблем при изучении окружающей и в первую очередь геологической среды.

Классификация методов изучения в инженерной геологии

Как известно, между предметом и методом науки существует диалектическая связь. В соотношении между ними ведущей, определяющей стороной является предмет науки, тогда как метод, если он верен, должен быть адекватным отражением предмета. По Б. М. Кедрову, метод науки есть не что иное, как общий способ достижения адекватного и всестороннего отражения предмета исследования, раскрытия его сущности, познания его законов. Поэтому в научном методе должно быть выражено само содержание изучаемого предмета, его внутренняя природа. Этим определяется объективное значение научного метода в качестве общего подхода к исследованию явлений природы, в том числе и инженерно-геологических явлений. Вместе с тем метод науки при всей его важности всегда играет подчиненную роль по отношению к предмету науки и целиком определяется природой последнего.

Касаясь в целом классификации методов наук и места в ней инженерно-геологических методов, прежде всего целесообразно выделить две основные категории: 1) всеобщие методы познания, являющиеся выражением философских законов материалистической диалектики, 2) специальные методы конкретных наук, изучающих специфические предметы. В свою очередь как всеобщие, так и специальные методы конкретных наук делятся на общие и частные. Объективную основу метода диалектического материализма составляют наиболее общие законы развития материального мира. Диалектический метод не подменяет методы других, в том числе и геологических наук, а является их общей философской основой и выступает в качестве главного орудия познания во всех областях.

Научный метод представляет собой определенную систему познания объекта, при помощи которой осуществляется процесс формирования и анализа знания. Сознательное применение научно обоснованных методов познания является существенным условием получения новых знаний. Но применяемый метод может быть эффективным лишь в том случае, если он

* Сергеев Е. М. Инженерная геология — наука о геологической среде. — Инженерная геология, 1979, № 1, с. 3—19.

способствует наиболее полному и всестороннему отражению в научном знании объективных свойств и причинно-следственных связей изучаемого объекта. Поэтому марксистская гносеология отвергает идеалистическое истолкование метода как совокупности определенных правил, которые произвольно конструируются исследователем для удобства формирования знаний.

Как известно, марксистская гносеология рассматривает два уровня научного познания: эмпирический и теоретический, неразрывно связанные друг с другом и представляющие единый процесс научного познания. При этом все основные методологические принципы, формулируемые марксистской гносеологией, полностью относятся как к теоретическому, так и к эмпирическому познанию.

Исходя из изложенного можно дать понятие инженерно-геологического метода как специального метода познания: метод инженерной геологии представляет собой определенную систему познания геологической среды, при помощи которой осуществляется процесс формирования, накопления и анализа инженерно-геологических знаний. Метод инженерной геологии является специальным, поскольку он является методом конкретной науки. В свою очередь он включает и частные методы (рис. 1).

К общим методам, используемым инженерной геологией, относятся прежде всего собственно геологические методы: регионально-генетический и историко-геологический. В геологических науках эти методы имеют свои исторические корни. Еще М. В. Ломоносов в своих геологических работах высказал ряд научных положений, из которых следует, что состав и свойства горных пород определяются способом, временем и местом их образования, что горные породы постепенно и непрерывно изменяются под воздействием эндогенных и экзогенных процессов.

Однако в современной инженерной геологии среди исследователей нет единства в терминологии указанных методов. Некоторые исследователи (П. Н. Панюков и др.) объединяют их под общим названием «регионально-геологический метод». Тем не менее смысл этих методов остается тот же: геологические явления и процессы зависят от конкретной геологической истории развития данного района.

Регионально-генетический и историко-геологический методы прежде всего предполагают выявление различных особенностей геологического строения и геологической истории развития данного района как основных факторов формирования физических, физико-химических и физико-механических свойств грунтов. Под этим понимается изучение генезиса, возраста и возрастно-генетических признаков грунта, определение зональных условий его залегания в современном геологическом разрезе, выявление влияния поясно-географических факторов выветривания грунта и расшифровка его текстурно-структурных особенностей.

Изучение этих зависимостей служит научной основой для правильного ведения исследований грунтов, инженерно-геологического прогнозирования и разработки нормативно-технических рекомендаций к проекту строительства на данной территории.

К частным методам, используемым инженерной геологией, относятся: 1) экспериментальные инженерно-геологические (инженерно-геологические съемка и разведка, опытные полевые ра-

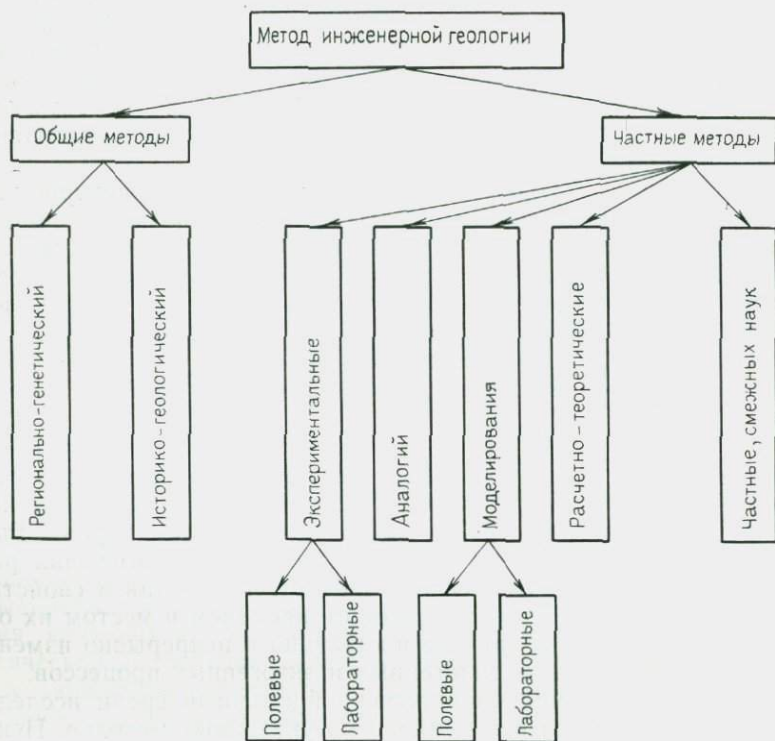


Рис. 1. Система методов инженерно-геологических исследований

боты, стационарные и режимные наблюдения, геофизические и лабораторные методы); 2) аналогий (геологического подобия); 3) инженерно-геологического моделирования; 4) расчетно-теоретические (корреляционные, статистические, математические и т. д.). Находясь на стыке нескольких наук, инженерная геология кроме собственных частных методов исследований широко использует также методы смежных геологических и инженерно-строительных наук (гидрогеологии, мерзловедения, почвоведения, механики и др.), а также математики, физики, химии.

Использование тех или иных методов в инженерно-геологических исследованиях зависит от ряда обстоятельств: особенностей изучаемого инженерно-геологического объекта, целей ис-

следования, характера научной проблематики, уровня познания в данной конкретной области или направлении инженерной геологии. На эмпирическом уровне познания в инженерной геологии особенно широко применяются такие частноконкретные методы исследования, как наблюдение, описание, эксперимент, измерение. По мере перехода от эмпирической стадии познания к теоретическим обобщениям роль методологических принципов неизмеримо возрастает. Особенно это касается расчетно-теоретических методов.

Общие методы инженерно-геологических исследований достаточно полно разбираются в различных пособиях и учебниках по инженерной геологии.

Характеристика частных методов инженерной геологии

Группа экспериментальных методов объединяет многочисленные методы инженерно-геологических исследований, проводимых различными экспериментальными способами с использованием соответствующих инструментов и оборудования. С их помощью качественная оценка и характеристика геологических условий данного места возведения сооружения дополняется количественной информацией о составе, строении и свойствах пород, а также количественными характеристиками геологических процессов и явлений на исследуемой территории.

Экспериментальные методы инженерно-геологических исследований включают методы инженерно-геологической съемки, разведочных работ, опытных полевых работ, режимных стационарных наблюдений, геофизические и лабораторные. Существенную роль экспериментальные методы играют также в организации и проведении различных научно-исследовательских работ в инженерной геологии.

1. Методы инженерно-геологической съемки, являющейся комплексным исследованием, включающим изучение, оценку и изображение на карте комплекса элементов, характеризующих инженерно-геологические условия территории, объединяют ряд методов собственно процесса съемки (маршрутный, «ключевых участков» и т. д.) и дополнительные, сопровождающие съемку (ландшафтно-индикационные, аэрофотосъемочные и аэрокосмические, геофизические, горнопроходческие и буровые и т. д.) и обеспечивающие необходимые детальность и достоверность исследований. Эти методы применяются в первую очередь на стадии рекогносцировочных инженерно-геологических исследований и в меньшей мере — на стадиях предварительных и детальных изысканий. Кроме того, они определяются масштабом и видом инженерно-геологической съемки. При инженерно-геологической съемке ведется изучение свойств пород, в частности их состава и состояния, с помощью различных дистанционных и наземных (маршрутных) методов, характеристика которых дана в первом томе книги. Вопросы методологии такой съемки,

в частности методика инженерно-геологического картирования, подробно освещены в соответствующей литературе.

2. Методы разведочных работ используются прежде всего для изучения геологического разреза и отбора образцов горных пород (опробования) для дальнейших лабораторных исследований и постановки опытных полевых работ. Они делятся на буровые методы и разведку горными выработками. В свою очередь буровые методы по способу бурения делятся на ударные (ударно-канатный, грейферный, пневмоударный и т. д.), вращательные (колонковый, шнековый, роторный и т. д.) и комбинированные. Горно-разведочные методы делятся на разведку шурфами, шахтами, штольнями и т. д. Как правило, эти методы применяются в комплексе с геофизическими и пенетрационно-каротажными.

Методы разведочных работ используются главным образом на стадиях детальных инженерно-геологических исследований и в меньшей мере на рекогносцировочных и предварительных стадиях.

3. Методы полевых опытных работ используются с целью изучения состава, строения, состояния и свойств горных пород. Это одна из многочисленных групп методов инженерно-геологических исследований, которая рассматривается в первом томе пособия. Значение и роль таких методов неизмеримо возрастают в настоящее время, поскольку только на их основе можно при проектировании различных сооружений принимать оптимальные и экономически наиболее выгодные инженерные решения.

Методы полевых опытных работ на изучаемом объекте включают:

методы изучения компонентного состава горных пород (инструментальные методы изучения состава твердого, жидкого, газообразного и биотического компонентов пород);

методы изучения строения горных пород (инструментальные методы изучения структуры и текстуры пород, гранулометрического состава и т. д.);

методы изучения состояния горных пород (опытно-инструментальные методы изучения обводненности, плотности, трещиноватости, степени выветрелости и напряженного состояния горных пород и т. д.);

методы изучения свойств горных пород, главным образом физико-механических (опытно-инструментальные методы изучения деформационных, прочностных и реологических свойств пород, в том числе пробные нагрузки в шурфах и скважинах, прессиометрия, крыльчатое зондирование, опытные сдвиги, обрушения и выпирания в шурфах и т. д.).

Эти методы применяются главным образом на стадиях детальных инженерно-геологических исследований и в меньшей степени на предварительной стадии изысканий.

4. Методы режимных стационарных наблюдений использу-

ются с целью количественной оценки проявления и развития различных геологических процессов (неотектонических, сейсмических, экзогенных и инженерно-геологических) и режима подземных вод, а также с целью проверки правильности инженерно-геологических прогнозов. Назначение методов режимных стационарных наблюдений, согласно В. Д. Ломтадзе и Г. С. Золотареву, определяется тем, что для геологического обоснования тех или иных проектов сооружений и инженерных работ требуется полная характеристика инженерно-геологических условий территорий или строительных площадок. При этом важно знать не только условия, но и динамику их развития — изменение отдельных элементов этих условий во времени. Наблюдение за динамикой процессов и явлений на различных наблюдательных стационарах с целью выявления закономерностей и обусловленности этих процессов и составляет содержание режимных стационарных наблюдений.

Применение методов режимных стационарных наблюдений позволяет решать следующие инженерно-геологические задачи: 1) получать качественные и количественные характеристики и оценку процессов и явлений во времени; 2) устанавливать закономерности развития различных процессов и явлений и выявлять их причины; 3) предупреждать проявление и развитие катастрофических и опасных процессов; 4) прогнозировать развитие различных, и в том числе опасных, процессов; 5) обосновывать необходимые мероприятия по охране геологической среды.

Выделяются следующие виды режимных стационарных наблюдений: 1) метеорологические и гидрологические; 2) гидрогеологические; 3) геотермические; 4) за деформациями масс горных пород (оползней, склонов, откосов и т. д.); 5) за деформациями и осадками сооружений; 6) за развитием различных экзогенных процессов (эрозии, выветривания, абразии и т. д.) и физическим состоянием горных пород.

В основном методы режимных стационарных наблюдений используются при детальных инженерно-геологических исследованиях, однако в ряде случаев они применяются на предварительной и дополнительной стадиях изысканий.

5. Методы геофизических исследований позволяют решать целый ряд задач как в ходе инженерно-геологической съемки, так и при разведочных и опытно-полевых работах, а также при режимных стационарных наблюдениях. Все эти методы основаны на изучении различных физических полей Земли.

В практике инженерно-геологических исследований широко применяются геофизические методы: электрические (ВЭЗ, ЭП, ЭК и др.), сейсмические (МОВ, МПВ и др.), гравиметрические, магнитометрические и ядерные. Значение этих методов в инженерной геологии постоянно возрастает.

Наибольший эффект применение геофизических методов при инженерно-геологических исследованиях дает в случаях существ-

венной неоднородности геологической среды по тем или иным параметрам (влажности, плотности, трещиноватости и т. д.). В настоящее время такие методы исследования горных пород в инженерно-геологических целях применяются как в полевых, так и в лабораторных условиях, поэтому в настоящем пособии рассмотрению этой группы методов уделено значительное внимание.

6. Методы лабораторных инженерно-геологических исследований объединяют очень много инструментальных методов инженерно-геологических исследований горных пород, проводимых с использованием различной аппаратуры. Полевое изучение горных пород всегда сопровождается лабораторными исследованиями практически при всех видах инженерно-геологических изысканий.

По изучаемому объекту лабораторные инженерно-геологические методы можно подразделить на:

методы изучения компонентного состава горных пород (химические, рентгеновские, оптические, электронно-микроскопические, хроматографические, адсорбционные, термические и т. д.);

методы изучения строения (структуры и текстуры) горных пород (гранулометрия, оптические, электронно-микроскопические, ультразвуковые, люминесцентные, магнитные, адсорбционные, рентгеновские и др.);

методы исследования физических свойств горных пород (объемно-весовые, электрические, магнитные, акустические, фильтрационные и др.);

методы изучения физико-химических свойств горных пород (термодинамические, адсорбционные, электрические, тензиометрические, фильтрационные и др.);

методы изучения физико-механических свойств горных пород.

Во втором томе настоящего пособия экспериментальные лабораторные методы инженерно-геологического изучения горных пород рассматриваются именно в такой последовательности.

В группу методов аналогий (геологического подобия) объединяются методы инженерно-геологических исследований, основанные на сравнении и сопоставлении изучаемых процессов или явлений с уже изученными, испытанными или им подобными. При этом заключение об инженерно-геологических условиях территории, развитии тех или иных процессов и явлений, а также условиях строительства и устойчивости сооружений делается на основе сравнения с аналогичными условиями, изученными ранее. Таким образом, любое сооружение, возведенное в определенных инженерно-геологических условиях, с точки зрения геологического подобия является экспериментом, который должен изучаться инженерной геологией, обогащать ее теоретические основы и практический опыт.

Методы аналогий используются в различных модификациях: «сравнительно-геологический» (по Г. С. Золотареву); природ-

ных аналогов (по Л. Б. Розовскому); инженерно-геологических аналогий (по Н. В. Коломенскому).

Преимуществом этих методов является то, что они позволяют охарактеризовать различные сложные инженерно-геологические явления в целом как результат действия не одного, а многих факторов. Однако они имеют определенные пределы применимости и степень точности. Успешное применение методов аналогий требует специальных наблюдений по достаточно большому числу объектов, обобщения опыта строительства и высокой квалификации инженера-геолога. Методика данных работ приводится в различных специальных инженерно-геологических руководствах и в настоящем пособии не рассматривается.

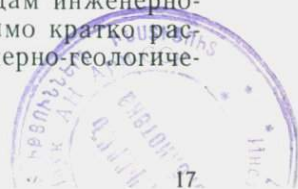
Группа методов инженерно-геологического моделирования включает методы, сущность которых состоит в построении модели изучаемого природного объекта, процесса или проектируемого сооружения. Их можно подразделить на методы логического и вещественного моделирования, которые используются как в полевых, так и в лабораторных условиях.

Принято выделять следующие виды моделирования: 1) оптическое; 2) с эквивалентными материалами; 3) механических деформаций на центрифугах; 4) гидравлическое; 5) гидрохимическое; 6) физико-химическое (например, процессов выветривания) и др. В результате испытания построенных моделей судят о моделируемых объектах или процессах и получают их качественную или количественную характеристику. Особенно перспективно применение моделирования при изучении напряженного состояния и развития деформаций в массивах горных пород и при оценке того или иного фактора или геологического явления в совокупности. Однако эти методы также имеют определенные ограничения. Методика их использования в инженерной геологии рассматривается в специальной литературе.

В группу расчетно-теоретических методов объединяются различные математические методы, основанные на математической обработке количественной информации о различных инженерно-геологических процессах и явлениях, состояниях и состоянии горных пород и т. д. В последнее время широкое распространение расчетно-теоретические методы получают благодаря интенсивному использованию ЭВМ для решения различных инженерно-геологических задач.

Методы этой группы подробно рассматриваются в настоящем пособии главным образом применительно к изучению свойств пород.

В связи с тем, что в пособии большое место уделено экспериментальным (полевым и лабораторным) методам инженерно-геологического изучения горных пород, необходимо кратко рассмотреть некоторые вопросы методологии инженерно-геологического эксперимента.



Вопросы методологии инженерно-геологического эксперимента

Развитие инженерной геологии, в том числе и отдельных ее направлений, закономерно связано с экспериментом. В настоящее время экспериментальные исследования составляют базу для развития всех отраслей научного знания, включая и инженерную геологию. Экспериментальный метод позволил перейти от общих исследований природных геологических объектов к специфическим инженерно-геологическим исследованиям и выделить характерные процессы в геологической среде.

Таким образом, в настоящее время эксперимент является важным методом научного познания в инженерной геологии. Он непосредственно связан с объективными природными процессами и осуществляется при помощи различной аппаратуры. В ходе эксперимента исследователь с определенной целью преднамеренно преобразует предметы и явления природы, используемые в качестве объектов исследования. В силу этого эксперимент как форма практики объективен по содержанию.

В инженерной геологии в процессе того или иного эксперимента изучаются горные породы и связанные с ними явления, существующие в природе. При этом исследуемый объект изучается в его многообразной, диалектической взаимосвязи с конкретным материальным окружением. В том числе горные породы (как грунты) изучаются как многокомпонентные, динамичные, развивающиеся во времени системы, находящиеся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека.

Эксперимент в инженерной геологии, как и в других науках, позволяет раскрыть явление, недоступное непосредственному изучению в природных условиях. Исследователь, искусственно вызывая то или иное явление или изменение породы, раскрывает путем многократного повторения и изменения условий эксперимента новые, существенные и главные в этом взаимодействии свойства изучаемого объекта. Посредством эксперимента можно проникнуть в природу свойств горных пород и явлений, связанных с ними.

К числу основных познавательных операций, связанных с инженерно-геологическим экспериментом, относятся следующие.

1. Определение целей экспериментального исследования, которые формируются на базе существующих теоретических концепций инженерной геологии с учетом потребностей строительной и инженерной практики и потребностей развития того или иного направления инженерной геологии.

2. Теоретическое обоснование объекта и условий инженерно-геологического эксперимента, которые способствовали бы наиболее полному и всестороннему проявлению заданных свойств и связей изучаемого инженерно-геологического объекта или связанного с ним явления.

3. Конструирование, создание и подбор технических средств и устройств, необходимых для проведения экспериментального

исследования. Для контроля за ходом эксперимента желательно предусмотреть автоматическую регистрацию и запись соответствующих параметров.

4. Измерение, наблюдение и фиксирование различных объективных свойств инженерно-геологического объекта, связей и тенденций развития явлений, которые обнаруживаются в ходе эксперимента.

5. Обработка математическими (статистическими) методами с применением ЭВМ результатов инженерно-геологического эксперимента, построение различных схем, диаграмм и графиков, необходимых для последующего теоретического анализа полученных результатов.

По сфере применения в инженерной геологии эксперименты делятся на лабораторные и полевые. Причем роль последних возрастает при реализации различных методов воздействия на грунты в промышленности и внедрении результатов научных исследований в производство. Важная роль в развитии экспериментальных исследований принадлежит также техническому оснащению — «индустриализации» инженерной геологии, которая в настоящее время берет на вооружение самые современные приборы и оборудование, в том числе рентгеновские аппараты, электронные микроскопы, совершенные геофизические приборы, лазерные устройства, быстродействующие ЭВМ и др. Техническое оснащение инженерной геологии — один из главных путей повышения производительности труда в научных и производственных инженерно-геологических учреждениях, открывающий широкие возможности при освоении и внедрении новейших методов исследований, применении быстродействующих ЭВМ и автоматизированных систем в планировании и проведении экспериментов.

**МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО
ОПРОВОДАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Глава I

**ЦЕЛИ И СТРУКТУРА ИНЖЕНЕРНО-
ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОВОДАНИЯ**

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Цель любых инженерно-геологических исследований заключается в получении информации об инженерно-геологических условиях, в том числе о составе и свойствах горных пород и грунтов. Данные о составе горных пород, их структуре и текстуре получают в ходе инженерно-геологического опробования. Оно включается в состав любых инженерно-геологических исследований. Инженерно-геологическое опробование представляет собой комплекс методов, устанавливающих число и пространственное размещение точек измерения геологических параметров или точек отбора образцов, способы их отбора и консервации, который совместно с другими методами (горно-буровыми, специальными полевыми и лабораторными) обеспечивает получение информации требуемого качества о составе и свойствах горных пород или грунтов.

Методы опробования должны учитывать состав и свойства горных пород, характер их пространственной изменчивости, анизотропность мер их рассеяния в пределах квазиоднородных областей, а также целевое назначение инженерно-геологических работ (тип и класс сооружения, стадия изысканий и др.).

Конечная цель инженерно-геологического опробования заключается в получении информации требуемого качества о составе, структурно-текстурных особенностях и свойствах горных пород и фазовых систем — грунтов, слагающих геологические тела. Под геологическим телом понимают некоторый объем пространства, занятый горными породами с непрерывными в них водой и газами, внутри которого остаются непрерывными те их свойства (или геологические параметры), на основании которых выделена геологическая граница, оконтуривающая этот объем.

При инженерно-геологическом опробовании используются методы: а) установления объемов работ (числа полевых испытаний грунтов, горных и буровых выработок, образцов); б) установления пространственного размещения точек опробования (горных и буровых выработок, мест полевых испытаний пород, точек отбора образцов), определения типа систем опробования и расчета их параметров (см. разд. 2.2); в) отбора и консерва-

ции образцов. Методы, перечисленные в двух первых пунктах, обеспечивают оптимизацию инженерно-геологических исследований (горно-буровых и геофизических работ, полевых испытаний грунтов и др.) в части их объемов и пространственного размещения и в конечном счете — получение оптимальной информации о составе горных пород и свойствах грунтов.

Работы по инженерно-геологическому опробованию выполняют в определенной последовательности. Сначала тем или иным способом (см. разд. 3.3) устанавливают число точек опробования, затем выбирают систему опробования (СО) и рассчитывают ее параметры (см. разд. 2.2). Если исходные данные, нужные для расчета параметров СО, отсутствуют (данные предыдущих исследований), то приходится проводить рекогносцировочные работы по опробованию. Целью этих работ является получение информации, необходимой для расчета числа точек опробования, выбора ориентировки СО и расчета ее параметров. После расчета объемов опробования и параметров СО проводят горно-буровые работы, полевые испытания грунтов, отбор образцов и их консервацию. При рекогносцировочных работах по опробованию используют геофизические (преимущественно электроразведочные) или специальные инженерно-геологические (динамическая и статическая пенетрация, пенетрационный каротаж, крыльчатое зондирование, искиметрия) методы. Применение этих методов дает возможность: 1) установить главные направления изменчивости геологических параметров или проверить правильность выводов об их ориентировке, полученных ранее на основании анализа геологических данных; 2) выделить квазиоднородные по изучаемым свойствам геологические тела, применительно к которым рассчитывают системы опробования; 3) получить количественные данные, нужные для оценки структуры полей геологических параметров в сечениях, ориентированных по главным направлениям изменчивости (режимов пространственной изменчивости); 4) получить данные о мерах рассеяния геологических параметров (средние квадратические отклонения, коэффициенты изменчивости), требуемые для расчетов числа точек опробования и параметров систем опробования. Если в процессе предыдущих исследований, на более ранней стадии изысканий, получена информация, достаточная для решения перечисленных задач, то необходимость в рекогносцировочных работах отпадает.

После расчета объемов и параметров систем опробования рассчитанные системы опробования реализуют в натуре путем проведения горно-буровых работ или полевых испытаний грунтов (эти методы не входят в состав инженерно-геологического опробования), намечают методы отбора образцов (точный, бороздовый, валовой или их комбинацию), производят отбор образцов и их консервацию.

Образцом грунта следует считать любой объем грунта, отобранный для дальнейшего изучения. В зависимости

от цели изучения и способа отбора образца структура, текстура, объемная плотность и естественная влажность грунта могут быть сохранены такими же, как в массиве (*in situ*), или изменены при отборе. Образец грунта, в котором сохранены структура, текстура, объемная плотность и естественная влажность, называется монолитом.

Под пробой грунта понимают объем грунта, отделенный или не отделенный от массива, взаимодействующий в ходе испытаний с лабораторным прибором (оборудованием) или с рабочим устройством полевого прибора (установки). В первом случае пробу строго или приближенно определенного в соответствии с требованиями нормативов объема (массы) вырезают из образца грунта. Такую пробу называют лабораторной. При испытании грунтов полевыми методами с рабочим органом полевого прибора взаимодействует некоторая фиксированная область грунта, залегающего (*in situ*) в массиве (аналог сферы взаимодействия геологической среды с сооружением). Подобная проба называется полевой.

Наряду с лабораторной и полевой пробами грунта следует различать статистическую пробу. Под статистической пробой следует понимать объем грунта в массиве, равный области автокорреляции опробуемого геологического параметра*. Статистическая проба определяет максимальную густоту опробования геологического тела.

1.2. МЕТОДИКА ОПРОБОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Число и название стадий инженерно-геологических исследований, проводимых для обоснования проектов разных сооружений, неодинаковы. Однако изыскания для строительства любых сооружений предусматривают проведение инженерно-геологических работ: в некотором районе для определения местоположения будущей строительной площадки; в пределах выбранной площадки с целью определения мест возведения проектируемых сооружений; на месте постройки намеченного сооружения в пределах предполагаемой сферы взаимодействия для получения информации, необходимой и достаточной для окончательного расчета сооружения и разработки проекта защитных мероприятий.

На месте строительства ответственных сооружений инженерно-геологические исследования проводят с целью проверки инженерно-геологических данных, полученных ранее, и корректировки рабочих чертежей и проекта строительных работ. При

* Статистическую пробу устанавливают с учетом размеров корреляции того показателя свойств, для которого они минимальны.

$$V_{\text{кор}} = r_{\kappa, \xi_1} \cdot r_{\kappa, \xi_2} \cdot r_{\kappa, \xi_3} \cdot \dots$$

проведении таких исследований выполняют инженерно-геологическое опробование, цели и задачи которого изменяются в зависимости от стадий.

В ходе предпроектных проработок выбирается место предполагаемого строительства. Эту задачу решают в два этапа. Сначала производится обоснование технической возможности и экономической целесообразности строительства намеченных сооружений в данном районе. Затем путем технико-экономического анализа предварительных проектных проработок, выполненных для различных участков размещения сооружений (вариантов), выбирают оптимальный вариант размещения строительной площадки. Для обоснования технической возможности и экономической целесообразности строительства сооружений в районе проектировщик наряду с другой информацией должен располагать данными об инженерно-геологических условиях района. Эти данные получают в процессе инженерно-геологической съемки среднего масштаба (1 : 100 000—1 : 500 000). В процесс съемки входит инженерно-геологическое опробование, цель которого заключается в получении информации о минеральном и гранулометрическом составе и свойствах пород, слагающих стратиграфо-генетические комплексы (СГК) и монопородные геологические тела первого уровня расчленения (МГТ-1) — петрографические типы (по И. В. Попову). Эта информация используется для уточнения названий пород, установленных при визуальном изучении, для характеристики состава и свойств МГТ-1, распространенных на больших площадях. Главнейшие задачи, решаемые в процессе инженерно-геологического опробования, состоят в: 1) уточнении выводов об ориентировке главных направлений изменчивости; 2) корректировке положения границ СГК и МГТ-1; 3) характеристике состава и свойств пород, составляющих МГТ-1; 4) характеристике свойств грунтов на участках проявления экзогенных геологических процессов.

В процессе опробования отбирают образцы главным образом с нарушенной структурой для определения минерального и гранулометрического состава и классификационных показателей. Некоторое сравнительно небольшое число частных значений показателей прочности и сжимаемости получают экспресс-методами (одноосное сжатие, микропенетрация) или в процессе динамической (статической) пенетрации, искиметрии, пенетрационно-каротажных испытаний грунтов. Работы по опробованию сосредоточивают в основном на ключевых участках и на участках проявления экзогенных геологических процессов (ЭГП). Доверительная вероятность оценок показателей свойств грунтов, приводимых в виде размахов значений, характеризующих выделенные МГТ-1, не превышает 0,8.

В пределах ключевых участков используют регулярные системы опробования (см. разд. 2.2), рассчитывая их параметры по данным рекогносцировочных работ. Информацию о составе

и свойствах грунтов представляют в виде таблиц, в которых приводятся главнейшие МГТ-1, составляющие SGK и соответствующие им размахи значений показателей свойств.

Технико-экономическое сравнение вариантов требует более детальной инженерно-геологической информации. Ее получают в ходе инженерно-геологической съемки крупного (1 : 50 000 и более) масштаба. Инженерно-геологическое опробование, включаемое в съемку, имеет следующие цели: уточнить положение границ выделенных по геологическим данным геологических тел категории МГТ-1; охарактеризовать минеральный и гранулометрический состав, а также классификационные показатели грунтов, составляющих геологические тела; оценить структуру полей классификационных показателей (установить их пространственную изменчивость в сечениях, ориентированных по главным направлениям). Инженерно-геологическое опробование ведется в ходе горно-буровых работ. Выработки и места проведения полевых испытаний пород при крупномасштабной инженерно-геологической съемке располагают: 1) в точках, представляющих интерес с точки зрения выявления особенностей геологической, тектонической, гидрогеологической, геоморфологической структур исследуемой области литосферы (геологические границы, сбросы, зоны дробления, сопряжение геоморфологических элементов, области разгрузки подземных вод, проявления ЭГП); 2) по регулярным системам опробования, которые в совокупности охватывают территорию инженерно-геологической съемки.

Данные о свойствах грунтов получают в процессе их испытания динамической и статической пенетрацией, пенетрационно-каротажными методами и экспресс-методами (одноосное сжатие, микропенетрация, ядерно-физические и др.). Это позволяет дополнить информацию о составе и свойствах грунтов показателями, характеризующими их прочность и сжимаемость, и способствует объективному выбору оптимального варианта. Оценки классификационных показателей, характеризующих МГТ-1, даются в виде размахов. Показатели пенетрации, временного сопротивления сжатию, предельного напряжения сдвига и подобные им после проверки однородности статистического материала могут быть представлены в виде средних значений. Доверительная вероятность информации о свойствах грунтов 0,7—0,9. Она может быть показана в виде: 1) размахов классификационных показателей и оценок показателей, полученных полевыми методами, непосредственно на картах (внутри границ соответствующих МГТ-1); 2) поверхностей регрессии показателей, не испытывающих разрывов непрерывности на границах, разделяющих МГТ-1 (например, естественная влажность, сопротивление пенетрации); 3) табличных приложений.

После выбора оптимального варианта расположения планируемые объекты проектируют применительно к определенной строительной площадке (варианту трассы линейного сооруже-

ния). Используя информацию о свойствах геологической среды (компонентах инженерно-геологических условий), проектировщик должен: разместить на строительной площадке здания и сооружения; провести предварительные расчеты оснований, выбрать типы фундаментов; разработать проект защитных мероприятий. С целью получения минимума инженерно-геологической информации, необходимого и достаточного для решения перечисленных вопросов, на выбранной площадке проводят инженерно-геологическую разведку. В нее наряду с горно-буровыми работами и полевыми испытаниями грунтов входит инженерно-геологическое опробование. Цели опробования при этом заключаются в: 1) уточнении расчленения геологической среды на геологические тела категории МГТ-2 (расчленение проводят на глубину сферы взаимодействия наиболее тяжелого из проектируемых на данной строительной площадке сооружений); 2) получении средних значений классификационных показателей для выделенных геологических тел с доверительной вероятностью, предусмотренной СНиП; 3) определении частных значений (или малых выборок) показателей плотности и сжимаемости, характеризующих выделенные геологические тела категории МГТ-2.

Компоновку сооружений, под которой понимают их оптимальное размещение на площадке предполагаемого строительства с учетом архитектурно-планировочного решения (гражданское строительство) или технологической схемы производственного процесса (промышленное строительство), проводят, руководствуясь данными предварительных расчетов оснований. Расчеты в свою очередь требуют предварительного построения расчетной схемы каждого из проектируемых сооружений в любом месте площадки. Расчетная схема — это чаще всего графическая модель вертикального, выбранного для расчетов сечения сферы взаимодействия на всю ее глубину (на котором геологическая среда разделена на расчетные элементы), дополненная нужными для расчета инженерно-геологического процесса данными (уровень грунтовых вод, проектная врезка сооружения и т. д.).

Под расчетным элементом понимают инженерно-геологическое тело, представленное одной или несколькими разными по минеральному составу породами, для которого по условиям расчета допускается обобщение значений показателя, характеризующего отдельные, входящие в него инженерно-геологические элементы, или принятие для расчета показателя одного из входящих в него инженерно-геологических элементов.

Обобщение значений показателя чаще всего заключается в вычислении среднего взвешенного (по мощности) значения показателя, используемого в расчете инженерно-геологического процесса. Иногда, если это диктуется требованиями расчета (например, расчет устойчивости сооружения), в качестве показателя, характеризующего весь расчетный элемент, выбирается

наиболее неблагоприятное его значение — среднее значение одного инженерно-геологического элемента. Расчетные элементы составляют из инженерно-геологических элементов в камеральных условиях.

Инженерно-геологическим элементом считают инженерно-геологическое тело, представленное одной горной породой, статистически однородное по некоторому показателю свойств, выбираемому в каждом конкретном случае исходя из требований расчета. Объем и конфигурацию такого элемента устанавливают с учетом данных о свойствах геологической среды, а также типах и технических характеристиках сооружения. Инженерно-геологические элементы выделяют в камеральных условиях на основании результатов статистической обработки информации о свойствах грунтов (проверка законов распределения и однородности выборок с помощью статистических критериев, подсчет статистик).

Для выделения инженерно-геологических элементов и их характеристики используют результаты опробования, которое ведут по регулярным системам в пределах строительной площадки на глубину сферы взаимодействия (в простейшем случае на глубину активной зоны) наиболее тяжелого из проектируемых сооружений. Такое требование объясняется тем, что проектировщик должен иметь возможность проверить различные варианты компоновки сооружений и, следовательно, должен иметь информацию для расчета основания каждого из проектируемых сооружений в любом месте строительной площадки. В процессе инженерно-геологического опробования отбирают образцы грунта с нарушенной структурой для определения классификационных показателей. По оценкам этих показателей в соответствии со СНиП выбирают нормативные значения показателей свойств грунтов, используемые для предварительных расчетов. На участках предпочтительного размещения ответственных сооружений отбирают монолиты для определения прочности и сжимаемости грунтов. Данные о свойствах грунтов получают в процессе полевых испытаний (пенетрация, прессиометрия, опытные нагрузки и др.).

После выбора места расположения конкретного сооружения проводится окончательный расчет основания и разрабатывается проект проведения строительных работ. Для этого нужна инженерно-геологическая информация о свойствах геологической среды (геологическое строение, гидрогеологические условия, свойства грунтов) в пределах предполагаемой сферы ее взаимодействия с сооружением. Информацию получают в ходе детальной инженерно-геологической разведки, которую ведут внутри границ указанной сферы. В состав разведки, помимо горно-буровых работ и полевых испытаний грунтов, входит инженерно-геологическое опробование. Задачи опробования, проводимого в рамках детальной инженерно-геологической разведки, заключаются в: 1) разделении разреза пород в расчет-

Характеристики инженерно-геологического опробования на разных стадиях изысканий

Таблица 1

Изучаемая территория (область геологической среды)	Комплекс методов	Геологические тела	Характеристика показателей свойств грунтов	Доверительная вероятность	Форма представления данных о свойствах грунтов	Размещение точек опробования
Район предполагаемого строительства	Среднемасштабная инженерно-геологическая съемка	СГК, МГТ-1	Классификационные показатели пенетрации, пенетрационного каротажа, временное сопротивление сжатию, предельное напряжение сдвига	<0,8	Частные значения показателей, характеризующие минеральный состав Частные значения показателей, получаемые полевыми методами Размахи классификационных показателей для МГТ-1	В местах, представляющих интерес с геологической точки зрения
Возможный вариант размещения сооружений	Крупномасштабная инженерно-геологическая съемка	МГТ-1	Классификационные показатели состояния; показатели, характеризующие сравнительную прочность и сжимаемость, полученные экспресс-методами	<0,9	Размахи классификационных показателей Частные значения показателей прочности и сжимаемости Оценки средних значений показателей пенетрации	Регулярные СО на ключевых участках В местах, представляющих интерес с геологической точки зрения
Строительная площадка	Инженерно-геологическая разведка	МГТ-2	Классификационные показатели, показатели состояния, прочности и сжимаемости	0,85—0,95	Оценки средних значений классификационных показателей Частные значения показателей прочности и сжимаемости	Регулярные СО на площади съемки
Предполагаемая сфера взаимодействия геологической среды с сооружением	Детальная инженерно-геологическая разведка	МГТ-3	Показатели прочности и сжимаемости, в том числе полученные полевыми методами. Классификационные показатели	0,85—0,95	Оценки средних значений показателей прочности и сжимаемости Частные значения показателей, полученные полевыми методами	По осям и контурам сооружения, по расчетным сечениям

ном сечении сферы взаимодействия на геологические тела категории МГТ-3; 2) получении статистического материала (показатели свойств грунтов), обеспечивающего возможность применения статистических критериев однородности для выделения инженерно-геологических элементов внутри сферы взаимодействия; 3) характеристике выделенных геологических и инженерно-геологических тел оценками средних значений с требуемой достоверной вероятностью.

Получаемая в ходе детальной разведки инженерно-геологическая информация должна быть достаточной для построения расчетной схемы. Поскольку, как отмечалось, расчетная схема представляет собой модель вертикального сечения сферы взаимодействия, опробование грунтов должно проводиться так, чтобы получить данные об их свойствах в расчетном сечении этой зоны. Место постройки, размеры, конфигурация сооружения в плане и распределение нагрузок известны до начала разведки. Вследствие этого горные и буровые выработки, точки проведения полевых испытаний грунтов размещают по осям (контурам) сооружения и вертикальным сечениям предполагаемой сферы взаимодействия, которые являются расчетными сечениями. Такое расположение выработок (мест полевых испытаний) позволяет получить инженерно-геологический разрез и на его основе построить расчетную схему.

Выработки проходят до нижней границы сферы взаимодействия. Из скважин (шурфов) отбирают монолиты, по которым наряду с другими показателями свойств грунтов определяют показатели прочности и сжимаемости. Объем опробования должен быть достаточен для получения среднего значения с достоверной вероятностью 0,85—0,95. Для уникальных сооружений достоверная вероятность повышается до 0,99. Интервал опробования внутри однородного по минеральному и гранулометрическому составу слоя пород рассчитывают по правилам, изложенным в СНиП. Некоторые сведения, характеризующие инженерно-геологическое опробование на разных стадиях исследований, приведены в табл. 1.

1.3. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ СЛОИСТЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ

Отбор образцов грунтов не вызывает затруднений, когда опробуемое геологическое тело (слой, линза, залежь) имеет сравнительно большую мощность и представлено одной горной породой. Точки опробования располагают в вертикальном сечении тела (по его мощности) на расстоянии, равном интервалу опробования, который рассчитывают или выбирают в соответствии с указаниями нормативных документов.

Значительно сложнее решается задача размещения точек опробования в слоистых геологических телах, представленных переслаиванием маломощных (до нескольких сантиметров)

слоев различных пород. Для ее решения используют критерий выделения слоистых тел. Задача в формальной постановке ставится так: можно ли считать опробуемое геологическое тело единым или его следует рассматривать как слоистую толщу, представляющую собой комплекс монопородных геологических тел первого уровня расчленения (МГТ-1).

Подобная задача возникает перед инженером-геологом всякий раз, когда средняя мощность монопородных прослоев h_m , составляющих изучаемое слоистое геологическое тело, превышает некоторое минимальное значение, зависящее от метода получения показателей свойств и называемое порогом чувствительности применяемого метода h_{\min} . Если $h_{\min} > h_m$, то метод «не чувствует» отдельные слои и дает усредненное значение показателя свойств слоистого геологического тела. Например, при определении объемной плотности ленточных глин методом режущего кольца высотой 10 см мы получаем некоторое усредненное значение показателя, поскольку $h_{\text{кольца}} > h_m$.

Критерий выделения слоистых тел требует последовательного выполнения двух условий. Первое заключается в проверке неравенства $h_m > h_{\min}$. Если это условие не соблюдается, то в результате опробования получают усредненное по соседним слоям значение показателя, а слоистое геологическое тело с точки зрения опробования его данным методом считается квазиоднородным. Для него, как для монопородного тела большой мощности, можно подсчитать интервал опробования и отобрать пробы в рассчитанных точках. Если $h_m > h_{\min}$, то принципиально возможно получить частные значения изучаемого показателя свойств для каждого монопородного слоя, входящего в слоистое геологическое тело. Однако это нецелесообразно, так как связано с существенным увеличением объема работ. Вследствие этого после проверки первого условия проверяют второе — оценивают существенность (несущественность) различия оценок опробуемого показателя в соседних монопородных слоях, используя критерий $\bar{R}_i - \bar{R}_{i+1} > 2\sigma_{\bar{R}_i - \bar{R}_{i+1}}$, где \bar{R}_i и \bar{R}_{i+1} — оценки среднего значения показателя соответственно в i -м и $i+1$ -м соседних монопородных слоях (элементах слоистой толщи); $\sigma_{\bar{R}_i - \bar{R}_{i+1}}$ — среднее квадратическое отклонение разности, рассчитываемое по формуле

$$\sigma_{\bar{R}_i - \bar{R}_{i+1}} = \sqrt{\frac{\sigma_{\bar{R}_i}^2 (n_i - 1) + \sigma_{\bar{R}_{i+1}}^2 (n_{i+1} - 1)}{n_i + n_{i+1} - 2} \cdot \frac{n_i + n_{i+1}}{n_i n_{i+1}}}, \quad (1.1)$$

(здесь n_i и n_{i+1} — объемы выборок соответственно в i -м и $i+1$ -м слоях).

Чем больше мощность проверяемых слоев, тем более строгим становится критерий. Если в результате проверки различие

оценок средних значений признано существенным, то опробуется каждый слой.

В случае, когда слоистое геологическое тело представлено чередованием слоев, сложенных двумя породами (например, песками и глинами) и $h_m > h_{\min}$, задачу можно решить, воспользовавшись следующим приемом. В каждом монопорodном слое измеряют одно значение показателя. Затем объединяют полученные для слоев, представленных одной породой, частные значения показателя в выборочные совокупности n_i и n_{i+1} , характеризующие статистиками $\bar{R}_i; \sigma_i$ и $\bar{R}_{i+1}; \sigma_{i+1}$. После этого проверяют второе условие. Если $\bar{R}_i - \bar{R}_{i+1} < 2\sigma_{\bar{R}_i - \bar{R}_{i+1}}$, то геологическое тело считается квазиоднородным и его опробуют как монопорodное.

1.4. ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ

Инженерно-геологическое опробование включает: определение объемов работ и их пространственное размещение, отбор образцов и их консервацию. Для правильного проведения этих работ необходимы некоторые исходные данные, опираясь на которые, можно определить число точек опробования; оптимально разместить их в пространстве опробуемой области геологической среды с учетом закономерностей пространственной изменчивости ее свойств; правильно выбрать методы отбора образцов и их консервации. При планировании работ по инженерно-геологическому опробованию необходима информация, которую условно можно назвать технической, а также инженерно-геологическая информация. К технической информации относятся сведения о типах и конструкциях проектируемых сооружений, их размещении на местности, стадии проектирования и др. Они определяют доверительную вероятность и точность, с которыми должны быть получены данные опробования, а следовательно, и объемы работ по опробованию. Нередко они влияют и на размещение точек, в которых должно быть произведено измерение геологических параметров, или точек отбора образцов (например, при проведении инженерно-геологических работ в пределах предполагаемой сферы взаимодействия геологической среды с сооружением).

Инженерно-геологическая информация — это прежде всего данные о геологическом строении опробуемого объема геологической среды, определяемом отношениями основных геологических тел (слоев, линз, залежей) и условиями их залегания (горизонтальное, наклонное, сочетание горизонтального и наклонного). Далее нужны хотя бы неполные, ориентировочные данные о минеральном и гранулометрическом составе горных пород, слагающих геологические тела, о степени их водонасыщения (консистенции глинистых пород). Эти сведения требуются

для выбора способов отбора и консервации образцов. Известно, что экстремальные значения градиентов полей геологических параметров наблюдаются в главных направлениях изменчивости. Они должны быть учтены при опробовании. Поэтому желательно иметь сведения о закономерностях пространственной изменчивости. Их получают, анализируя имеющиеся геологические данные, в том числе об истории геологического развития территории. Для обоснования объемов работ по опробованию и их пространственного размещения нужны некоторые статистические данные: о мерах рассеяния опробуемого геологического параметра (средние квадратические отклонения, коэффициенты изменчивости) и модулях анизотропности, а также характеристики геологических полей или их сечений в главных направлениях изменчивости. При отсутствии данных, характеризующих рассеяние показателей свойств грунтов, которые будут опробованы, можно воспользоваться сведениями, приведенными в разд. 3.3.

Глава 2

СИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОВОДАНИЯ

2.1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ. ПОНЯТИЕ ПОЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА

Целью инженерно-геологических исследований являются разделение геологической среды на части — геологические тела, однородные по некоторому признаку (возраст, генезис, свойства и т. д.), и характеристика их свойств. Напомним, что геологическое тело есть некоторая область геологического пространства, внутри которой остаются непрерывными те признаки, на основании которых выделена граница этой области. Если границу геологического тела проводят по признаку, который является основанием деления в классификационной схеме, то получают геологическое тело, отвечающее таксономической единице классификации. В ходе инженерно-геологического опробования получают значения показателей состава и свойств горных пород и грунтов, характеризующие геологические тела разных таксономических уровней.

Каждой точке внутри границ геологического тела присущи некоторые свойства, при измерении которых получают показатели, характеризующие состав и свойства горных пород.

В общем случае значения показателей внутри границ геологического тела распределены в пространстве не случайно. В их пространственном размещении (пространственной структуре) всегда проявляется закономерность, обусловленная процессами

литогенеза (включая процессы седиментогенеза). Иными словами, показатели состава и свойств, измеренные в отдельных точках геологического тела, являются функциями пространственных координат и времени. Совокупность таких показателей, характеризующих все точки геологического тела, не является простым множеством, элементы которого безразличны к координатам, — она представляет собой пространственно упорядоченную композицию значений геологического параметра. Эта объективно существующая, локализованная границами геологического тела, неизвестная нам условно-конечная пространственно упорядоченная композиция значений геологического параметра является реальным полем геологического параметра.

Конечную пространственно упорядоченную композицию измеренных значений геологического параметра называют реализацией поля геологического параметра. Порядок элементов композиции, или характер изменения параметра в пространстве — времени, отражающий генезис, последующий литогенез и современные процессы взаимодействия геологической среды, можно описать функцией геологического параметра по координатам пространства — времени. Поэтому поле геологического параметра можно определить как область пространства с определенной в ней функцией геологического параметра (набора параметров) $R(P_{\xi})$ (где P_{ξ} — любая точка области геологического пространства P). Математической моделью поля геологического параметра в общем случае является случайное поле, или, что то же самое, случайная функция геологического параметра по двум (ξ, t) и более аргументам (ξ — пространственная координата, t — время).

Общее выражение поля геологического параметра имеет вид:

$$R(\vec{\xi}, t) = M[R(\vec{\xi}, t)] + \Delta R(\vec{\xi}, t), \quad (2.1)$$

где R — геологический параметр; $\vec{\xi}$ — многомерный вектор координат (ξ_1, ξ_2, ξ_3); $M[R(\vec{\xi}, t)]$ — математическое ожидание поля (неслучайная функция пространства — времени); $\Delta R(\vec{\xi}, t)$ — случайная компонента поля геологического параметра.

Математическое ожидание поля в общем случае включает два компонента: регионально-корреляционный и квазипериодический. Они отражают тенденции процесса литогенеза и определяют марковские свойства полей геологических параметров [3].

Поля геологических параметров в общем случае являются неоднородными, т. е. такими, для которых

$$M[R(\xi, t)] \neq \text{const}, \quad D[R(\xi, t)] \neq \text{const} \quad (2.2)$$

и автокорреляционная функция зависит от выбора начала координат. Если проводится инженерно-геологическое опробование геологического тела, в пределах которого поле опробуе-

мого параметра неоднородно, то результаты измерения этого параметра нельзя рассматривать в качестве выборочной совокупности случайных величин (математическое ожидание и дисперсия D непостоянны). Для этой области нельзя подсчитывать среднее значение и рассеяние параметра, так как измеренные величины не случайны — они являются функциями координат (марковские свойства геологических полей). Короче, для неоднородного поля нельзя использовать модель случайной величины. Здесь имеет место модель случайного поля. Применять модель случайной величины к результатам измерения геологического параметра возможно лишь в том случае, когда установлено, что поле опробуемого геологического параметра однородно. Однородность поля регламентирована условиями постоянства его математического ожидания и дисперсии и условием независимости автокорреляционной функции от выбора начала координат.

В пределах области однородного поля пространственная структура его реализации (размещение измеренных частных значений параметра в пространстве опробуемого геологического тела) не отражается на характеристиках поля. Его математическое ожидание представляет собой оценку среднего значения геологического параметра, а случайный компонент отвечает ее среднему квадратическому отклонению.

Таким образом, и это следует особо подчеркнуть, обработка результатов инженерно-геологического опробования на основе модели случайной величины предполагает предварительную проверку однородности поля геологического параметра и в случае его неоднородности разделение поля на квазиоднородные области. Данные, необходимые для расчетов оснований сооружений и экзогенных геологических процессов, а также для характеристики свойств геологических тел, обычно представляют в виде оценок показателей свойств грунтов и мер их рассеяния, поэтому частные значения показателей должны относиться к квазиоднородной области поля опробуемого геологического параметра. Следовательно, до расчетов параметров систем опробования надо проверить однородность поля геологического параметра и, если нужно, выделить квазиоднородные области. Для проверки однородности чаще всего изучают режим изменчивости геологического параметра в сечении поля, ориентированном по главному направлению изменчивости ξ_1 . В неоднородном поле режим изменчивости параметра по ξ_1 нестационарный, а по ξ_2 — стационарный. В однородном поле режим изменчивости в любом сечении стационарный. Для выделения квазиоднородной области поля геологического параметра используют выражение

$$l_{\xi_1} = L_{\xi_1} \frac{2 \sigma_R}{\bar{R}_n - \bar{R}_0}, \quad (2.3)$$

где l_{ξ_1} — ширина квазиоднородной области поля параметра

R ; L_{ξ_1} — длина сечения поля по ξ_1 ; σ_R — среднее квадратическое отклонение R ; \bar{R}_n и \bar{R}_0 — средние значения параметра на границах области проверяемого поля.

Системы опробования рассчитывают для квазиоднородной области, учитывая анизотропность мер рассеяния геологического параметра в главных направлениях изменчивости. Анизотропность мер рассеяния геологических параметров является одним из следствий свойства симметрии — диссимметрии, которое является фундаментальным свойством литосферы. Градиенты геологического параметра и меры его рассеяния (среднее квадратическое отклонение, коэффициент изменчивости и др.) по ξ_1 всегда больше, чем по ξ_2 . Характеристикой анизотропности мер рассеяния геологического параметра служит модуль анизотропности G , определяемый отношением средних квадратических отклонений в главных направлениях. Модуль анизотропности входит в формулы параметров систем опробования [3].

2.2. СИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ

Число точек опробования и их размещение в пространстве исследуемого геологического тела должны: а) отвечать стадии проектирования, типу и конструкции сооружения; б) учитывать характер пространственной изменчивости геологических параметров, в частности анизотропность мер их рассеяния в главных направлениях и по глубине. Это достигается правильным выбором системы опробования. Системой опробования (СО) называется упорядоченное в пространственном (в общем случае — в пространственно-временном) отношении конечное множество точек опробования. В процессе инженерно-геологических изысканий для проектирования сооружений применяют пространственные СО, в результате реализации которых получают данные о геологических параметрах, характеризующих геологическое тело в некоторый момент времени. Пространственная СО, реализуемая в разные моменты времени, позволяет получить информацию о показателях свойств геологического тела, соотнесенную к этим моментам, и также о временном режиме геологических параметров. Подобные СО следует считать пространственно-временными. Их применяют в ходе наблюдений за режимом экзогенных геологических, в том числе инженерно-геологических, процессов и при инженерно-геологических исследованиях, проводимых с целью разработки мероприятий по рациональному использованию и охране геологической среды.

В зависимости от размерности пространства опробуемого геологического тела СО будет представлять собой линию (одномерная), сетку (двухмерная) или пространственную решетку (трехмерная).

По характеру структуры (пространственным отношениям то-

чек опробования) СО разделяются на нерегулярные и регулярные (в том числе геометрически правильные). Нерегулярными считают СО, в которых расстояния между точками опробования не выдержаны. Такие СО используют при проведении средне-масштабной инженерно-геологической съемки (не на ключевых участках). Точки опробования при этом размещают в интересных по геологическим соображениям местах (например, сочленения геоморфологических элементов). Регулярными называются СО, в которых точки опробования расположены как угодно в пределах некоторых зон свободного размещения, но центры этих зон размещены на строго фиксированных расстояниях и в совокупности составляют геометрически правильную систему (рис. 2). В чисто формальном отношении регулярная СО подобна пространственной решетке кристалла, узлы которой расположены по геометрическому закону, а элементарные частицы (атомы, ионы, молекулы) имеют некоторую свободу и могут колебаться вокруг узла кристаллической решетки в известных границах. Область возможных положений элементарной частицы подобна зоне свободного размещения регулярной СО. Зона свободного размещения одномерной СО представляет собой отрезок, двумерной — участок, трехмерной — область. Размеры таких зон подсчитывают при расчете параметров СО.

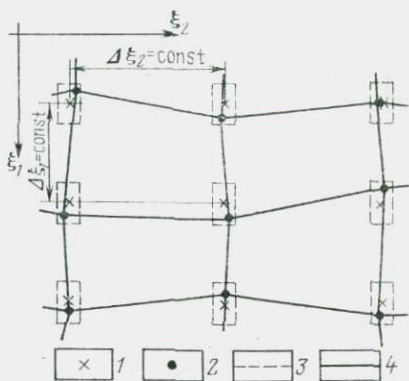


Рис. 2. Регулярная система опробования:

1 — центр зоны свободного размещения точки опробования; 2 — точка опробования; 3 — границы зоны свободного размещения; 4 — главные направления изменчивости геологического параметра. $\Delta\xi_1$, $\Delta\xi_2$ — параметры системы опробования (шаг по ξ_1 и шаг по ξ_2)

Регулярность СО вытекает из принципа равнопредставительности, в соответствии с которым точки опробования внутри области изучаемого геологического тела должны размещаться равномерно. Принцип равнопредставительности формулируется так: любые равные по объему части выделенного геологического тела должны быть охарактеризованы одинаковым числом измерений.

В пределах квазиоднородной области изменчивость поля геологического параметра имеет существенно статистический характер, поэтому точки опробования не должны располагаться на одинаковых расстояниях друг от друга по геометрически правильным СО. Такая СО является частным случаем регулярной СО. Расчетом ее можно получить только для идеального случая, когда величины среднего квадратического отклонения

геологического параметра одинаковы в главных направлениях и модуль анизотропности имеет одно единственное значение. Совокупность частных значений геологического параметра, полученную при реализации геометрической СО, нельзя рассматривать как выборку случайных величин (координаты точек опробования не случайны). В связи с этим геометрически правильные СО малопригодны для инженерно-геологического опробования.

Второй принцип, регламентирующий использование регулярных СО, заключается в том, что систему опробования устанавливают отдельно для каждого выделенного по принятым критериям геологического тела, учитывая анизотропность мер рассеяния геологического параметра по главным направлениям изменчивости и по глубине, а также принятый уровень доверительной вероятности (см. разд. 1.1).

Третий принцип заключается в том, что регулярные СО ориентируют по главным направлениям изменчивости (по направлениям экстремальных значений градиентов) геологических параметров. Соблюдение перечисленных принципов позволяет получать информацию о геологических параметрах (показателях состава горных пород и свойствах грунтов) требуемого объема и качества.

Системы опробования характеризуются объемом и параметрами. Объем пространственной СО — это число точек опробования. Под параметрами регулярной СО понимают расстояния между центрами зон свободного размещения по главным направлениям изменчивости ξ_1 и ξ_2 и по глубине ξ_3 . Параметрами регулярной СО по главным направлениям изменчивости являются $\Delta\xi_1$ — шаг опробования по ξ_1 и $\Delta\xi_2$ — шаг опробования по ξ_2 . По глубине (по ξ_3) параметром СО является $\Delta\xi_3$, называемый интервалом опробования (термины «шаг» и «интервал» опробования предложены Н. В. Коломенским). Число параметров системы опробования зависит от ее размерности. У одномерной пространственной СО имеется только один параметр — шаг или интервал опробования (расстояния между центрами отрезков свободного размещения по ξ_1 , ξ_2 или по ξ_3). Двухмерную пространственную СО характеризуют два параметра, набор которых предопределен ее ориентировкой ($\Delta\xi_1$, $\Delta\xi_2$, или $\Delta\xi_1$, $\Delta\xi_3$, или $\Delta\xi_2$, $\Delta\xi_3$); трехмерную СО — три параметра ($\Delta\xi_1$, $\Delta\xi_2$, $\Delta\xi_3$). Методы расчета объема и параметров СО рассмотрены ниже (см. гл. 3 и 4).

2.3. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ОПРОБОВАНИЯ

Пространственно-временные СО используют в тех случаях, когда надо получить информацию об изменчивости геологических параметров не только в пространстве исследуемого геологического тела, но и во времени. Подобная информация режим-

ного характера нужна для изучения и прогноза естественных экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов, а также для прогноза изменения геологической среды при искусственных взаимодействиях. Такие системы применяют для получения сведений о режиме уплотнения грунтов в основании сооружений, проницаемости, поровом давлении в основании и в теле земляных сооружений и т. д.

Общий объем \tilde{N} пространственно-временной СО составляет

$$\tilde{N} = NT(n_t + n_s), \quad (2.4)$$

где \tilde{N} — объем пространственной СО; T — полный расчетный период функционирования СО; n_t — частота наблюдений в год при нормальном режиме изучаемого параметра (значения параметра укладываются в интервал $M[R(t)] \pm \sigma_R$); n_s — то же, при экстремальных значениях параметра.

В пространственно-временных системах прибавляется еще один параметр — Δt , называемый периодом времени между наблюдениями. Нужно подчеркнуть, что рассчитываемая по формулам величина Δt характеризует режим наблюдений за изменением геологического параметра, исключая моменты времени, которым отвечают экстремальные его значения. Расчет параметров пространственно-временной СО рассмотрен ниже.

Глава 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПРОБ

3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Расчет числа проб (точек наблюдений) является составной частью инженерно-геологического опробования. Число проб должно отвечать условию оптимальности — быть минимальным и в то же время достаточным для решения поставленных задач — и вследствие этого зависеть от целевого назначения опробования.

К основным задачам инженерно-геологического опробования относятся следующие: а) нахождение обобщенных или расчетных значений показателей свойств; б) определение эмпирического закона распределения; в) оценка режима и структуры пространственной изменчивости показателей в виде тренд-поверхности или автокорреляционной функции.

Кроме того, результаты опробования используются для уточнения геологических границ, сравнения геологических тел по изучаемым показателям, выявления взаимосвязей между показателями свойств и т. д. [3].

Решение большинства из перечисленных задач инженерно-геологического опробования предполагает использование модели случайной величины, т. е. независимость значений показателя от координат пространства.

Традиционно сложилось так, что оптимальное число проб определяют применительно к первой задаче, что обусловлено запросами потребителей инженерно-геологической информации, использующих в инженерных расчетах среднее значение показателя с гарантированной надежностью его определения. Характеристикой надежности является величина, определяемая точностью и доверительной вероятностью, которые связаны между собой обратной зависимостью. Получить оптимальное по этим характеристикам среднее значение показателя можно (в случае его аддитивности), изменяя число определений.

Во многих случаях важнее знать вероятность, с которой можно встретить на изучаемой площади (разрезе) критическое значение показателя (сильно просадочные грунты, грунты со слабой несущей способностью и т. д.), что соответствует оценке распределения частот по интервалам значений показателя. Для расчета необходимого числа проб при оценке вероятности значений показателя по эмпирической частоте также задаются доверительными границами.

По существу, обе постановки задачи аналогичны, так как сводятся к определению эмпирического распределения и оценке его параметров с некоторой, заданной в виде доверительного интервала погрешностью. Однако и подход к расчету необходимого числа точек наблюдений, реализующий метод доверительных пределов.

В основу его положено соотношение, связывающее величину доверительного интервала Δ с доверительной вероятностью P , величиной изменчивости показателя σ и числом точек измерений n . Задаваясь величиной доверительного интервала оценки соответствующего параметра (среднего значения, стандарта, вероятности и др.), при априорно известной или предполагаемой изменчивости показателя находят необходимое число точек наблюдений. Однако при оценке вероятности критических значений показателя, тяготеющих, как правило, к границам диапазона его изменения, требования к числу точек опробования становятся более жесткими.

Число точек опробования, установленное методом доверительных пределов, не является в полном смысле оптимальным, так как в расчетные формулы входят обычно неизвестные характеристики изменчивости (стандарт, дисперсия или коэффициент вариации). Их величину определяют исходя из опыта, методом аналогий, по имеющимся немногочисленным данным или по результатам рекогносцировочных работ. В любом из перечисленных случаев возможна ошибка, которая приводит к значительной погрешности в определении числа наблюдений.

Поэтому предпочтительнее для расчета числа проб использовать более простые приближенные методы, как, например, приближенно-статистический [20], метод оптимальной выборки, или применять так называемый адаптивный подход, позволяющий корректировать полученные результаты по мере поступления

ния информации. При использовании методов доверительных пределов корректировка может проводиться после каждого шага испытаний: по i наблюдениям уточняют оценку σ и производят пересчет необходимого числа испытаний. Наиболее совершенный алгоритм адаптивного подхода разработан М. В. Рацем.

Однако наиболее экономичным методом планирования экспериментов является анализ, основанный на последовательном сравнении отношения вероятностей, вычисленных в предположении справедливости проверяемой гипотезы и альтернативной ей. Его применение обеспечивает уменьшение числа испытаний в среднем на 50 %.

Расчет числа испытаний, необходимых для проверки статистических гипотез при неизвестной характеристике изменчивости (дисперсии), очень сложен. В целом следует отметить, что число испытаний, обеспечивающее решение задач статистического сравнения показателей свойств по величине средних значений или дисперсий, определяется степенью различия сравниваемых параметров, которая полагается значимой и должна быть проверена. Для надежного выявления более тонких различий требуется значительно большее число наблюдений. Так, с надежностью 0,95 различие средних значений, равное 2σ , можно установить (при условии равенства дисперсий) по двум наблюдениям: при $|\bar{R}_1 - \bar{R}_2| \cong \sigma$ — число проб должно быть увеличено до 8, а при $|\bar{R}_1 - \bar{R}_2| \cong 0,5\sigma$ потребуется 32 пробы.

Более определенным является решение задачи о необходимом числе наблюдений при достоверной оценке коэффициента линейной корреляции. Критерием достоверности корреляционной связи является величина t , имеющая распределение Стьюдента. Корреляционная связь достоверна, если $t \geq t_{\text{табл}}$ при $n-2$ степенях свободы и заданном уровне доверительной вероятности. Способ нахождения t зависит от числа парных наблюдений:

$$\text{при } n > 100 \quad t = r\sqrt{n} / (1-r^2);$$

$$\text{при } 100 > n > 10 \quad t = r\sqrt{n-2} / \sqrt{1-r^2};$$

$$\text{для малой выборки } t = z\sqrt{n-3};$$

где r — эмпирическое значение коэффициента корреляции; n — число парных наблюдений; величина z вычисляется по формуле $z = 1,151291 \lg \frac{1+r}{1-r}$.

Используя эти соотношения, можно по предполагаемой величине коэффициента корреляции установить число парных наблюдений, необходимых для подтверждения значимости взаимосвязи при заданном доверительном уровне:

$$n = \left[\frac{t(1-r^2)}{r} \right]^2 = \frac{t^2}{r^2} (1-r^2)^2 \quad \text{при } n > 100; \quad (3.1)$$

$$n = \frac{t^2}{r^2} - (t^2 - 2) \quad \text{при } 100 > n > 10; \quad (3.2)$$

для малой выборки

$$n = (t^2/z^2) + 3. \quad (3.3)$$

В последнем случае, так как t зависит от числа наблюдений n , задача решается методом подбора: по таблице распределения Стьюдента выбирается значение t при $n \sim 15$ (малая выборка) и устанавливается число точек наблюдения n_1 . Если n_1 значительно отличается от 15, то расчет повторяется при значении t , соответствующем n_1 , полученном на первом этапе расчета.

Достоверность существования взаимосвязи определяется отношением коэффициента корреляции к его погрешности, а не абсолютной величиной последней. Поэтому число наблюдений, необходимое для подтверждения реальности взаимосвязи, зависит от величины коэффициента корреляции. Анализ формул (3.1) — (3.3) показал, что при $r > 0,5$ обычно достаточно малой выборки. При уменьшении тесноты связи необходимо гораздо большее число точек измерений. На этом основании расчет числа точек следует начинать по формуле (3.3). Если полученную величину n нельзя считать малой ($n > 15$), то объем опробования уточняют в соответствии с формулой (3.2) или (3.1).

Например, требуется определить число парных определений, которые необходимо выполнить, чтобы с вероятностью 0,95 убедиться в существовании взаимосвязи показателей свойств, теснота которой предполагается равной не менее 0,5. Находим z

$$z = 1,15129 \cdot \lg \frac{1 + 0,5}{1 - 0,5} = 1,15129 \cdot \lg 3 = 0,549.$$

Как отмечено выше, по таблице распределения Стьюдента находим, что при $P = 0,95$, $n = 15$ $t = 2,16$.

По формуле (3.3) имеем:

$$n_1 = \frac{2,16^2}{0,549^2} + 3 = \frac{4,665}{0,301} + 3 = 15,5 + 3 = 18,5 \simeq 19.$$

Выборку из 19 членов можно не считать малой, в связи с чем следует проверить расчет, используя формулу (3.2): по таблице для $P = 0,95$ и $n = 19$ находим величину $t = 2,11$

$$\begin{aligned} n_2 &= \frac{2,11^2}{0,5^2} - (2,11^2 - 2) = \frac{4,452}{0,25} - (4,45 - 2) = 17,82 - (2,45) = \\ &= 15,4 \simeq 16. \end{aligned}$$

Полученное число проб несколько меньше, чем использованное для определения t при расчете по формуле (3.2), поэтому можно повторить вычисления при $t_{P=0,95, n=16} = 2,12$

$$n_3 = \frac{2,12^2}{r^2} - (2,12^2 - 2) = \frac{4,49}{0,25} - (4,49 - 2) \simeq 18 - 2,49 = 15,50 \simeq 16.$$

Аналогично в предположении, что $r \geq 0,2$, находим:

$$z = 1,15129 \cdot \lg \frac{1,2}{0,8} = 1,15129 \cdot \lg 1,5 = 0,202;$$

$$n_1 = \frac{2,16^2}{0,202^2} + 3 = 114,3 + 3 \approx 117,3 \approx 118.$$

Уточнение расчета по формуле (3.1) (так как $n=118 > 100$) дает

$$n_2 = \frac{1,96^2}{0,2^2} (1 - 0,2^2)^2 = \frac{3,84}{0,04} (0,96^2) = 96 \cdot 0,92 = 88,5 \approx 89,$$

т. е. более верным было бы использование для расчета формулы (3.2) ($t_{P=0,95}; n=89 = 2,0$)

$$n_3 = \frac{2^2}{0,2^2} - (2^2 - 2) = \frac{4}{0,04} - (4 - 2) = 100 - 2 = 98.$$

Основная ошибка коэффициента корреляции при этом составит

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{1 - 0,2^2}{98 - 2}} = \sqrt{\frac{0,96}{96}} = \sqrt{0,01} = \pm 0,1.$$

Для первого примера ($r=0,5$)

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1 - 0,5^2}{16 - 2}} = \sqrt{\frac{0,75}{14}} = \pm 0,23;$$

или, считая выборку из 16 членов малой,

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n - 3}} = \frac{1}{\sqrt{16 - 3}} = \pm 0,28$$

и, следовательно, оценкой z являются границы $0,549 - 0,28 \approx 0,27$ и $0,549 + 0,28 \approx 0,83$. При переводе в значения r это составит соответственно $0,27$ и $0,68$, т. е. погрешность является несимметричной относительно r и равна $-0,23$ и $+0,18$.

При явном преобладании в структуре поля показателя регионально коррелированной составляющей рассмотренный подход к определению числа проб (точек наблюдений) непригоден. В таких случаях изучаемую территорию можно разделить на квазиоднородные участки, т. е. участки, в пределах которых случайная изменчивость превышает изменчивость, обусловленную присутствием регионально коррелированной составляющей, и для каждого из них определить число точек измерений в соответствии с изложенными выше правилами. Результаты инженерно-геологического опробования гарантируют для каждого участка получение достоверных оценок среднего значения показателя. Однако при таком представлении материала могут быть упущены некоторые существенные особенности структуры поля, в частности квазипериодические составляющие. Учет их обеспе-

чивается планированием числа проб на основе предварительного анализа статистической структуры (по С. П. Сидоркиной) или использованием ряда упрощенных приемов, рассмотренных при расчете одномерных систем опробования (см. разд. 4.2).

Таким образом, способ расчета необходимого числа точек наблюдений, помимо целевого назначения инженерно-геологического опробования, определяется особенностями объекта изучения, что обуславливает выбор используемой модели (случайной величины или случайной функции), и требует некоторых сведений о режиме и величине пространственной изменчивости.

3.2. УСТАНОВЛЕНИЕ ГРАНИЦ КВАЗИОДНОРОДНОЙ ОБЛАСТИ

На первом этапе работ по инженерно-геологическому опробованию выявляется возможность использования модели случайной величины или случайной функции, для чего производится оценка режима пространственной изменчивости по реализациям поля показателя в главных направлениях изменчивости.

Присутствие регионально коррелированной составляющей, отражаемое в виде зависимости показателя от координат пространства, в простейшем случае может быть установлено по критерию последовательных разностей или по достоверности коэффициента корреляции значений показателя свойств и координат точек их измерения. В последнем случае предпочтительнее использовать коэффициент ранговой корреляции Спирмена, так как он позволяет оценивать зависимость любой формы и не требователен к закону распределения.

Для вычисления коэффициента ранговой корреляции значения показателя упорядочивают по возрастанию его абсолютной величины и каждому члену этого ряда присваивают ранг, равный его порядковому номеру в ряду. Если при этом два или больше значений показателя равны по величине, то каждому из них присваивают ранг, равный среднему значению их порядковых номеров. Координаты точек измерений показателя упорядочиваются по мере удаления от начала профиля с присвоением им рангов, соответствующих порядковым номерам точек.

Коэффициент ранговой корреляции ρ вычисляется по формуле

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (3.4)$$

где d — разность рангов точки наблюдения и значения показателя в ней.

При

$$t = \rho \sqrt{n-2} / \sqrt{1-\rho^2} > t_{\text{табл}}$$

($t_{\text{табл}}$ взято по таблице распределения Стьюдента при заданной доверительной вероятности P и $n-2$ степенях свободы)

присутствие регионально коррелированной составляющей можно считать доказанным.

Использование для этих целей критерия последовательных разностей основано на том, что при отсутствии регионально коррелированной составляющей пространственной изменчивости оценки дисперсии, вычисленные по квадратам отклонений частных значений показателя от среднего s^2 и квадратам последовательных разностей значений показателя, соседствующих в пространственно упорядоченном ряду (вдоль профиля) g^2 , не должны существенно различаться. Значимость различия, которая устанавливается по сравнению отношения полученных оценок дисперсий

$$t = \frac{g^2}{s^2} = \frac{1}{2} \frac{\sum_1^{n-1} (R_{i+1} - R_i)^2}{\sum_1^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (3.5)$$

с критическими значениями t при соответствующей доверительной вероятности, указывает на присутствие регионально коррелированной составляющей.

В присутствии значимой регионально коррелированной составляющей вычисление среднего значения показателя для изучаемого геологического тела не имеет смысла. В соответствии с общими положениями (см. выше) в таких случаях следует выделять квазиоднородные (квазистационарные) области в соответствии с принятым критерием.

В качестве такого критерия можно использовать оценку несущественности различия оценок средних значений [3]:

$$\bar{R}_i - \bar{R}_{i-l} < 2\sigma_R,$$

где \bar{R}_i и \bar{R}_{i-l} — оценки среднего значения изучаемого показателя, соответствующие границам квазистационарной области l_ξ ; σ_R — стандартное отклонение частных значений показателя; l — протяженность квазистационарной области.

Это условие означает, что различия между оценками среднего значения показателя R , полученными в любой точке квазиоднородной области, несущественны и, следовательно, эта область может быть охарактеризована без большой ошибки одним средним значением.

Линейные размеры квазиоднородной области определяются величиной среднего градиента регионально коррелированной составляющей

$$\text{grad } \bar{R} = \frac{\Delta \bar{R}}{l_\xi} = \frac{\bar{R}_i - \bar{R}_{i-l}}{l_\xi},$$

где l_ξ — протяженность квазиоднородной области в рассматриваемом направлении изменчивости.

Подставив в это уравнение вместо неизвестных $(\bar{R}_i - \bar{R}_{i-1})$ предельную величину несущественного различия средних значений, выраженную через характеристику изменчивости показателя относительно линии тренда, т. е. $2\sigma_R = 2\sqrt{\frac{\sum (R_i - \bar{R}_{i-1})^2}{2(n-1)}}$ среднюю величину градиента, полученную по данным рекогносцировочных работ на всем профиле $\text{grad } \bar{R} = (\bar{R}_n - \bar{R}_0)/L_{\xi}$, можно определить предельную протяженность квазиоднородного участка

$$l_{\xi} = L_{\xi} \frac{2\sigma_R}{\bar{R}_n - \bar{R}_0}, \quad (3.6)$$

где L_{ξ} — общая протяженность геологического тела в изучаемом направлении или длина разведочного профиля; \bar{R}_n и \bar{R}_0 — средние значения показателя на концах профиля.

Протяженность квазиоднородной области, как следует из выражения (3.6), увеличивается по мере роста дисперсии показателя. Это ведет к увеличению погрешности среднего значения показателя на краях интервала, независимой от точности определения интервального среднего. Поэтому представляется целесообразным наложить дополнительное условие на выбор квазиоднородных участков, а именно

$$\bar{R}_i - \bar{R}_{i-1} = \text{grad } \bar{R} \cdot l_{\xi} \leq \Delta, \quad (3.7)$$

где Δ — заданная точность определения среднего значения.

Сравнение протяженности квазиоднородного участка, найденной из выражения

$$l_{\xi}' = \frac{2\Delta}{\text{grad } \bar{R}} = \frac{2\Delta L_{\xi}}{\bar{R}_n - \bar{R}_0} \quad (3.8)$$

с аналогичной величиной, полученной при учете условия квазистационарности (3.6), показало, что введение дополнительного условия требует сокращения длины интервала, принимаемого за однородный, в σ_R/Δ раз: $l_{\xi}' = l_{\xi} (\Delta/\sigma_R)$.

Если инженерно-геологические исследования проводятся под линейные сооружения и протяженность площади исследований во много раз превышает ее ширину, то достаточно выделить квазистационарные участки вдоль оси сооружения. Режим изменчивости показателя в перпендикулярном направлении можно при этом полагать квазистационарным. При работах на больших площадях режим изменчивости устанавливается в главных направлениях изменчивости по ξ_1 и ξ_2 и соответственно в этих направлениях при необходимости определяют протяженность квазистационарных участков l_{ξ_1} и l_{ξ_2} .

Используя эти величины, всю площадь исследований разбивают на участки, близкие к прямоугольным, со сторонами длиной l_{ξ_1} и l_{ξ_2} , ориентированными по главным направлениям изменчивости.

Если установлено, что длина квазистационарного участка составляет более половины от протяженности изучаемой территории ($0,5L_{\xi} < l_{\xi} < L_{\xi}$), то границу следует проводить посередине, что обеспечит более равномерное размещение точек опробования. Для каждого квазистационарного участка, в пределах которого значения показателей свойств отвечают модели случайной величины, по величине дисперсии или коэффициента изменчивости показателя определяют число точек опробования любым из пригодных методов (доверительных пределов, оптимальной выборки или др.).

Исключения составляют случаи, когда регионально коррелированная составляющая изменчивости является квазипериодической и математическое ожидание случайной функции имеет градиент, близкий нулю или равный ему. Этот вид закономерной составляющей может быть установлен только по критерию последовательных разностей или на основании анализа автокорреляционной функции. Нестационарность регионально коррелированной функции проявляется только на участках, протяженность которых не превышает $1/4-1/2$ периода, при достаточном числе точек наблюдения. Основными методами планирования точек опробования и мест их размещения являются методы дискретизации, рассмотренные в гл. 4.

3.3. МЕТОД ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕДЕЛОВ

В основу метода доверительных пределов положена зависимость погрешности выборочной оценки параметров распределения случайной величины (среднего значения, стандартного отклонения, вероятности определенного значения случайной величины, показателей асимметрии и эксцесса) от ее изменчивости (σ или V) и числа проведенных испытаний. Задавшись величиной доверительного интервала, учитывающей требования к точности оценки параметра Δ и доверительной вероятности P , расчетом находят число точек наблюдений, необходимое для получения гарантированных значений. Число проб n является функцией трех величин Δ , t , P . Точность определения Δ параметра представляет собой алгебраическую разность между истинным значением параметра и его выборочной оценкой. Нормированное отклонение t характеризует вероятность получения значения параметра, не выходящего за доверительные пределы. Чем строже требования к обоснованию расчетов, тем менее желателен выход за эти пределы и тем выше должно быть значение доверительной вероятности.

Таким образом, выбор доверительной вероятности и соответствующего ей значения t определяется субъективными инженерными факторами и вопросами экономики. Обычно принимают следующие значения доверительной вероятности $\Phi(t)$: 0,9; 0,95; 0,99 и в исключительных случаях 0,999. Соответствующие им нормированные отклонения t находят по таблице распреде-

ления Стьюдента: 1,70; 2,04; 2,75 и 3,65. При $N > 30$ распределение t близко к нормальному.

Величину Δ , характеризующую возможные отклонения выборочной оценки параметра от генеральной, задают из этих же соображений. При выборе допустимой погрешности определения среднего значения показателя следует иметь в виду, что верхний предел точности не может быть выше точности метода определения показателя. Нижний предел точности устанавливают исходя из практических соображений. При этом допускаемые колебания среднего значения показателя не должны выходить за пределы, которые могут повлечь за собой замену инженерного решения. Так, колебания значений естественной влажности в пределах доверительного интервала не должны приводить к изменению консистенции грунта или в случае анализа сжимаемости — к изменению названия вида грунта по степени деформируемости.

Выбор значения Δ , представляющего собой абсолютную погрешность выборочной оценки среднего значения показателя, может вызвать некоторые затруднения, так как при этом необходимо иметь хотя бы ориентировочное представление о величине самого показателя, особенно для случаев, когда он может изменяться в широких пределах. Вместо абсолютных величин значений σ и Δ можно использовать относительные (в процентах) — коэффициент изменчивости $V = \sigma/\bar{R}$ и показатель точности Δ/\bar{R} . В таких случаях можно говорить о 2, 5, 10 %-ной и т. д. точности выборочных оценок параметров.

Применяя метод доверительных пределов, следует иметь в виду, что в основном погрешность среднего значения зависит от способа формирования выборки, т. е. от способа размещения точек опробования.

Выражение основной погрешности среднего значения, используемое в расчетах $\sigma = \sigma/\sqrt{n}$, справедливо только для собственно случайного отбора. Случайность отбора при условии, что показатели свойств отвечают модели случайной величины (однородное поле геологического параметра), обеспечивается как произвольным размещением точек опробования в пределах изучаемого геологического тела, осуществляемым с помощью таблицы случайных чисел, так и при размещении точек наблюдений по правильной геометрической сетке, что аналогично механическому отбору*.

При планировании двух- или трехмерных СО, когда одной из координат является глубина (мощность отложений), по существу, реализуется типический отбор.

* Хотя точки наблюдений расположены закономерно, но в силу случайности однородного поля показателя, значения показателя в точках являются случайными.

При типическом отборе генеральная совокупность делится на несколько частей, в каждой из которых производится случайный отбор. Представительность выборки определяется учетом дисперсии внутри частей совокупности (внутренняя дисперсия) $\sigma_{вн}^2$ и между частями $\sigma_{м}^2$.

При инженерно-геологических исследованиях аналогом частей являются скважины, представляющие собой некоторый объем геологической среды, и дисперсия показателя между частями характеризуется дисперсией в сечениях поля по ξ_1, ξ_2 или $\xi_1 \xi_2$. Случайными выборками из частей служат результаты опробования по скважинам, а дисперсия в сечении поля показателя по ξ_3 может рассматриваться как внутренняя.

Дисперсия среднего при типическом отборе σ^2 складывается из дисперсий в отдельных звеньях отбора

$$\sigma_R^2 = \frac{\sigma_{вн}^2}{n_1 n_2} + \frac{\sigma_{м}^2}{n_2}, \quad (3.9)$$

где $\sigma_{вн}^2$ и $\sigma_{м}^2$ — дисперсии, характеризующие изменчивость показателя соответственно по мощности слоя и латеральной плоскости; n_1 — число проб, отобранных в скважинах; n_2 — число скважин.

Уравнение с двумя неизвестными n_1 и n_2 имеет множество решений, обеспечивающих заданную погрешность оценки среднего. Поэтому для получения однозначного ответа необходимо задать дополнительное условие. Если таким условием поставить минимум $n_1 n_2$ (общее число проб), то оно обеспечивается при $n_1 = 1$, т. е. из каждой скважины должна отбираться одна проба, но число скважин n_2 при этом будет максимальным. Введение в уравнение стоимостных характеристик (стоимости отбора пробы, проходки скважины и транспортировки) позволяет решить задачу планирования объема опробования при обеспечении минимума стоимости.

Если требуется обеспечить равнопредставительность, то дополнительное условие должно связывать n_1 и n_2 с модулем аннотированности (см. гл. 2): $n_1/n_2 = G^2$ (где $G = \sigma_{\xi_3}/\sigma_{\xi_1, 2}$) или $G = \sigma_{\xi_3}/\sigma_{\xi_1, 2}$.

После решения системы уравнений

$$n_1/n_2 = G^2; \quad \sigma_R^2 = \frac{\sigma_{вн}^2}{n_1 n_2} + \frac{\sigma_{м}^2}{n_2} \quad (3.10)$$

имеем

$$n_1 n_2 = N = t^2 \left[\frac{G \sigma_{м}^2}{2 \Delta^2} + \sqrt{\frac{G^2 \sigma_{м}^4}{4 \Delta^4} + \frac{\sigma_{вн}^2}{\Delta^2}} \right]^2$$

или в относительных величинах

$$N = t^2 \left[\frac{GV_M^2}{2\rho^2} + \sqrt{\frac{G^2V_M^4}{4\rho^4} + \frac{V_{ВН}^2}{\rho^2}} \right]^2;$$

$$n_2 = \sqrt{N}/G; \quad n_1 = n_2 G = \sqrt{N} G. \quad (3.11)$$

Например, коэффициент изменчивости показателя в латеральной плоскости $V_{\xi_{1,2}} = 15\%$, в направлении ξ_3 по мощности слоя $V_{\xi_3} = 30\%$ и соответственно модуль анизотропности

$$G = \frac{V_{\xi_3}}{V_{\xi_{1,2}}} = \frac{30}{15} = 2.$$

Для получения заданной десятипроцентной точности оценки среднего значения показателя в соответствии с формулой (3.11) можно рекомендовать следующий план опробования (при $P = 0,7$ и $t_p = 1$).

Общее число проб, равное

$$N = \left[\frac{2 \cdot 15^2}{2 \cdot 10^2} + \sqrt{\frac{2^2 \cdot 15^4}{4 \cdot 10^4} + \frac{30^2}{10^2}} \right]^2 = \left[\frac{225}{100} + \sqrt{\frac{3^4}{2^4} + 3^2} \right]^2 \simeq 36,$$

следует отобрать из $n_2 = \sqrt{36}/2 = 3$ скважин, по $n_1 = 3 \cdot 2^2 = 12$ проб из каждой.

Если $n_1 = 1$, то выражение (3.9) превращается в уравнение собственно случайного отбора

$$\sigma_R^2 = \Delta^2 = \frac{\sigma_{ВН}^2 + \sigma_M^2}{n_2} \quad \text{или} \quad \rho^2 = \frac{V_{ВН}^2 + V_M^2}{n_2}.$$

Общее число проб при этом для рассматриваемого примера составит

$$N = n_1 n_2 = 1 n_2 = \frac{V_{ВН}^2 + V_M^2}{\rho^2} = \frac{30^2 + 15^2}{10^2} \simeq 11,$$

т. е. в три с лишним раза меньше, чем при типическом отборе при обеспечении одной и той же точности оценки среднего значения. Однако качество опробования при случайном отборе будет существенно хуже.

Метод доверительных пределов обладает серьезным недостатком: при его применении необходимо заранее иметь значения σ или V , которые обычно получают по малым сериям предварительных испытаний, а также по корреляции с другими известными или достаточно просто и быстро определяемыми показателями (предельное напряжение сдвига, сопротивление пенетрации) и данными других скоростных методов. Иногда эти значения принимают по аналогии или архивным данным. Работы по исследованию грунтов позволяют сделать выводы относительно величины изменчивости отдельных показателей свойств. Так, коэффициент изменчивости водно-физических

свойств обычно не превышает 15 %, а, например, плотность грунта можно считать практически постоянной — коэффициент изменчивости 0,5—2,0 %. Большая изменчивость характерна для объемной массы скелета грунта $V=2-5\%$ (реже 8 %). Коэффициент изменчивости естественной влажности зоны аэрации составляет примерно 10—20 %, пределов и числа пластичности — 10—30 %.

Показатели прочности и деформируемости пород обладают значительно большей изменчивостью (50 % и более). Такие большие колебания значений показателей свойств можно объяснить увеличением числа факторов, их обуславливающих, и погрешностей при испытаниях грунтов за счет нарушения структуры образцов, конструктивных и индивидуальных недостатков приборов, несовершенства методик и ошибок эксперимента-тора.

Вследствие этого необходимо иметь представление о достоверности величины стандартных отклонений, полученных на предварительных стадиях исследований по малым выборкам из 8—15 испытаний. Вероятная погрешность стандарта вычисляется по формуле $\Delta_{\sigma} = t\sigma/\sqrt{2n}$, на основании чего можно оценить доверительные пределы σ : $\sigma - \Delta_{\sigma} \leq \sigma \leq \sigma + \Delta_{\sigma}$. В расчетах рекомендуется использовать максимальное значение $\sigma + \Delta_{\sigma}$.

Относительная погрешность оценки стандарта обуславливает аналогичную погрешность числа определений. Верхний доверительный предел стандарта равен

$$\sigma_{\max} = \sigma + \Delta_{\sigma} = \sigma + \frac{\sigma t}{\sqrt{2n}} = \sigma \left(1 + \frac{t}{\sqrt{2n}} \right),$$

а соответствующее ему максимальное число определений составляет

$$N_{\max} = \frac{t^2 \sigma^2 [1 + (t/\sqrt{2n})]^2}{\Delta_R^2}$$

Относительную погрешность числа определений

$$\rho_N = \frac{N_{\max} - \bar{N}}{\bar{N}} = \frac{N_{\max}}{\bar{N}} - 1 \quad (3.12)$$

можно выразить через величину выборочного стандарта с учетом его погрешности

$$\rho_N = \frac{t^2 \sigma^2 [1 + (t/\sqrt{2n})]^2 \Delta_R^2}{\Delta_R^2 t^2 \sigma^2} - 1$$

или после сокращений и преобразований

$$\rho_N = \left(1 + \frac{t}{\sqrt{2n}}\right)^2 - \frac{2t\sqrt{2n} + t^2}{2n}, \quad (3.13)$$

т. е. относительная погрешность числа наблюдений зависит при заданной доверительной вероятности только от объема выборки, используемой для определения стандарта (3.13).

Используя выражение (3.13), можно оценить погрешность определения числа проб при использовании в расчете σ , полученного по малой ($n=10$) выборке, полагая достаточной доверительную вероятность $P=0,7$ ($t_p \approx 1$);

$$\rho_N = \frac{2\sqrt{2 \cdot 10} + 1}{2 \cdot 10} \approx \frac{1}{2}.$$

Погрешность составляет 50 %, а при увеличении доверительной вероятности $P=0,95$ ($t_p=1,96$) она возрастет более чем в два раза — до 100 %.

Можно решить и обратную задачу, определив при заданной доверительной вероятности, каким должен быть объем выборки при рекогносцировке, чтобы погрешность определения N не превышала 10, 20 и 50 %. Расчетом по формуле (3.13) получили соответственно $N_1 \geq 200$; $N_2 \geq 65$; $N_3 \geq 10$. Такая сильная зависимость конечного результата строгого метода определения числа точек опробования от погрешности оценки стандарта, обычно не известного, указывает на необходимость развития и более широкого внедрения методов, позволяющих проводить корректировку расчета числа точек опробования в процессе проведения работ. К этим методам, как указывалось выше, относятся адаптивный подход и метод последовательного анализа.

Сходен с рассмотренными и способ расчета по методу доверительных пределов числа точек опробования для надежного определения вероятности (доли) P какого-либо признака в изучаемой совокупности, например значений показателя, больших или меньших заданной критической величины.

Вероятность (или частота) признака в n независимых испытаниях представляет собой среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины, которая в каждом отдельном испытании может принимать значение 1 (событие произошло) или 0 (не произошло). При $n > 30$ ее распределение приближается к нормальному, и поэтому все рассмотренное выше относительно погрешности среднего значения и расчета необходимого числа наблюдений для обеспечения заданной точности применимо к оценке вероятности. Особенностью является лишь то, что дисперсия в этом случае определяется средним значением случайной величины, т. е. самой вероятностью $\sigma^2 = P(1-P)$. Значения $P(t_p)$ и Δ_p , необходимые для расчета

числа точек испытаний, задаются в соответствии с общими положениями, приведенными выше.

Ориентировочную оценку вероятности признака определяют априорно или по данным рекогносцировочных работ (малая выборка) как эмпирическую частоту его появления в выборке. При отсутствии каких-либо сведений о частоте признака задаются максимальной дисперсией, которая не может быть больше 0,25 ($P=0,5$; $1-P=0,5$). Однако при этом остается в силе замечание относительно большой зависимости числа точек опробования от надежности оценки дисперсии, т. е. в данном случае от правильного представления о частоте признака. Например, частота значений естественной влажности W , превышающих предел текучести W_L , в имеющейся выборке оказалась равной 0,2. Число измерений естественной влажности, необходимых для проверки этой гипотезы при $P=0,7$ ($t_p \approx 1$) и $\Delta_p=0,05$, составляет

$$N = \frac{t^2 \sigma^2}{\Delta_p^2} = \frac{1^2 \cdot 0,2 \cdot 0,8}{0,05^2} \approx \frac{16 \cdot 100}{25} \approx 64.$$

Задаваясь максимальной дисперсией при прочих равных условиях, получим

$$N = \frac{1 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,05^2} = \frac{25 \cdot 100}{25} = 100,$$

т. е. больше в 1,5 раза.

Последнее замечание касается оценки дисперсии показателя для изучаемого геологического тела по результатам его исследований на профилях, ориентированных в главных направлениях изменчивости. Способ вычисления дисперсии зависит от величины модуля анизотропности G .

При $G \approx 1$ дисперсия показателя для поля равна средневзвешенной из дисперсий, полученных на разведочных профилях,

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \frac{\sigma_{\xi_1}^2 (n_{\xi_1} - 1) + \sigma_{\xi_2}^2 (n_{\xi_2} - 1)}{n_{\xi_1} + n_{\xi_2} - 2}.$$

При $G \neq 1$ характеристикой изменчивости поля показателя является величина максимальной из дисперсий $\sigma_{\xi_1}^2$, $\sigma_{\xi_2}^2$ или $\sigma_{\xi_3}^2$.

3.4. МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ОТНОШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Сущность метода состоит в проверке некоторой нулевой гипотезы H_0 против альтернативной ей H_1 на основании последовательного сравнения вероятностей принадлежности исследуемой выборки к совокупности H_0 или H_1 .

Нулевая гипотеза может иметь различное содержание: например, предположение, что среднее значение равно или не

превышает некоторой заданной величины или что среднее квадратическое отклонение не больше заданного, и др.

В случае применения последовательного критерия отношения вероятностей число испытаний является случайной величиной, зависящей от исхода предыдущего испытания. После каждого проведенного испытания на основе установленного правила принимается одно из следующих решений: а) испытания прекратить, поскольку полученные данные позволяют с заданной вероятностью принять гипотезу H_0 ; б) испытания продолжить, так как имеющихся данных недостаточно для решения вопроса о принятии или отклонении гипотезы H_0 ; в) испытания прекратить, поскольку на основании проделанных опытов с заданной вероятностью гипотеза H_0 отклоняется (принимают H_1).

Правило проверки состоит в следующем. Все возможные случайные выборки, которые могут быть получены из исследуемой совокупности, разбиваются на две непересекающиеся области. К первой из них, называемой критической, или областью отклонения, относятся выборки, для которых верна гипотеза H_1 . Ко второй принадлежат выборки, для которых справедлива нулевая гипотеза H_0 , — это область принятия.

Если наблюдаемая выборка попадает в критическую область, но расположена вблизи ее границы, то принятию гипотезы H_0 будет отдано небольшое предпочтение. Если выборка попадет в противоположную область, то отклонению гипотезы H_0 также будет дано лишь небольшое предпочтение. Если наблюдаемая выборка лежит точно на границе областей, то нельзя отдать предпочтение ни одному из решений и можно говорить о существовании области безразличия.

Разделение параметрического пространства на области не является статистической задачей, оно осуществляется на основе практической оценки последствий, к которым приводит неправильное решение. При этом существует известный риск отклонить гипотезу H_0 в том случае, когда она справедлива, т. е. сделать ошибку 1-го рода, или принять гипотезу H_0 , когда она неверна, — ошибка 2-го рода. До начала испытаний задают границы области безразличия и вероятности ошибок 1-го и 2-го рода (α и β), которые должны быть достаточно малы. Ошибки 2-го рода менее желательны, поэтому значение β задается минимальным — 0,01; α в зависимости от практических соображений, принимается равным от 0,01 до 0,1. Для заданных условий вычисляют приемочное a_m и браковочное r_m числа. Проверка гипотезы H_0 заключается в сравнении величин a_m и r_m с величиной, получаемой в процессе испытаний и зависящей от числа и результатов последних. Сравнения производят после каждого испытания и продолжают до тех пор, пока соблюдается неравенство $a_m < f(m, R_i) < r_m$. Нулевую гипотезу принимают, когда $a_m > f(m, R_i)$, и отвергают, когда $f(m, R_i) > r_m$. Проверка может осуществляться в аналитической и графической форме.

Рассмотрим подробнее задачи, имеющие наиболее важное практическое значение, а именно проверку того, что: а) среднее значение нормально распределенной случайной величины с известным σ не превышает заданного значения; б) σ нормально распределенной случайной величины не превышает заданного значения.

Первая задача по смыслу аналогична определению верхнего доверительного предела среднего значения показателя, т. е. проверке того, что $\bar{R} \leq \theta$ (где θ — некоторое критическое значение показателя). Однако, применяя этот метод, можно получить также оценку среднего значения показателя с заданной доверительной вероятностью и точностью.

Проверяется нулевая гипотеза $\bar{R} = \frac{\sum R_i}{n} \leq \theta$ (где R_i — нормально распределенная случайная величина с дисперсией σ^2). Исходя из практических соображений устанавливают интервал безразличия $\theta_0 - \theta_1$ ($\theta_0 < \theta < \theta_1$), в пределах которого безразлично принять или отклонить гипотезу H_0 . Кроме того, задаются величиной допустимого риска, т. е. выбирают значение α , представляющее собой вероятность отклонения гипотезы H_0 , когда она верна ($\bar{R} < \theta_0$), и значение β , являющееся вероятностью принятия гипотезы H_0 , хотя она ошибочна ($\bar{R} > \theta_1$).

Для каждого числа наблюдений m вычисляют приемочное

$$a_m = \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \ln \frac{\beta}{1 - \alpha} + m \frac{\theta_0 + \theta_1}{2}, \quad (3.14)$$

и браковочное числа

$$r_m = \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \ln \frac{1 - \beta}{\alpha} + m \frac{\theta_0 + \theta_1}{2}. \quad (3.15)$$

Поскольку a_m и r_m не зависят от результата испытаний, их вычисляют до начала опыта. Испытания проводят до тех пор, пока $a_m < \sum_{i=1}^m R_i < r_m$. Как только $\sum_{i=1}^m R_i$ выйдет за пределы интервала $a_m - r_m$, испытания прекращают. Гипотезу $\bar{R} \leq \theta$ принимают, если $\sum_{i=1}^m R_i < a_m$, и бракуют, если $\sum_{i=1}^m R_i \geq r_m$. Результаты испытаний при проведении последовательного анализа записывают по следующей форме:

Число испытаний m	Приемочное число a_m	Наблюдаемое значение показателя R_i	Накопленная сумма наблюдаемых значений $\sum_{i=1}^m R_i$	Браковочное число r_m

В результате проведенного анализа можно только установить, что среднее значение показателя больше или меньше заданной величины. Для получения оценки среднего значения с двусторонним ограничением рекомендуется использовать способ «веера». Он заключается в том, что задаются рядом нулевых гипотез, охватывающих весь предполагаемый диапазон изменения среднего значения показателя: $\bar{R} \leq \theta^I$, $\bar{R} < \theta^{II}$, ..., $\bar{R} \leq \theta^n$ при $\theta^I < \theta^{II} < \dots < \theta^n$. Для каждой из гипотез вычисляют приемочные и браковочные числа и полученные результаты наблюдений используют для проверки всех гипотез одновременно. При этом крайние критические значения θ^I и θ^n принимают или отбраковывают по небольшому числу испытаний, а чем ближе значение θ^{II} к истинной величине среднего значения, тем большее число наблюдений требуется для принятия решения.

Величины $(1-\alpha)$ и $(1-\beta)$, представляющие собой вероятность избежать ошибок 1-го и 2-го рода, являются аналогами доверительной вероятности при проверке статистических гипотез.

Точность Δ , задаваемую при использовании метода доверительных пределов, применительно к способу «веера» можно оценить как сумму интервала между проверяемыми критическими значениями $\theta_i - \theta_{i+1}$ и интервала безразличия. В зависимости от величины последнего выбирается интервал между последовательными критическими значениями показателя (между нулевыми гипотезами). На практике удобно брать интервал, равный половине зоны безразличия.

Для иллюстрации применения метода последовательного анализа (способ «веера») ниже приведен пример определения оценки среднего значения естественной влажности \bar{W} грунта при известной величине дисперсии $\sigma^2 = 2,56$ на основании проверки трех пар гипотез (табл. 2)

$$H_0^I - \bar{W} \leq 10,8; \quad H_0^{II} - \bar{W} \leq 11,2; \quad H_0^{III} - \bar{W} \leq 11,6.$$

Зона безразличия для всех гипотез принята равной 0,8 %, $\alpha = 0,1$ и $\beta = 0,01$.

Для проверки гипотезы $H_0^I: \bar{W} < 10,8 \pm 0,4$ потребовалось 8 испытаний, по их результатам она была отвергнута: $\sum W_i > r_m$. Гипотеза $H_0^{III}: \bar{W} < 11,6 \pm 0,4$ принята после 29 испытаний. Увеличение числа определений, необходимых для принятия решения, косвенно указывает на большую близость \bar{W} к истинной величине среднего значения. Проверка гипотезы $H_0^{II}: \bar{W} < 11,2 \pm 0,4$ завершилась ее принятием только на 35-м испытании. Таким образом, по результатам проверки гипотез можно сделать вывод о том, что среднее значение естественной влажности заключено между двумя критическими значениями 10,8 и 11,2 или с учетом области безразличия $10,4 < \bar{W} < 11,6$. Пос-

Применение последовательного анализа для оценки среднего значения естественной влажности моренных суглинков (способ «веера»)

Число испытаний, m	Влажность W_{e_i} , %	Проверка гипотез								
		$H_0^1/\bar{W} < 10,8$: $W_1 - W_0 = 10,4 - 11,2$			$H_0^2/\bar{W} < 11,2$: $W_1 - W_0 = 10,8 - 11,6$			$H_0^3/\bar{W} < 11,6$: $W_1 - W_0 = 11,0 - 12,0$		
		$a_{m'}$, %	$\sum W_{i'}$, %	$r_{m'}$, %	$a_{m'}$, %	$\sum W_{i'}$, %	$r_{m'}$, %	$a_{m'}$, %	$\sum W_{i'}$, %	$r_{m'}$, %
1	11,0	-3,60	11,0	18,14	-3,19	—	18,5	-2,80	—	18,9
2	11,4	7,20	22,4	28,94	8,0	—	29,7	8,80	—	30,5
3	11,4	18,00	33,8	39,74	19,2	—	40,9	20,40	—	42,1
4	13,7	28,8	47,5	50,54	30,4	—	52,1	32,0	—	53,7
5	10,8	39,6	58,3	61,34	41,6	—	63,3	43,6	—	65,3
6	11,5	50,4	69,8	72,14	52,8	—	74,5	55,2	—	76,9
7	12,2	61,2	82,0	82,94	64	—	85,7	66,8	—	88,5
8	12,4	72,0	94,4	93,74	75,2	94,4	96,9	78,4	94,4	100,1
9	13,5				86,4	107,9	108,1	90,0	107,9	111,7
10	10,3	Гипотеза отклонена			97,6	118,2	119,3	101,6	118,2	123,3
11	10,7				108,8	128,9	130,5	113,2	128,9	134,9
12	11,1				120,0	140,0	141,7	124,8	140,0	146,5
13	10,3	$\bar{W} > 10,8 \pm 0,4$			131,2	150,3	152,9	136,4	150,3	158,1
14	10,2				142,4	160,5	164,1	148,0	160,5	169,7
15	10,5				153,6	171,0	175,3	159,6	171,0	181,3
16	9,7				164,8	180,7	186,5	171,2	180,7	192,9
17	10,2				176,0	190,9	197,7	182,8	190,9	204,5
18	10,6				187,2	201,5	208,9	194,4	201,5	216,1
19	9,8				198,4	211,3	220,1	206,0	211,3	227,1
20	10,7				209,6	222,0	231,3	217,6	222,0	239,3
21	9,9				220,8	231,9	242,5	229,2	231,9	250,9
22	12,2				232,0	244,1	253,7	240,8	244,1	262,5
23	12,4				243,2	256,5	264,9	252,4	256,5	274,1
24	12,8				254,4	269,3	276,1	264,0	269,3	285,7
25	13,0				265,6	282,3	287,4	275,6	282,3	297,3
26	9,5				276,8	291,8	298,6	287,2	291,8	308,9
27	10,0				288,0	301,8	309,8	298,8	301,8	320,5
28	9,6				299,2	311,4	321,0	310,4	311,4	332,1
29	9,3				310,4	320,7	332,2	322,0	320,7	343,7
30	12,2				321,6	332,9	343,4			
31	6,8				332,8	339,7	354,6	Гипотеза принята		
32	10,3				344,0	350,0	365,8			
33	9,7				355,2	359,7	377,0			
34	9,4				366,4	369,1	388,2	$\bar{W} < 11,6 \pm 0,4$		
35	7,8				377,6	376,9	399,4			
					Гипотеза принята					
					$\bar{W} < 11,2 \pm 0,4$					

леднее выражение можно считать интервальной оценкой среднего значения, полученной при доверительной вероятности $P=0,99$ или в принятой форме записи $\bar{W}=11,0 \pm 0,6$.

Как видно из рассмотренного примера, чтобы получить среднее значение естественной влажности с точностью $\pm 0,6$ и вероятностью 0,99 потребовалось провести 35 испытаний. В то же время расчет числа испытаний, проведенный по методу до-

верительных пределов при одинаковых требованиях к точности и вероятности, дал величину $n=44$.

Очень удобен графический способ проверки, позволяющий избежать большого числа вычислений. Он основан на том, что выражения (3.15) и (3.14) представляют собой уравнения прямых линий L_a и L_r . Эти линии параллельны; их угловой коэффициент s определяется формулой

$$s = (\theta_0 + \theta_1)/2. \quad (3.16)$$

Свободный член h_0 в уравнении L_a равен

$$h_0 = \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \ln \frac{\beta}{1 - \alpha}$$

и в уравнении L_r

$$h_0 = \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \ln \frac{1 - \beta}{\alpha}. \quad (3.17)$$

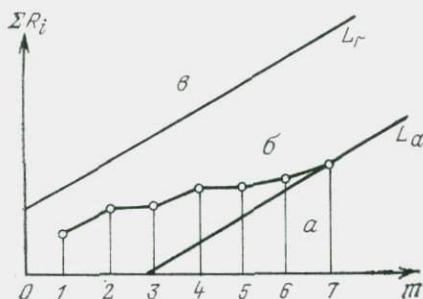


Рис. 3. Графический метод установления числа испытаний с помощью последовательного критерия отношений вероятностей:

α — область принятия гипотезы H_0 (испытания принимаются), β — область безразличия (испытания продолжают), ν — область отклонения гипотезы H_0 (испытания отбраковываются как неточные)

Линии L_a и L_r , построенные до начала испытаний, делят поле между координатными осями m и ΣR_i на три области: безразличия, принятия и браковки нулевой гипотезы. В процессе испытаний строят график зависимости суммы наблюдаемых значений показателя ΣR_i (ось ординат) от числа наблюдений m (ось абсцисс).

Проверку продолжают до тех пор, пока нанесенные на график точки $f(m, \Sigma R_i)$ лежат между прямыми L_a и L_r , и прекращают, как только точка эмпирического графика выйдет за пределы области, ограниченной параллельными линиями, и попадет в область принятия α (ниже L_a) или браковки ν (выше L_r) нулевой гипотезы (рис. 3).

Нередко случайная величина характеризуется не дисперсией, а коэффициентом изменчивости. В таких случаях в уравнениях (3.14) и (3.15) значение σ^2 заменяют выражением $V^2 \bar{R}^2$ (где $V = \sigma / \bar{R}$ и $R = (\theta_0 + \theta_1)/2$).

Вторая задача, состоящая в проверке гипотезы о том, что среднее квадратическое отклонение σ нормально распределенной случайной величины R_i не превышает заданного значения, т. е. что $\sigma \leq \sigma_0$, имеет большое значение для практики инженерно-геологических исследований.

Проверку гипотезы выполняют аналогично проверке гипотезы о среднем значении. Для каждого m (порядковый номер испытания) вычисляют приемочное a_m и браковочное r_m числа по следующим формулам:

$$a_m = \frac{2 \ln \frac{\beta}{1-\alpha}}{\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_0^2}} + m \frac{\ln \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2}}{\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_0^2}}; \quad (3.18)$$

$$r_m = \frac{2 \ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_0^2}} + m \frac{\ln \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2}}{\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_0^2}}. \quad (3.19)$$

Значения a_m и r_m не зависят от исхода испытаний и также могут быть вычислены до начала опытов. Испытания продолжают до тех пор, пока $a_m < \sum_{i=1}^m (R_i - \bar{R})^2 < r_m$ (где \bar{R} — среднее значение показателя). Так как \bar{R} обычно неизвестно, то его заменяют выборочным средним значением $\tilde{R} = (R_1 + R_2 + \dots + R_m)/m$, а величины приемочного и браковочного чисел берут по предыдущему этапу, т. е. практически проверка гипотезы состоит в проверке неравенства

$$a_{m-1} < \sum_{i=1}^m (R_i - \tilde{R})^2 < r_{m-1}.$$

Проверку прекращают, как только $\sum_{i=1}^m (R_i - \tilde{R})^2$ выйдет за пределы интервала $a_{m-1} - r_{m-1}$ в область принятия или браковки нулевой гипотезы.

При графическом способе проверки по оси абсцисс откладывают число испытаний, по оси ординат — сумму квадратов отклонений. Выражения для приемочного и браковочного чисел представляют собой уравнения прямых линий L_a и L_r , точки пересечения которых с осью ординат $(0, h_0$ и $0, h_1)$ определяют из выражений

$$h_0 = \frac{2 \ln \frac{\beta}{1-\alpha}}{\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_0^2}} \quad \text{и} \quad h_1 = \frac{2 \ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_0^2}}, \quad (3.20)$$

а их угловой коэффициент равен

$$s = \ln \frac{\frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2}}{\left[\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_0^2} \right]}. \quad (3.21)$$

График с линиями L_a и L_r строят до начала испытаний. В ходе проверки на него наносят точки $f \left[m, \sum_{i=1}^m (R_i - \bar{R})^2 \right]$. Проверку прекращают, как только конечная точка графика выходит за пределы области безразличия, ограниченной прямыми L_a и L_r , в область принятия решений.

Для определения границ, в которых заключено неизвестное (предполагаемое) среднее квадратическое отклонение, также можно применить способ «веера». При этом достигается существенное по сравнению с методом доверительных пределов сокращение числа проб, обеспечивающих одинаковую точность и надежность оценки стандарта.

Выигрыш в числе испытаний, в среднем составляющий около 50 %, является важным преимуществом метода последовательного анализа, которое позволяет рекомендовать его для более широкого использования.

3.5. МЕТОД ОПТИМАЛЬНОЙ ВЫБОРКИ

Для определения необходимого числа точек опробования можно применять также приближенные методы, объединяемые под названием «оптимальной выборки». Однако при этом разные авторы используют различные методические подходы, некоторые из них, подобно последовательному анализу (см. разд. 3.4), позволяют оценивать достаточность точек опробования после каждого испытания, но в отличие от него не дают оценки надежности решения [20, 21].

При реализации этих способов строят график зависимости оценки изучаемой числовой характеристики среднего значения, стандарта или коэффициента вариации от числа испытаний. По мере увеличения числа точек опробования выборочное значение числовой характеристики распределения приближается к его истинной величине; соответственно уменьшаются и колебания выборочных оценок. Полагают, что уменьшение колебаний до 5—10 относительных процентов указывает на достаточно надежную оценку параметра распределения, а произведенную выборку можно считать оптимальной [21]. При этом подразумевают достаточным, если выравнивание оценок параметра наблюдается по трем—пяти последовательным точкам. Проведенный расчет вероятности показал, что гарантировать надежность оценки можно только в тех случаях, когда выравнивание прослежено не менее чем по 10 точкам.

По данным И. С. Комарова [21], объем оптимальных выборок точек опробования, необходимых для надежной оценки выборочной дисперсии модуля общей деформации пород различных генетических типов, в зависимости от степени их изменчивости оказался равным от 15—20 до 25—35 определений. И лишь для неоднородных по свойствам сарматских глин ($V \approx 18—26\%$) объем оптимальной выборки составил 50—60 то-

чек опробования. Выравнивание значений показателя на графиках прослежено по 2—3 точкам, что соответствовало 10—15 пробам (точки на графике наносили через каждые 5 определений); таким образом, полученные результаты можно считать достаточно надежными (при 5 %-ной погрешности оценки доверительная вероятность равна 0,55, при 10 %-ной она увеличивается до 0,8).

Рекомендуемый способ нахождения оптимального объема выборки по величине m в точке пересечения графиков $\bar{R} = f(m_i)$, построенных по одним экспериментальным данным, но при разной последовательности набора значений показателя в выборку, может применяться только в целях сокращения (без потери информации) имеющихся сведений о свойствах пород и является более строгим, чем метод доверительных пределов.

Расчетный способ оптимальной выборки заимствован Г. К. Бондариком из океанографии. В основу метода положены следующие рассуждения: по n проведенным испытаниям найдена оценка среднего значения показателя \bar{R}_n . Сделано еще одно ($n+1$ -е) испытание, и по всем результатам вычислено новое среднее значение \bar{R}_{n+1} . Очевидно, что разница между ними определяется тем, насколько R_{n+1} отличается от \bar{R}_n . Это подтверждается простейшими выкладками: R_{n+1} можно представить как $\bar{R}_n + |\Delta R_{n+1}|$, откуда $|\Delta R_{n+1}| = R_{n+1} - \bar{R}_n$;

$$\begin{aligned}\bar{R}_{n+1} &= \frac{\bar{R}_n n + \bar{R}_n + |\Delta R_{n+1}|}{n+1} = \frac{\bar{R}_n n + \bar{R}_n}{n+1} + \\ &+ \frac{|\Delta R_{n+1}|}{n+1} = \bar{R}_n + \frac{|\Delta R_{n+1}|}{n+1}, \\ \Delta \bar{R} &= \bar{R}_{n+1} - \bar{R}_n = \bar{R}_n + \frac{|\Delta R_{n+1}|}{n+1} - \bar{R}_n = \\ &= \frac{|\Delta R_{n+1}|}{n+1} = \frac{|R_{n+1} - \bar{R}_n|}{n+1}.\end{aligned}$$

Приведенное выражение справедливо для любого n , поэтому для упрощения можно записать

$$\Delta \bar{R} = \frac{|\Delta R_n|}{n} = \frac{|R_n - \bar{R}_{n-1}|}{n}. \quad (3.22)$$

Таким образом, различие последовательных средних значений, рассматриваемое как погрешность определения \bar{R} является функцией только числа наблюдений. Поэтому, задаваясь величиной абсолютной погрешности E , которая не может превосходить точность метода измерения исследуемого показателя, можно определить необходимое число точек опробования

$$n = \frac{|\Delta R_{n+1}|}{E} = \frac{|R_{n+1} - \bar{R}_n|}{E}. \quad (3.23)$$

Поскольку величина ΔR_n является случайной, Г. К. Бондарик предложил при расчете n брать ее максимальное значение, т. е.

$$n = \frac{|\Delta R_n|_{\max}}{E}. \quad (3.24)$$

Это связывает величину $|\Delta R_n|$ с величиной стандарта, так как с вероятностью 0,997 максимальное отклонение не может превысить 6σ .

Следовательно, формулу для расчета оптимальной выборки (3.24) можно представить в виде $n=6\sigma/E$ или в более общей форме, позволяющей варьировать доверительной вероятностью

$$n = t\sigma/E, \quad (3.25)$$

где t — определяется по таблице Стьюдента и зависит от числа проведенных испытаний.

Полученное выражение использует общий, принятый в математической статистике принцип определения объема выборки по отношению характеристики изменчивости объекта исследования к заданной точности (погрешности) оценки изучаемой числовой характеристики. Однако в методе доверительных пределов n определяется отношением квадратов количественных характеристик изменчивости случайной величины и ее оценки, а при нахождении объема оптимальной выборки в расчетную формулу (3.25) эти величины входят в первой степени. Следовательно $n_{\text{опт}}$ приближенно соответствует корню квадратному из числа проб, полученных расчетом по методу доверительных пределов.

Значительное уменьшение числа наблюдений обусловлено тем, что расчет по методу доверительных пределов основывается только на априорных сведениях о величине изменчивости, тогда как при выборке дополнительно используют информацию о величине оцениваемого параметра, полученную на предыдущем этапе опробования.

Глава 4

РАСЧЕТ СИСТЕМ ОПРОБОВАНИЯ

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Пространственное размещение точек опробования должно учитывать, с одной стороны, технические данные о проектируемом сооружении (тип, конструкция, стадия проектирования), а с другой — геологические данные (главным образом о геологическом строении, гидрогеологических условиях, характеристики пространственной изменчивости геологических параметров). Технические данные определяют объем пространственной системы опробования (СО), так как от типа и класса

сооружения и стадии проектирования зависит уровень доверительной вероятности, с которой должны быть получены оценки средних значений показателей свойств грунтов. При инженерно-геологических исследованиях, проводимых на месте строительства, класс и параметры СО зависят от его конфигурации, распределения нагрузок, условий и характера связей с геологической средой внутри сферы взаимодействия. В простейшем случае горные и буровые выработки размещают по осям и контурам сооружения, являющимся расчетными сечениями сферы взаимодействия. Считается, что размещение точек опробования в горизонтальной плоскости предопределено конфигурацией и размерами сооружения в плане, однако и в подобной ситуации можно рассчитать интервал опробования.

Следует подчеркнуть, что регулярные СО не только не исключают, но и предполагают использование на всех стадиях инженерно-геологических исследований нерегулярных СО. Их применяют в ходе инженерно-геологических съемок среднего масштаба, сочетая на ключевых участках с регулярными СО. При крупномасштабных инженерно-геологических съемках и в ходе разведки основной объем работ по инженерно-геологическому опробованию выполняют в рамках регулярных СО, но при необходимости точки опробования размещают в местах, представляющих интерес с позиции освещения свойств геологической среды — компонентов инженерно-геологических условий. Точки опробования, например, размещают в местах сопряжения различных геоморфологических элементов, проявления ЭГП, а тальвеговой части речных долин и оврагов, на обнажениях горных пород и т. д.

Нерегулярное размещение точек опробования предполагает соблюдение правил, учитывающих особенности геологического или геоморфологического строения территории. Эти правила можно представить в следующем виде.

1. Каждый геоморфологический элемент изучаемой территории должен быть охарактеризован не менее чем одной точкой опробования.

2. Для выявления геоморфологической структуры изучаемой области геологической среды точки опробования (буровые скважины, горные выработки) следует располагать в местах сопряжения геоморфологических элементов.

3. При наличии геологических тел, имеющих в плане вытянутую форму, створы выработок (геофизических точек) следует ориентировать нормально по отношению к длинной оси геологических тел (вкрат залегания пород).

4. Для предварительной оценки геологического строения какой-либо территории, принадлежащей одному геоморфологическому элементу и лишенной естественных обнажений, выработки целесообразно располагать по двум взаимно перпендикулярным створам, ориентированным по предполагаемым главным направлениям изменчивости.

5. При исследовании геологических объектов, имеющих в плане линейную форму (речных долин, зон трещиноватости, тектонических нарушений, линейных кор выветривания и др.), створы точек опробования располагают вкрест их простирания.

Объемы работ по опробованию, выполняемых в рамках нерегулярных СО при среднемасштабных инженерно-геологических съемках, в целом коррелируют со сложностью инженерно-геологических условий. Их можно обосновать в проекте работ, опираясь на данные анализа накопленной информации об инженерно-геологических условиях территории предполагаемых исследований. В ходе крупномасштабной инженерно-геологической съемки и разведки отдельные точки опробования, размещаемые нерегулярно, составляют лишь небольшую часть объема работ по опробованию (первые проценты) и их можно планировать, вводя поправочный коэффициент (до 1,1) к подсчитанному объему регулярной СО. Следует иметь в виду, что формальная независимость результатов расчета оценок значений показателя от координат точки опробования внутри зоны свободного размещения позволяет в процессе реализации регулярной СО в той или иной мере учесть особенности инженерно-геологических условий при установлении положения каждой точки опробования.

В заключение отметим, что реализация регулярных СО, локализованных границами опробуемых геологических тел в пределах исследуемой территории (например, листа инженерно-геологической съемки), даст в целом для всей территории нерегулярную СО. Это объясняется тем, что параметры и ориентировка систем опробования в разных геологических телах различны.

4.2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОДНОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ОПРОБОВАНИЯ

Расчет параметров одномерной СО представляет интерес главным образом при изысканиях линейных сооружений, когда требуется установить оптимальные расстояния между горно-буровыми выработками, местами проведения опытных полевых работ (например, зондирования) или геофизических измерений по трассе дороги, канала или трубопровода. Известно, что рекомендации по размещению точек опробования (скважин, горных выработок и т. д.) по трассе, содержащиеся в нормативных документах, регламентирующих методику инженерно-геологических исследований для линейных сооружений, научно не обоснованы (например, одна выработка на 3 км трассы). Они не учитывают свойства геологической среды, в том числе свойства грунтов и их пространственную изменчивость.

Системы опробования, рассчитанные в соответствии с указаниями настоящего раздела, позволяют получать более объективную информацию о свойствах грунтов, необходимую для проектирования сооружений. Подчеркнем, что использование ре-

гулярной СО не только не исключает, но, наоборот, предполагает размещение дополнительных точек опробования во всех интересных с геологической точки зрения местах, выделенных в ходе инженерно-геологической съемки или обследования трассы (в местах сопряжения геоморфологических элементов, проявления экзогенных геологических процессов, переходов трассы через овраги и реки и др.).

К расчету одномерной СО, ориентированной по глубине (по ξ_3), прибегают также при опробовании вскрытых скважинами (выработками) однородных по минеральному составу слоев грунта большой мощности. Такая СО представляет собой створ (линию), ориентированный в одном из направлений плоскости $\xi_1\xi_2$ или в направлении ξ_3 , в последнем случае рассчитывают интервал опробования $\Delta\xi_3$. Напомним, что параметром одномерной СО является расстояние между центрами отрезков свободного размещения. В простейшем случае при стационарной изменчивости опробуемого геологического параметра систему опробования рассчитывают, используя выражение $\Delta\xi=L/n$ (где L — длина опробуемого сечения геологического тела; n — объем СО). Один из наиболее простых и распространенных способов расчета параметра одномерной СО рассматривается ниже. Он основан на том, что восстанавливаемая по данным опробования функция геологического параметра по координате * может отличаться от своего математического ожидания не более чем на некоторую заданную величину E_0 , т. е. $E < E_0$ (где $E = M \times [R(\xi)] - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$). В последнем выражении $M[R(\xi)]$ — есть математическое ожидание функции исследуемого показателя по аргументу ξ (направление одномерной СО); $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$ — оценка среднего значения исследуемого показателя, полученная по n частным значениям показателя R_i . Для расчета параметра $\Delta\xi$ можно воспользоваться неравенством

$$\Delta\xi \leq \frac{E_0}{|\dot{R}(\xi)|_{\max}}, \quad (4.1)$$

где $|\dot{R}(\xi)|_{\max}$ — максимальная величина градиента исследуемого показателя по направлению ξ ; $\dot{R}(\xi) = (R_{i+1} - R_i) / (\xi_{i+1} - \xi_i)$.

Таким образом, для определения $\Delta\xi$ нужно знать величину E_0 и $|\dot{R}(\xi)|_{\max}$. Минимальное значение величины E_0 не может быть меньше абсолютной точности E_M метода измерения изучаемого показателя свойств грунтов ($E_0 > E_M$). В то же время E_0 не может превышать некоторую критическую величину $\Delta R_{\text{крит}}$.

* Реализация сечения поля геологического параметра по линии опробования.

называемую порогом отбрасывания нехарактерных крайних значений геологического параметра,

$$\Delta R_{\text{крит}} = R_n - \bar{R} = st_\alpha,$$

где R_n — крайнее значение упорядоченного ряда частных значений исследуемого показателя; \bar{R} — оценка среднего выборочного значения; s — выборочное среднее квадратическое отклонение; t_α — табличная величина, зависящая от принятого уровня доверительной вероятности и объема выборки. Значения E_M и $\Delta R_{\text{крит}}$ ограничивают область, в которой находится E_0 : $E_M < E_0 < \Delta R_{\text{крит}}$.

Максимальную величину отношения приращения исследуемого показателя к приращению аргумента определяют, опираясь на данные рекогносцировочного опробования, которое проводят на ограниченном участке трассы. Задача сводится к выбору максимальной величины $(R_{i+1} - R_i) / (\xi_{i+1} - \xi_i)$ из ряда значений, подсчитанных для пар частных значений показателя, полученных для соседних точек опробования.

В качестве примера, иллюстрирующего рассматриваемый метод, приведем расчет расстояния между точками динамической пенетрации по профилю Урлапово — Кашино (Приобское плато). Для получения исходных данных, необходимых для определения шага опробования, на небольшом отрезке профиля проведены испытания лёссовых пород красnodубровской свиты динамическим зондированием. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Оценка среднего значения показателя пенетрации, подсчитанная для 16 пенетрационных скважин, $\bar{R} = 4,66$; выборочное среднее квадратическое отклонение $s = 0,706$. Для объема выборки $n = 16$ и пятипроцентного уровня значимости (доверительная вероятность 0,95) по таблице найдем t_α [21]. Она будет равна 2,67. Определим $\Delta R_{\text{крит}} = st_\alpha = 0,706 \cdot 2,67 = 1,88$. Следовательно, $0,1 < E_0 < 1,88$ ($E_M = 0,1$). По таблице находим максимальное значение градиента R в случайной последовательности его значений $R_i(\xi) : |\dot{R}(\xi)| = 2,4$. Располагая величинами E_0 и $|\dot{R}(\xi)|_{\text{max}}$, можно воспользоваться неравенством (4.1) для расчета шага опробования $\Delta \xi$

$$\Delta \xi \leq \frac{1,88}{2,4} \leq 0,8 \text{ км.}$$

Так как радиус корреляции r_K показателя пенетрации для профиля Урлапово — Кашино равен 0,5 км, то величина $\Delta \xi$ не может быть меньше r_K (условие получения независимых случайных величин). Поэтому $0,5 \text{ км} < \Delta \xi < 0,8 \text{ км}$. Шаг опробования, таким образом, будет равен 0,65 км, а расстояния между точками динамической пенетрации лёссовых пород на рассматриваемом профиле могут колебаться от 0,5 до 0,8 км ($0,65 \pm 0,15$). Отрезок свободного размещения равен 0,3 км. Это позволяет

Данные опробования лёссовых пород динамической пенетрацией на отрезке профиля Урлапово — Кашино

Пенетрационные скважины	Расстояние между скважинами, км	R_i	σ_{R_i}	$\Delta R_i = R_{i+1} - R_i$	$\dot{R}(\xi)$
98		3,4	0,88		
97	0,5	4,6	0,52	1,2	2,4
96	0,5	5,1	0,69	0,5	1,0
95	0,5	4,7	0,61	-0,4	-0,8
94	0,5	4,7	1,08	0,0	0,0
93	0,5	5,4	0,54	0,7	1,4
92	0,5	4,3	0,48	-1,1	-2,2
88	4,5	4,3	0,48	-0,6	-0,1
88	1,0	3,7	0,80	2,0	2,0
86	0,5	5,7	0,62	-0,2	-0,4
85	8,0	5,5	0,55	0,4	0,05
83	1,0	5,9	1,08	-1,4	-1,4
81	0,5	4,5	0,87	0,1	0,2
80	4,0	4,6	0,90	0,4	0,1
76	1,5	5,0	0,76	-0,6	-0,4
73	1,0	4,4	1,04	-0,4	-0,4
71		4,0	0,63		

при установлении местоположения точек динамического зондирования на профиле учесть особенности инженерно-геологических условий (например, геоморфологическую структуру, проявления ЭГП, рельеф), природную или хозяйственную ситуацию (лес, водоток, сельскохозяйственные угодья, сооружения).

Существуют и другие способы расчета параметров одномерной регулярной СО, которые учитывают вид аппроксимации случайной функции $R(\xi)$ и величину погрешности аппроксимации. При ступенчатой аппроксимации стацио-

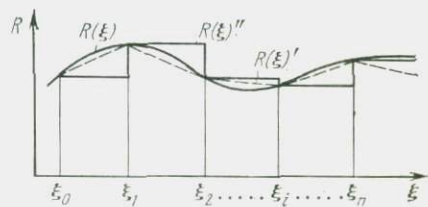


Рис. 4. Линейная $R(\xi)'$ и ступенчатая $R(\xi)''$ аппроксимации случайной функции $R(\xi)$

нарной случайной функции (рис. 4)

$$\Delta \xi = L_{\xi} \frac{E}{\omega_r |R(\xi)|_{\max}}, \quad (4.2)$$

где L_{ξ} — длина профиля; ω_r — круговая частота среза функции спектральной плотности случайной функции $R(\xi)$; $|R(\xi)|_{\max}$ — максимально допустимое значение случайной функции.

При линейной аппроксимации случайной функции геологического параметра

$$\Delta \xi = \frac{2L_{\xi}}{\omega_r \sqrt{\frac{|R(\xi)|_{\max}}{2E}}}. \quad (4.3)$$

4.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВУХМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ОПРОБОВАНИЯ

К расчету параметров двухмерной СО прибегают при опробовании грунтов на ключевых участках, проводимом в рамках инженерно-геологической съемки среднего масштаба, решении вопроса о пространственном размещении горных выработок, буровых скважин, точек геофизических измерений или полевых опытных работ (пенетрация, вращательный срез и др.) во время проведения крупномасштабной инженерно-геологической съемки, опробовании грунтов в вертикальном сечении геологического тела (в плоскости $\xi_1\xi_3$ или $\xi_2\xi_3$), проводимом в процессе инженерно-геологической разведки строительной площадки.

Расчет параметров многомерной (двух- и трехмерной) СО предусматривает соблюдение условия, в соответствии с которым должна соблюдаться равная степень рассеяния изучаемого показателя в разных направлениях. Это означает, что точность оценок среднего значения показателя, подсчитанного для различных направлений, \bar{R}_{ξ_1} , \bar{R}_{ξ_2} и точность оценки среднего, рассчитанного по данным опробования многомерной системы, $\bar{R}_{\xi_1\xi_2}$ должна быть одинакова. Для двухмерной СО (плоскость $\xi_1\xi_2$ или $\xi_1\xi_3$, $\xi_2\xi_3$) это условие можно записать как равенство средних квадратических отклонений оценок среднего значения в различных направлениях, т. е. как $\sigma_{\bar{R}_{\xi_1}} = \sigma_{\bar{R}_{\xi_2}}$. Так как $\sigma_{\bar{R}} = \sigma/\sqrt{n}$,

$$\frac{\sigma_{\xi_1}^2}{n_1} = \frac{\sigma_{\xi_2}^2}{n_2}, \quad (4.4)$$

где σ_{ξ_1} и σ_{ξ_2} — средние квадратические отклонения показателя в главных направлениях; n_1 и n_2 — число точек опробования в главных направлениях. Преобразуя выражение (4.4),

получим

$$\frac{\sigma_{\xi_1}^2}{\sigma_{\xi_2}^2} = \frac{n_1}{n_2} = G_{\xi_1 \xi_2}^2, \quad (4.5)$$

где G — модуль анизотропности.

Объем СО равен

$$n = n_1 n_2. \quad (4.6)$$

Таким образом, решив систему уравнений (4.5) и (4.6) относительно n_1 и n_2 , получим

$$n_1 = G_{\xi_1 \xi_2} \sqrt{n}; \quad n_2 = \frac{1}{G_{\xi_1 \xi_2}} \sqrt{n}. \quad (4.7)$$

Пусть опробуемая площадь (ключевой участок, строительная площадка и т. д.) имеет площадь $F = L_{\xi_1} L_{\xi_2}$, тогда

$$\begin{aligned} L_{\xi_1} &= n_1 \Delta \xi_1, & L_{\xi_2} &= n_2 \Delta \xi_2, \\ n_1 &= \frac{L_{\xi_1}}{\Delta \xi_1}, & n_2 &= \frac{L_{\xi_2}}{\Delta \xi_2}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

где $\Delta \xi_1$ и $\Delta \xi_2$ — шаги опробования в главных направлениях ξ_1 и ξ_2 . Подставив правые части выражений (4.8) в уравнения (4.7), получим формулы параметров двумерной СО

$$\Delta \xi_1 = \frac{L_{\xi_1}}{\sqrt{n}} \cdot \frac{1}{G_{\xi_1 \xi_2}} \quad \text{и} \quad \Delta \xi_2 = \frac{L_{\xi_2}}{\sqrt{n}} \cdot G_{\xi_1 \xi_2}. \quad (4.9)$$

Для СО, ориентированной в вертикальной плоскости ($\xi_1 \xi_3$ или $\xi_2 \xi_3$), будем иметь аналогичные выражения

$\Delta \xi_1 = L_{\xi_1} / (\sqrt{n} \cdot G_{\xi_1 \xi_3})$ — шаг опробования по ξ_1

$\Delta \xi_3 = L_{\xi_3} G_{\xi_1 \xi_3} / \sqrt{n}$ — интервал опробования или

$\Delta \xi_2 = L_{\xi_2} / (\sqrt{n} \cdot G_{\xi_2 \xi_3})$ — шаг опробования по ξ_2 ;

$\Delta \xi_3 = L_{\xi_3} G_{\xi_2 \xi_3} / \sqrt{n}$ — интервал опробования

(в приведенных формулах L_{ξ_3} — мощность опробуемого геологического тела; G — модуль анизотропности исследуемого показателя в соответствующей плоскости).

Порядок расчета двумерной СО проиллюстрируем примером. При опробовании лёссовых пород красnodубровской свиты динамической пенетрацией (рекогносцировочные работы) были получены следующие данные (табл. 4).

По данным, приведенным в табл. 4, подсчитаем модули анизотропности и объемы СО для каждого слоя лёссовых пород:

$$G_{(\xi_1 \xi_2)_I} = 1,2; \quad G_{(\xi_1 \xi_2)_{II}} = 1,6; \quad G_{(\xi_1 \xi_2)_{III}} = 1,35.$$

Число точек зондирования для опробуемых слоев при $P=0,9$ ($t_{\alpha}=1,65$) и относительной точности $\rho=10\%$ составит:

$$n_I = \frac{1,65^2 \cdot 33,4^2}{10^2} = 30; \quad n_{II} = \frac{1,65^2 \cdot 26,7^2}{10^2} = 19;$$

$$n_{III} = \frac{1,65^2 \cdot 29,5^2}{10^2} = 24.$$

Размер участка F , для которого рассчитывается СО, 20×20 км. Воспользовавшись выражениями (4.9), подсчитаем параметры двухмерной СО для каждого из слоев лёссовых пород.

Таблица 4

Данные опробования лёссовых пород краснодубровской свиты динамическим зондированием

Слой	Показатель пенетрации в главных направлениях							
	ξ_1				ξ_2			
	вдоль профиля		по слою в целом		вдоль профиля		по слою в целом	
	\bar{N}	$V, \%$	\bar{N}	$V, \%$	\bar{N}	$V, \%$	\bar{N}	$V, \%$
I	4,4	22,6	4,8	29,9	3,9	18,5	4,6	33,4
II	6,9	18,2	7,0	26,7	6,6	11,6	6,5	24,9
III	10,0	18,2	10,0	29,5	10,0	13,5	10,0	24,9

Шаг опробования по ξ_1 для слоя I составит $\Delta\xi_1^I = (20/\sqrt{30}) \times (1/1,2) = 3,0$ км; шаг опробования по ξ_2 для этого слоя $\Delta\xi_2^I = (20/\sqrt{30}) \cdot 1,2 = 4,3$ км. Для II и III слоев соответственно получим: $\Delta\xi_1^{II} = 2,8$ км, $\Delta\xi_2^{II} = 7,3$ км и $\Delta\xi_1^{III} = 3,0$ км, $\Delta\xi_2^{III} = 5,2$ км.

Параметры систем опробования разных слоев различны: $3,0 \times 4,3$ (I слой); $2,8 \times 7,3$ км (II слой) и $3,0 \times 5,2$ км (III слой). Это естественно, поскольку слои отличаются характеристиками изменчивости. Для реализации двухмерной системы размещения точек динамической пенетрации всех трех слоев следует выбрать наименьшие значения шагов опробования по ξ_1 и по ξ_2 . Для рассматриваемого примера СО будет иметь параметры $2,8 \times 4,3$ км. Определение размеров зоны свободного размещения требует расчета параметров СО с учетом погрешности определения модуля анизотропности. Погрешность модуля анизотропности показателя пенетрации I слоя лёссовых пород в плоскости $\xi_1\xi_2$ равна $\pm 0,1$. При расчете шага опробования по ξ_1 с учетом погрешности модуля анизотропности получим два значения $\Delta\xi_1$: 2,8 км ($G=1,2+0,1$) и 3,3 км ($G=1,2-0,1$). Аналогично имеем два значения шага опробования по ξ_2 — $\Delta\xi_2$: 4,7 км ($G=1,2+0,1$) и 4,0 км ($G=1,2-0,1$). Длина участка свобод-

ного размещения по ξ_1 равна 0,5 км, по ξ_2 — 0,7 км, $F = 0,5 \times 0,7$ км. В пределах участка точки опробования могут смещаться на 0,25 км в обе стороны от его центра в направлении ξ_1 и на 0,35 км — в направлении ξ_2 . При установлении местоположения каждой конкретной точки опробования в пределах участка свободного размещения следует учитывать особенности инженерно-геологических условий или природную и хозяйственную обстановку.

После расчета параметров СО всегда проверяется условие получения независимых величин, заключающееся в анализе неравенств $\Delta \xi_1 \geq r_{k_{\xi_1}}$ и $\Delta \xi_2 \geq r_{k_{\xi_2}}$. Проверка показала, что для всех рассматриваемых слоев они выполняются.

4.4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХМЕРНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ОПРОБОВАНИЯ

Расчет трехмерной пространственной системы опробования (так же как и двухмерной) предполагает выполнение условия равноточности оценок средних значений исследуемого показателя, подсчитанных по данным опробования геологического тела в главных направлениях изменчивости и по глубине. Опуская выкладки, аналогичные приведенным в разд. 4.3, для трехмерной СО запишем замкнутую систему уравнений

$$\begin{aligned} n &= n_1 n_2 n_3 & \frac{n_1}{n_2} &= G_{\xi_1 \xi_2}^2 \\ \frac{n_1}{n_3} &= G_{\xi_1 \xi_3}^2 & \frac{n_2}{n_3} &= G_{\xi_2 \xi_3}^2, \end{aligned}$$

где n — объем СО; n_1, n_2, n_3 — число точек опробования по главным направлениям ξ_1 и ξ_2 и по глубине ξ_3 ; $G_{\xi_1 \xi_2}, G_{\xi_1 \xi_3}, G_{\xi_2 \xi_3}$ — модули анизотропности для плоскостей $\xi_1 \xi_2, \xi_1 \xi_3, \xi_2 \xi_3$. Решив эту систему уравнений относительно n_1, n_2 и n_3 , получим:

$$\begin{aligned} n_1 &= \sqrt[3]{n G_{\xi_1 \xi_2}^2 G_{\xi_1 \xi_3}^2}; & n_2 &= \sqrt[3]{n \frac{G_{\xi_2 \xi_3}^2}{G_{\xi_1 \xi_2}^2}}; \\ n_3 &= \sqrt[3]{n \frac{1}{G_{\xi_1 \xi_3}^2 G_{\xi_2 \xi_3}^2}}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Как и при расчете двухмерной СО, имеем

$$\begin{aligned} n_1 \Delta \xi_1 &= L_{\xi_1}; \\ n_2 \Delta \xi_2 &= L_{\xi_2}; & n_3 \Delta \xi_3 &= L_{\xi_3}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где $L_{\xi_1}, L_{\xi_2}, L_{\xi_3}$ — размеры опробуемого геологического тела соответственно по ξ_1, ξ_2 и ξ_3 . Решив формулы (4.11) относительно

$\Delta\xi$ и подставив его значение в соответствующие уравнения (4.10), получим выражения для подсчета параметров трехмерной регулярной СО:

$$\Delta\xi_1 = \frac{L_{\xi_1}}{\sqrt[3]{nG_{\xi_1\xi_2}^2 G_{\xi_1\xi_3}^2}}; \quad (4.12)$$

$$\Delta\xi_2 = \frac{L_{\xi_2}}{\sqrt[3]{\frac{nG_{\xi_2\xi_3}^2}{G_{\xi_1\xi_2}^2}}}; \quad (4.13)$$

$$\Delta\xi_3 = \frac{L_{\xi_3}}{\sqrt[3]{\frac{n}{G_{\xi_1\xi_3}^2 G_{\xi_2\xi_3}^2}}}. \quad (4.14)$$

Формулы (4.12)—(4.14) можно привести к более простому виду, заменив квадраты модулей анизотропности отношением дисперсий D исследуемого показателя в главных направлениях и по глубине. Опуская промежуточные выкладки, приведем окончательные выражения параметров трехмерной СО:

$$\Delta\xi_1 = \frac{L_{\xi_1}}{\sqrt[3]{n \frac{D_{\xi_1}^2}{D_{\xi_1} D_{\xi_3}}}}; \quad \Delta\xi_2 = \frac{L_{\xi_2}}{\sqrt[3]{n \frac{D_{\xi_2}^2}{D_{\xi_1} D_{\xi_3}}}}; \quad (4.15)$$

$$\Delta\xi_3 = \frac{L_{\xi_3}}{\sqrt[3]{n \frac{D_{\xi_3}^2}{D_{\xi_1} D_{\xi_2}}}}.$$

После расчета параметров СО проверяют условие $\Delta\xi_1 \Delta\xi_2 \times \Delta\xi_3 \geq V_{\text{кор}}$ (где $V_{\text{кор}}$ — область автокорреляции (статическая проба), равная $r_{K_{\xi_1}} r_{K_{\xi_2}} r_{K_{\xi_3}}$).

4.5. ПАРАМЕТРЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ ОПРОБОВАНИЯ

Пространственно-временную СО характеризуют пространственные и временные параметры. Пространственные параметры СО — шаги и интервал опробования ($\Delta\xi_1$, $\Delta\xi_2$ и $\Delta\xi_3$) — рассчитывают в соответствии с указаниями, содержащимися в разделах 4.1—4.3. Временной параметр (период времени между наблюдениями) Δt можно подсчитать как параметр одномерной СО (см. разд. 4.1). Зададимся условием, что точ-

ность аппроксимации случайного ряда результатов наблюдений E_0 должна удовлетворять неравенству $E_0 < E$ (где $E = M \times \times [R(t)] - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$; $M[R(t)]$ — математическое ожидание случайного ряда; $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$ — оценка среднего значения параметра R , полученная по n измерениям). Как и в разд. 4.2, запишем $\Delta t \leq E_0 / |\dot{R}(t)|_{\max}$, где $|\dot{R}(t)|_{\max}$ — максимальная величина отношения $(R_{i+1} - R_i) / (t_{i+1} - t_i)$.

Величина E_0 должна находиться в интервале между значениями E_M (абсолютная точность измерения наблюдаемого параметра) и $\Delta R = t_\alpha s$, т. е. $E_M < E_0 < t_\alpha s$ (где s — выборочное среднее квадратическое отклонение; t_α — табличная величина, зависящая от принятого уровня доверительной вероятности $st_\alpha = R_n - \bar{R}$; R_n — крайнее значение упорядоченного ряда частных значений наблюдаемого параметра, \bar{R} — оценка среднего значения). Исходные данные для подсчета \bar{R} , s , а также для выбора R_n и $|\dot{R}(t)|_{\max}$ получают по результатам режимных наблюдений параметра в течение исходного времени, существенно меньшего, чем полный расчетный период функционирования пространственно-временной СО.

Для определения периода времени между наблюдениями можно воспользоваться приемом, предусматривающим выполнение требования, чтобы среднее квадратическое отклонение оценки среднего значения случайного процесса от его математического ожидания не превысило заранее заданной величины.

Для расчета Δt в этом случае используют выражение

$$K_{RR}(\Delta t_i) = K_{RR}(0) - \frac{E^2}{2}, \quad (4.16)$$

где $K_{RR}(0)$ и $K_{RR}(\Delta t_i)$ — оценки автокорреляционной функции соответственно при $\tau=0$ и $\tau=\Delta t_i$; E — принятая величина погрешности аппроксимации. Зная величины E и $K_{RR}(0)$, по формуле (4.16) можно подсчитать $K_{RR}(\Delta t_i)$ и по графику-коррелограмме определить Δt .

В случае стационарного случайного процесса с нормальным распределением наблюдаемого параметра R период времени между наблюдениями выбирают исходя из погрешности аппроксимации E

$$E = \frac{\Delta t}{T} \sum_{i=1}^T R_i - M[R(t)], \quad (4.17)$$

где Δt — период времени между наблюдениями; T — полный расчетный период функционирования СО; $\frac{\Delta t}{T} \sum_{i=1}^T R_i$ — оценка среднего значения случайного процесса; $M[R(t)]$ — математи-

ческое ожидание случайного процесса. Из уравнения (4.17) получим

$$\Delta t = \frac{T \{M[R(t)] + E\}}{\sum_{i=1}^T R_i} \quad (4.18)$$

4.6. РАСЧЕТ ЧИСЛА, ПЛОЩАДИ И ФОРМЫ КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКОВ-ЭТАЛОНОВ

В процессе среднемасштабной инженерно-геологической съемки опробование проводят на ключевых участках-эталонах. Число и местоположение их устанавливают на основании анализа данных о пространственной изменчивости показателей свойств грунтов. Поскольку данные опробования представляют в виде оценок средних значений показателей и мер их рассеяния, то, естественно, ключевой участок-эталон должен располагаться в пределах квазиоднородной области поля опробуемого геологического параметра, а число таких участков не должно быть меньше числа квазиоднородных областей поля. Таким образом, решение вопроса о минимальном числе ключевых участков-эталонов предполагает предварительную оценку поля опробуемого геологического параметра (однородное или неоднородное), которую можно получить путем проверки режима изменчивости параметра в главных направлениях. Если поле опробуемого параметра однородно (режим изменчивости по ξ_1 и ξ_2 стационарный), то для получения представительных оценок показателей свойств грунтов достаточно опробовать один ключевой участок-эталон. Если же режим изменчивости показателя по ξ_1 нестационарный, то нужно разделить поле на квазиоднородные области, внутри которых режим изменчивости показателя в любом направлении плоскости $\xi_1\xi_2$ можно считать стационарным в соответствии с принятым критерием. В качестве такого критерия можно предложить приближенную оценку несущественности различия оценок средних значений показателя, которая записывается в виде условия $\bar{R}_i - \bar{R}_{i-1} \leq 2\sigma_R$ (где \bar{R}_i и \bar{R}_{i-1} — оценки среднего значения показателя, соответствующие границам квазиоднородной области шириной l_ξ ; σ_R — среднее квадратическое отклонение частных значений показателя). Критерий означает, что различия между оценками среднего значения показателя внутри квазиоднородной области поля шириной l_ξ укладываются в интервал $\pm 2\sigma_R$. Величину l_ξ можно установить следующим образом:

$$\text{grad } \bar{R} = \frac{\Delta \bar{R}}{l_\xi} = \frac{\bar{R}_i - \bar{R}_{i-1}}{l_\xi},$$

откуда

$$l_\xi = \frac{\bar{R}_i - \bar{R}_{i-1}}{\text{grad } \bar{R}} \quad (4.19)$$

Вместо неизвестных \bar{R}_i и \bar{R}_{i-1} в уравнение (4.19) подставим $2\sigma_R$ и заменим $\text{grad } \bar{R}$ выражением $(\bar{R}_n - \bar{R}_0)/L_\xi$ (для линейного тренда). В результате получим выражение

$$l_\xi = L_\xi \frac{2\sigma_R}{\bar{R}_n - \bar{R}_0}. \quad (4.20)$$

Значения σ_R , \bar{R}_n и \bar{R}_0 получают по данным рекогносцировочных работ. Минимальное число ключевых участков-эталонов $n_{\text{min}} = = L_\xi/l_\xi$.

Положение ключевого участка-эталона в пределах квазиоднородной области поля исследуемого геологического параметра устанавливают, оценивая изменчивость показателей свойств грунтов по их случайной последовательности, секущей квазиоднородную область по ξ_1 .

На ключевом участке показатели свойств должны быть типичными. Величину показателя свойств можно считать типичной, если: а) сохраняется характер изменения оценок его средних значений; б) сохраняется режим флуктуаций (размах и частота колебаний частных значений вокруг среднего такие же, как и на других участках случайной последовательности значений показателя по ξ_1); в) отсутствуют резкие аномалии частных значений показателя.

Для выбора места ключевого участка-эталона по случайной последовательности показателя на ней показывают математическое ожидание и интервалы $\pm 2\sigma$. В случае сомнения в правильности размещения ключевого участка можно проверить условие несущественности различия между оценками среднего значения параметра на выбранном отрезке случайной последовательности \bar{R}_i и среднего значения \tilde{R} на отрезке $l_\xi: \bar{R}_i - \tilde{R} \leq \leq s_{\bar{R}_i} t_\alpha$ (критерий Стьюдента). Значения t_α получают по таблице для выбранного уровня значимости [21]. Кроме критерия Стьюдента можно воспользоваться выражением $|\bar{R} - \bar{R}_i| \leq 2\sigma_{\bar{R}-\bar{R}_i}$,

где

$$\sigma_{\bar{R}-\bar{R}_i} = \sqrt{\frac{s_i^2(n_i - 1) + s^2(N - 1)}{n_i + N - 2} \cdot \frac{N + n_i}{N n_i}}. \quad (4.21)$$

В выражении (4.21) s^2 — оценка дисперсии показателя на отрезке l_α

$$s^2 = \frac{1}{N - k} \sum_1^k s_i^2(n_i - 1),$$

где N — суммарный объем выборок, по которым произведен расчет \tilde{R} ; k — число выборок; s_i^2 — оценка дисперсии для выбранного участка; n_i — объем выборки, по которой подсчитано \bar{R}_i .

Приведенные соображения, естественно, не означают, что ключевые участки-эталоны нужно располагать только на линиях опорных профилей, для которых проведены рекогносцировочные работы. Их можно размещать на всей территории ландшафтной единицы, принадлежащей к квазиоднородной области, в тех местах, где компоненты инженерно-геологических условий являются типичными. Однако при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать местам пересечения опорных профилей. Можно также сдвигать ключевые участки вдоль фронта сноса (по ξ_2), особенно когда есть уверенность в том, что при этом режим изменчивости показателя по ξ_1 изменяется несущественно.

Расчет площади участка-эталона проводят в соответствии со следующим алгоритмом.

1. С учетом указаний, рассмотренных выше (см. гл. 3), находим нужное число точек опробования, обеспечивающее получение оценок средних значений показателей свойств грунтов с принятым уровнем доверительной вероятности. По данным рекогносцировочных работ на взаимно перпендикулярных профилях, ориентированных по ξ_1 и ξ_2 , подсчитываем нужные статистики \bar{R}_{ξ_1} , \bar{R}_{ξ_2} , $\sigma_{R_{\xi_1}}$, $\sigma_{R_{\xi_2}}$, $\sigma_{R_{\xi_1\xi_2}}$, G и радиусы корреляции $r_{k_{\xi_1}}$ и $r_{k_{\xi_2}}$.

2. Находим область корреляции опробуемого геологического параметра $s_{кор} = r_{k_{\xi_1}} r_{k_{\xi_2}}$. Поскольку радиус корреляции можно рассматривать как минимальный шаг опробования

$$s_{кор} = \Delta \xi_1 \Delta \xi_2. \quad (4.22)$$

3. Выражение (4.22) есть площадь элементарной ячейки двухмерной СО, поэтому площадь F ключевого участка-эталона будет равна

$$F = n \Delta \xi_1 \Delta \xi_2, \quad (4.23)$$

где n — число точек опробования.

4. Определим длину сторон ключевого участка-эталона по главным направлениям изменчивости L_{ξ_1} и L_{ξ_2} . Для этого воспользуемся уравнениями

$$F = L_{\xi_1} L_{\xi_2}, \quad \frac{L_{\xi_1}}{L_{\xi_2}} = \frac{\Delta \xi_1}{\Delta \xi_2} G^2. \quad (4.24)$$

Решая систему уравнений (4.24) относительно L_{ξ_1} и L_{ξ_2} получим формулы для расчета длин сторон ключевого участка-эталона

$$L_{\xi_1} = G \sqrt{F \frac{\Delta \xi_1}{\Delta \xi_2}} \quad \text{и} \quad L_{\xi_2} = \frac{1}{G} \sqrt{F \frac{\Delta \xi_2}{\Delta \xi_1}}. \quad (4.25)$$

Рассматриваемый метод определения площади и формы ключевых участков пригоден и для расчета ключевых участков, располагаемых в местах, выбранных на основании анализа структуры ландшафта.

ОТБОР, КОНСЕРВАЦИЯ И ХРАНЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

5.1. СПОСОБЫ ОТБОРА ПРОБ

Отбор проб является составной частью инженерно-геологического опробования. Качество его наряду с числом проведенных испытаний существенно влияет на точность и надежность оценок показателей свойств. Способы отбора проб должны обеспечивать их представительность для каждого конкретного типа пород и возможность проведения необходимых испытаний в соответствии с требованиями методики исследований.

Набор показателей свойств, виды и методику испытаний устанавливают в зависимости от цели инженерно-геологических исследований с учетом типа пород. В то же время методы исследования нередко определяются не только целевым назначением работ, но и техническими возможностями исполнителя. Набор показателей свойств и методика исследований обуславливают требования к видам проб и способам их отбора.

Различают пробы с нарушенной и ненарушенной естественной (моноклиты) структурой. Первые предназначены для определения состава (гранулометрического, минерального, солевого и др.), пластических свойств и термовлажностного состояния; вторые — для исследования строения пород, их прочностных и деформационных свойств.

В настоящее время применяют главным образом следующие способы отбора проб: точечный, бороздовый и валовой.

Точечный способ заключается в отборе небольшой по объему части породы с нарушенной или ненарушенной структурой, характеризующей лишь данную точку массива пород. Значения показателей свойств, определенные по таким пробам, представляют собой статистическую совокупность, отражающую изменчивость изучаемого показателя свойств на данном уровне исследований, соответствующем области воздействия эксперимента. Свойства массива пород оцениваются средним значением, полученным при статистической обработке результатов испытаний. Наибольшую представительность и эффективность этот способ отбора обеспечивает при исследовании однородных пород.

Бороздовый и валовой способы применяются при отборе проб с нарушенной структурой для лабораторного определения показателей свойств массивов пород. Они позволяют получить после соответствующей обработки (перемешивания и сокращения пробы методом квартования) образец породы, обладающий средними значениями показателей свойств, характеризующими всю опробуемую часть массива. Как показывает опыт [20], значения показателя, определенные по валовой или бороздовой пробам, аналогичны средним значениям, получен-

ным при усреднении результатов испытаний точечных проб. Таким образом, применение этих способов позволяет значительно сократить число лабораторных испытаний при одной и той же точности результата.

Бороздовым способом грунт отбирают из борозды, выдержанной по размеру и проходящей вкрест или по простиранию слоев. В качестве валовой пробы используют всю породу, извлеченную из горной выработки. Особенности этих способов делают чрезвычайно эффективным их применение при исследовании неоднородных и слоистых пород. Длина борозды, обеспечивающей представительность всех типов пород при опробовании слонстой толщи, может быть рассчитана исходя из требований к точности оценки показателя и зависит от мощности отдельных слоев.

Полученные образцы можно использовать и для определения объемной массы породы ρ , если удастся определить объем борозды или горной выработки. При бороздовом опробовании эта задача решается довольно просто. Если вырезать борозду специальным ножом с известной площадью поперечного сечения s , то $\rho = m/(ls)$ (где m — масса породы, извлеченной из борозды; l — длина борозды). Для определения объема горной выработки при валовом отборе пробы предложено несколько способов, основанных на заполнении полости материалом, объем которого может быть легко измерен заполнителями (водой, чистым однородным песком и др.). Для защиты выработки от утечки воды рекомендуется покрывать ее стенки защитной пленкой из тонкой резины, жидкой целлюлозы и т. д.

При расчете числа точек инженерно-геологического опробования в соответствии с основными положениями (см. главы 1—4) следует иметь в виду, что в силу влияния масштабного эффекта, проявляющегося при изменении объема пробы в зависимости от способа ее отбора, различными будут и оценки дисперсии, используемые в расчете.

Все перечисленные выше способы отбора проб применимы при исследовании как песчано-глинистых, так и скальных пород; изменяются лишь технические средства и приемы отбора.

Отбор проб проводится из стенок естественных обнажений, открытых горных выработок (шурфы, канавы, штольни и др.) и скважин. В последнем случае kern может рассматриваться и как бороздовая проба, пересекающая изучаемый разрез, и как валовая, так как при колонковом бурении его можно рассматривать как полный объем грунта из горной выработки — скважины.

В табл. 5 приведены требования к объему и массе проб пород с нарушенной и ненарушенной структурой в зависимости от определяемых показателей свойств.

Отбор, упаковка, транспортировка и хранение образцов песчано-глинистых и скальных пород регламентируются соответствующими ГОСТами (12071—72 и 21153.0—75—21153.7—75).

Объем и масса инженерно-геологических проб

Показатели состояния и физико-механических свойств пород	Состав и состояние породы	Количество (масса или объем) породы
<i>Физические свойства</i>		
Гранулометрический состав	Глинистые породы нарушенной структуры, не сохранившие естественной влажности, в воздушно-сухом состоянии Супесчаные породы, не сохранившие естественной влажности и структуры Пески в воздушно-сухом состоянии	10—20 г, полученные квартованием из объема 250 см ³ 10—20 г, полученные квартованием из объема 250 см ³ 100 г, полученные квартованием из объема 1000 см ³
Плотность	Песчано-глинистые породы нарушенной структуры в воздушно-сухом состоянии	20—30 г, полученные квартованием из объема 200—300 см ³
Объемная масса *	Пески в воздушно-сухом состоянии Глинистые породы ненарушенной структуры с естественной влажностью	250—300 см ³ Кусочек породы объемом до 150 см ³ для метода парафинирования и монолит 10×10×10 см для метода режущих пород
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 влажность	Песчано-глинистые породы нарушенной структуры	50 г, полученные квартованием из объема 500 см ³
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

* Объемную массу определяют в рыхлом и плотном сложениях.

Показатели состояния и физико-механических свойств пород	Состав и состояние породы	Количество (масса или объем) породы
Усадка	Глинистая порода нарушенной и ненарушенной структуры с естественной влажностью и в воздушно-сухом состоянии	Монолиты 10×10×10 см и 150—200 см ³ грунта нарушенного сложения, полученного квартованием
Коэффициент фильтрации	Пески и супеси	300 см ³
	Глинистая порода ненарушенной структуры с естественной влажностью	Монолит 10×10×10 см
Липкость	Глинистая порода нарушенной структуры	50—100 г
	<i>Механические свойства</i>	
Сжимаемость	Глинистая порода нарушенной структуры с естественной влажностью	Монолит 25×25×25 см
Сопротивление сдвигу	Глинистая порода нарушенной структуры с естественной влажностью	Монолит 20×20×20 см
Угол естественного откоса песка	Песок с естественной влажностью и в воздушно-сухом состоянии	1200—1500 см ³

Отбор проб с нарушенной структурой практически не вызывает затруднений. Если не требуется сохранить природную влажность, то отбирать образцы можно в любую тару-мешочки (из ткани, полиэтилена, бумаги). Для сохранения естественной влажности образцы помещают в герметически закрывающиеся банки. При небольшом объеме пробы достаточно обычных алюминиевых боксов, крышки которых для обеспечения герметичности парафинируют.

Более сложен отбор образцов с ненарушенной структурой (монолитов) из открытых горных выработок и скважин.

5.2. ОТБОР МОНОЛИТОВ ИЗ ШУРФОВ И ЕСТЕСТВЕННЫХ ОБНАЖЕНИЙ

Монолиты пород, являющиеся точечными пробами, отбирают из дна или стенок открытых горных выработок и естественных обнажений преимущественно двумя способами.

При первом способе с помощью режущего инструмента, соответствующего типу породы (лопата, нож, проволоочный зонд), от нее отделяют монолит требуемого размера (табл. 6). Сначала вырезают боковые и верхнюю грани, и затем осторожно

подрезают нижнюю грань и извлекают монолит для окончательной зачистки и консервации. Чтобы избежать разрушения монолита при подрезке нижней грани, на него надевают специальную форму или обойму.

Второй способ, применяемый только для рыхлых песчано-глинистых пород (не держащих форму), заключается в отборе монолитов при помощи режущего кольца (по ГОСТ 5182—78), которое осторожно вдавливают породу, постоянно удаляя грунт от его боковых стенок. После вдавливания кольцо подрезают,

Таблица 6

Оптимальные размеры образцов породы ненарушенной структуры, отбираемых из буровых скважин

Породы	Высота образца, мм	Минимальный диаметр образца, мм	Средняя толщина нарушенной зоны образца, мм
Скальные	700—1500	80	2
Глинистые:			
твердые	700	90	9
полутвердые	700	90	9
тугопластичные	400—700	100	10
мягкопластичные	400—700	100	10
текучепластичные	300—500	80	3
текучие	300—500	80	3
Песчаные:			
плотные	500	90	7
рыхлые	500	90	5
водонасыщенные	700	90	3

зачищают с торцов и парафинируют. Основные затруднения при этом способе отбора заключаются в обеспечении равномерности погружения кольца, чтобы избежать его перекаса и нарушения монолита.

5.3. ОТБОР МОНОЛИТОВ ИЗ СКВАЖИН

Отбор монолитов с забоя скважин осуществляют главным образом при помощи грунтоносов, которые состоят из двух вложенных друг в друга цилиндров. Наружный цилиндр, снабженный режущим наконечником (башмаком), обеспечивает погружение грунтоноса в породу под воздействием передаваемого на него усилия: статического (при вдавливании), динамического (при забивном способе) или вращательного (при обурировании). Внутренний цилиндр представляет собой приемную гильзу для монолита.

При погружении грунтоноса в породу нарушается естественная структура боковой поверхности образца. Наличие нарушенной зоны необходимо учитывать при выборе диаметра

бурения и размера грунтоноса. Внутренний диаметр грунтоноса (диаметр образца) должен быть равен диаметру кольца прибора, на котором будут проводиться испытания, увеличенному на удвоенную толщину пристенной нарушенной зоны в образце. Степень нарушения и толщина нарушенной зоны зависят от вида породы (ее структурных связей) и способа внедрения грунтоноса. В табл. 6 приведены рекомендуемые оптимальные раз-

Т а б л и ц а 7

Основные типы грунтоносов [41]

Грунтоносы	Диаметр, мм			Для каких пород предназначены	Конструкции
	наружный	внутренний	входного отверстия		
Обуривающие	160	96	94	Глины твердой консистенции, плотные и цементированные пески	Грунтонос Фундаментпроекта, ручной грунтонос ВСЕГИН-ГЕО
Забивные	123	114	108	Связные и слабо-связные глинистые грунты	Грунтонос Гидропроекта
Вдавливаемые модель I	106	102,5	99	Глинистые грунты полутвердой и тугопластичной консистенции	Грунтонос, разработанный Энергосеть-проектом при участии ПНИИИС
модель II	120	108	—	Глинистые грунты мягкопластичной консистенции	Грунтонос ЛенГРИИ (с подрезным устройством) с изменениями, внесенными ЦТИСИЗ
модель III	108	89	—	Глинистые грунты текучепластичной и текучей консистенции, илы, водонасыщенные рыхлые пески	Грунтонос, разработанный ПНИИИС при участии Энергосеть-проекта

меры отбираемых из буровых скважин образцов пород ненарушенной структуры, а в табл. 7 — основные типы грунтоносов с указанием условий их применения.

Монолиты скальных, полускальных и многолетнемерзлых пород можно отбирать с помощью обычного колонкового бурения. Чтобы избежать нарушения естественной структуры, влажности и температуры пород, скважины, подлежащие опробованию, проходят всухую, без промывки, выбирая оптимальный режим бурения.

5.4. ОТБОР ПРОБ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Отбор проб твердых горных пород с коэффициентом крепости по Протоdjяконову не менее 0,5 (прочность при одноосном сжатии не менее 5,0—8,0 МПа) производится в соответствии с ГОСТ 21153.0—75, устанавливающим для каждого вида испытаний количество и размеры (длина и диаметр) керна или кусков породы, а также оборудование, инструменты и материалы для отбора и испытания проб пород. Значительно больший по сравнению с песчано-глинистыми грунтами объем проб скальных и полускальных пород обусловлен наличием в породах скрытой трещиноватости, затрудняющей изготовление образцов нужной формы.

Трещиноватость увеличивает разброс значений показателей свойств, поэтому для получения в точке опробования достоверного результата требуется от 3 до 10 проб. Учитывая возможную анизотропность свойств, обусловленную слоистостью пород или направленной трещиноватостью, число проб следует увеличить вдвое для проведения испытаний во взаимно перпендикулярных направлениях.

При отборе проб-монолитов скальных пород желательно не проводить взрывных работ, допуская их лишь при крайней необходимости для отделения от массива крупных глыб, из которых затем выкалывают образцы требуемого размера. На образцах по возможности следует отмечать ориентировку.

С учетом всех требований длина керна в точке опробования должна составлять от 1,2 до 7,0 м (ГОСТ 21153.0—75), что может привести к значительной неоднородности показателей свойств в одной пробе. Поэтому надо стремиться к сокращению интервалов опробования.

Окончательные результаты испытаний представляют в виде среднего арифметического значения показателя для точки (интервала) опробования. При этом надо иметь в виду, что значения показателей прочности, деформируемости и плотности всегда оказываются завышенными, так как для ослабленных участков, как правило, характерен пониженный выход керна и он имеет плохую сохранность. Последнее не дает возможности провести испытания всех разновидностей породы. Общие требования к методам физических испытаний определены ГОСТами 21153.0—75 — 21153.7—75.

5.5. КОНСЕРВАЦИЯ, УПАКОВКА И ХРАНЕНИЕ ОБРАЗЦОВ НАРУШЕННОГО СЛОЖЕНИЯ И МОНОЛИТОВ

В соответствии с ГОСТ 12071—72 основные требования к консервации и упаковке образцов заключаются в следующем.

1. Все образцы должны снабжаться двумя этикетками, на которых указаны головная организация, выполняющая исследования; полевая партия; место отбора пробы; номер образца;

вид выработки и ее номер; глубина отбора пробы; полевое наименование грунта; должность и фамилия исполнителя; дата отбора. Одна этикетка помещается непосредственно с образцом (в мешочке для проб нарушенного сложения, в герметический стакан или под парафин на верхнюю грань монолита), другая — наклеивается поверх упаковки и покрывается парафином*. Этикетки заполняются простым мягким карандашом или шариковой ручкой, чтобы избежать расплывания или стирания надписи.

2. На образцах с ненарушенной структурой (монолитах) обязательно отмечается верхняя, а при необходимости и передняя грани. Если не требуется сохранить природную влажность, то образцы с нарушенной структурой упаковывают в любую тару и снабжают этикетками, защищенными от размокания калькой и парафином. Образцы засоленных грунтов отбирают в мешочки с гидроизоляцией (из полиэтилена). При необходимости сохранения природной влажности в образцах с нарушенной структурой их упаковывают в цилиндрические стаканы с крышками, имеющими герметические прокладки, или в обычные боксы и заливают парафином.

Консервация монолитов, в том числе и скальных пород, производится на месте их отбора. Зачищенный монолит обертывают двумя слоями марли, пропитанной парафином. Одну этикетку укладывают под нижний слой марли на верхнюю грань монолита, другую — на поверхностный слой парафина. Это предохраняет упакованные монолиты от образования трещин.

При необходимости дальнейшей транспортировки монолиты укладывают в ящики на расстоянии 2—3 см друг от друга и 4—5 см от стенок ящика. Зазоры заполняют стружкой, древесными опилками и другими аналогичными материалами. Образцы перевозят при температуре окружающего воздуха близкой к температуре породы (мерзлые породы при отрицательной, талые — при положительной). Пребывание законсервированных образцов при больших градиентах температуры допускается не более 3 ч.

Монолиты талых пород хранят при температуре не ниже 2 и не выше 20 °С и относительной влажности воздуха 50—60%. Образцы многолетнемерзлых пород для сохранения мерзлого состояния содержат при температуре не выше —4 и не ниже —15 °С.

Продолжительность хранения образцов без потери естественного состояния для скальных пород, маловлажных песков и глинистых пород твердой и полутвердой консистенции составляет не более 3 мес, а для влажных пород не более 1,5 мес.

При отсутствии специального хранилища запарафинированные образцы талых грунтов можно хранить во влажной среде (опилках, стружках и т. п.) при температуре до 30 °С, но срок

* Здесь и далее имеется в виду консервирующая смесь парафина с гудроном в отношении 70 : 30.

хранения в этом случае сокращается до 15 суток. Образцы пород, потерявшие природную влажность, могут храниться в течение неопределенного срока.

5.6. ПОРЯДОК ВСКРЫТИЯ МОНОЛИТОВ И ОТБОР ПРОБ ДЛЯ АНАЛИЗОВ

Монолиты вскрывают, осторожно срезая марлю в верхней части, где расположена этикетка. После этого освобождают от марли боковые грани в том месте, где предполагают отобрать пробу. Поверхность монолита зачищают, срезая верхний слой (толщиной около 1 см), пропитанный парафином. Осторожно отделяют кусок породы, на 2—3 см превышающий размеры кольца лабораторного прибора. Затем выравнивают верхнюю и боковые грани в местах отбора пробы, возвращают на место внутреннюю этикетку, вскрытую часть монолита плотно покрывают марлей и снова консервируют. Сверху монолит снабжают новой этикеткой, в которой указаны все сведения о монолите, включая дату вскрытия.

Законсервированные образцы природного сложения, отобранные в кольца, и образцы пород нарушенной структуры с естественной влажностью, хранящиеся в герметических банках, вскрывают и используют один раз.

**МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА
ГОРНЫХ ПОРОД**

Глава 6

**МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА ТВЕРДОГО
КОМПОНЕНТА ПОРОД**

6.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Состав твердого компонента является важнейшим качеством пород, во многом определяющим их поведение и свойства. Поэтому изучение и расчленение пород по составу является одной из основных задач инженерно-геологических исследований. Состав пород изучают в ходе как полевых, так и лабораторных исследований.

В полевых условиях состав пород исследуют в комплексе с наблюдениями, направленными на оценку инженерно-геологических условий региона или отдельной строительной площадки. Степень детальности расчленения толщи пород по составу определяется масштабом (стадией), целями и задачами инженерно-геологических изысканий. На первой стадии инженерно-геологических исследований главным образом в ходе мелко- и среднемасштабной инженерно-геологической съемки выделяют наиболее распространенные по площади и глубине геолого-генетические и фациальные комплексы пород, т. е. естественные ассоциации петрографических (литологических) типов пород одного генезиса, образовавшиеся в определенных ландшафтно-климатической и тектонической обстановках и занимающие определенное положение в стратиграфическом разрезе. Выделение этих комплексов полевыми методами позволяет составить первую наиболее общую инженерно-геологическую модель толщи отложений, объективно схематизирующую ее состав и строение и позволяющую отразить эту толщу на мелко- и среднемасштабных инженерно-геологических картах.

Наибольшую информацию о составе пород на первой стадии инженерно-геологических изысканий могут дать дистанционные методы: аэрофотосъемка, аэровизуальные наблюдения и аэрогеофизические методы разведки. Эти методы позволяют выявить площадное распространение геолого-генетических комплексов (а в некоторых случаях и отдельных литологических типов пород), проследить закономерности изменения их состава, условий залегания, мощностей и т. д. Объем и содержание информации о составе пород, получаемой с помощью аэрометодов, во многом зависят от ландшафтно-геологических условий района и степени его хозяйственного освоения. В пустынных, тунд-

ровых и таежных районах аэрометоды дают более полную информацию, чем в лесостепных, степных и хозяйственно освоенных районах. Поэтому во всех без исключения случаях, как в благоприятной, так и в неблагоприятной для расшифровки аэроснимков обстановке, аэрокосмические данные по изучению состава пород необходимо дополнять наземными наблюдениями. С помощью последних решаются две основные задачи: а) проверяется и уточняется информация, получаемая с помощью дистанционных методов, б) ведется сбор дополнительной информации, особенно в районах, трудно поддающихся изучению с помощью аэрометодов.

При детальных инженерно-геологических исследованиях (крупномасштабная инженерно-геологическая съемка или инженерно-геологическая разведка конкретной площадки) ставится задача более детального расчленения толщи горных пород по составу, вплоть до выделения петрографических (литологических) типов и видов пород. Такое расчленение осуществляется в ходе тщательных наземных исследований опорных разрезов и определения состава пород с помощью ряда специальных методов.

При изучении скальных пород для этих целей применяются традиционные петрографические методы. Тип породы определяют по комплексу морфологических (форма, размер) признаков, а также по физическим (цвет, прозрачность, блеск, спайность, излом), механическим (твердость, прочность, хрупкость) и химическим (взаимодействие с HCl) свойствам основных породообразующих минералов. Определение ассоциаций минералов, входящих в породу, а также исследование структурных и текстурных особенностей позволяют в полевых условиях получить необходимую информацию о составе таких пород.

Исследование состава крупнообломочных пород также основывается на петрографических методах: изучается петрографический состав отдельных обломков, оценивается соотношение обломков различного состава, определяется преобладающий тип обломков. Петрографические наблюдения дополняются за мерами обломков, описанием их формы и т. д.

При изучении состава мелкообломочных (песчаных) пород с помощью лупы или визуально определяется минеральный состав песчаных зерен и их дисперсность. Исследование минерального состава проводится по морфологии зерен, а также по комплексу физических показателей, характерных для зерен основных породообразующих минералов. Дисперсность песков оценивается визуально или с помощью комплекта сит, применяемого для разделения песка по фракциям в полевых условиях.

Наиболее сложной задачей является определение состава тонкообломочных (глинистых) пород. Глинистые породы сложены мелкими обломками первичных и глинистых минералов, не поддающимися визуальному изучению. Поэтому их минеральный состав в полевых условиях исследуют с помощью кос-

венных методов, основанных на изучении поведения этих пород при взаимодействии с водой или органическими красителями. Поскольку активность такого взаимодействия определяется не только минеральным составом, но и дисперсностью глинистых пород, получаемые данные являются комплексными показателями минерального и гранулометрического состава этих пород.

Ниже дается более подробное описание дистанционных и наземных визуальных методов изучения состава пород. При этом наибольшее внимание уделяется методам определения минерального состава. Полевые методы изучения гранулометрического состава обломочных пород описаны в разд. 11.4.

6.2. АЭРОМЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВ ПОРОД

Основным видом аэрометодов при изучении литологических типов горных пород является дешифрирование материалов среднemasштабной (1 : 17 000—1 : 35 000) аэрофотосъемки. Оно позволяет оконтуривать на аэроснимках выходы пород определенного литологического типа; в отдельных случаях удается проследить изменение состава пород, что используется при картировании для составления специальных литолого-петрографических карт.

Характер отображения горных пород и их дешифрируемость на аэроснимках определяются рядом факторов, важнейшими из которых являются: структура геологических тел (отражающая характер дислоцированности), литолого-петрографические особенности пород (определяющие твердость и устойчивость пород к выветриванию и выражению в рельефе), тектонические движения (контролирующие направление и интенсивность развития рельефообразующих процессов), ландшафтно-климатические условия (отражающие зональность распространения растительного покрова, комплекса четвертичных отложений и природных процессов).

Наилучшие условия дешифрирования литологических типов пород характерны для платформенных областей аридной зоны, где горные породы обнажены. В гумидной зоне возникают значительные трудности при оконтуривании и опознании горных пород или их комплексов из-за наличия густой тундровой или лесной растительности. В складчатых областях дешифрирование осложнено большим разнообразием и дислоцированностью горных пород, а также трудностями выделения отдельных типов пород, имеющих ограниченное распространение.

Вопросы геологического дешифрирования подробно рассмотрены в работах В. М. Валяха, И. С. Гудилина, И. С. Комарова, А. В. Садова и др. [8, 15], и поэтому мы кратко остановимся на особенностях дешифрирования важнейших литологических типов пород. Ниже отдельно рассматриваются возможности дешифрирования четвертичных отложений и дочетвертичных пород.

Изучение четвертичных отложений

Дешифрирование аэрофотоснимков (АФС) позволяет выделять геолого-генетические и фациальные комплексы четвертичных отложений и получать определенную информацию о литологическом типе слагающих их пород.

Четвертичные отложения дешифрируются главным образом косвенно через систему индикаторов и дешифровочных признаков. Распознавание этих отложений неразрывно связано с дешифрированием геоморфологических особенностей. Единство, существующее между рельефообразованием и накоплением рыхлых отложений, обуславливает возможность использования рельефа в качестве ведущего индикатора не только генезиса, но и вещественного состава четвертичных отложений. Большую индикационную роль при этом играют также рисунок гидрографической сети, чутко реагирующий на характер рельефообразующих процессов, и растительность, в ряде случаев связанная с вещественным составом четвертичных отложений.

При изучении четвертичных отложений большое значение имеют дешифровочные признаки, обусловленные характером фотоизображения (тон, цвет, структура, конфигурация объектов), причем в открытых аридных районах эти признаки играют не менее важную роль, чем геоморфологические индикаторы. Они позволяют судить о генезисе четвертичных отложений, их литологическом составе и в некоторых случаях о возрасте. Однако использование только этих признаков недостаточно и может привести к ошибкам при дешифрировании. Поэтому необходимо использовать комплекс дешифровочных признаков и индикаторов.

Правильно интерпретировать данные дешифрирования помогает комплексный анализ компонентов ландшафта: общей геоморфологической и структурно-тектонической обстановки региона, характера гидросети, растительного покрова в сочетании с дешифровочными признаками. При этом следует отметить, что в каждом конкретном регионе возможны свои закономерности в формировании ландшафтообразующих процессов и поэтому универсальных объяснений причин возникновения того или иного явления не существует. В соответствии с этим могут изменяться дешифровочные признаки и индикаторы четвертичных отложений.

В различных ландшафто-климатических обстановках геолого-генетические и фациальные комплексы четвертичных отложений могут иметь различные фототона, цвет и структуру. Поэтому универсальные дешифровочные признаки вряд ли возможны.

Наиболее информативным и устойчивым признаком при дешифрировании четвертичных отложений является рисунок фотоизображения, поскольку его формирование обусловлено комплексом факторов: рельефообразующими процессами, гидро-

сеть, почвенно-растительным покровом, особенностями хозяйственного освоения территорий.

Как показывает опыт дешифрирования, на АФС могут быть выделены следующие геолого-генетические типы четвертичных отложений: элювиальные и элювиально-делювиальные, гравитационные, пролювиальные, аллювиальные, озерные, ледниковые, морские и лёссовые.

Элювиальные и элювиально-делювиальные отложения, приуроченные к плоским водораздельным пространствам и их пологим склонам, характеризуются расплывчато-пятнистым рисунком изображения, неоднородностью фототона (от светло- до темно-серого), обусловленной «просвечиванием» коренных пород. Отложения представлены корами выветривания или бесструктурным элювием различной мощности. Состав отложений зависит от типа материнских пород.

В горных районах на плоских водоразделах, сложенных изверженными, метаморфическими и прочными осадочными породами, под действием морозного выветривания формируются крупные поля глыбовых и щебенистых элювиальных россыпей, отчетливо дешифрируемых на АФС по характерным формам рельефа (глыбовым развалам, «каменным морям», останцам и трещинам выветривания) и характерной зернистой структуре изображения светло-серого тона.

В условиях полярных и субполярных широт элювиальные отложения дешифрируются на поверхностях коренных пород, образуя «каменные тундры» в виде каменных многоугольников, колец, пятен-медальонов и пр.

В лесной зоне, будучи скрытыми под почвенным и растительным покровом, элювиальные отложения дешифрируются лишь в пределах эрозионных врезов, а также на участках с разреженным древостоем, где щебнистые и глыбовые россыпи изображаются в виде светлых пятен зернистой структуры.

Более уверенно рыхлый щебнистый элювий непосредственно дешифрируется на АФС лишь на обнаженных участках в аридных районах по очень светлому тону изображения, а более тонкий песчано-глинистый элювий — по более светлому тону.

Гравитационные отложения обычно представлены обвальными, осыпными и оползневыми накоплениями.

Обвалы наблюдаются в горных районах, сложенных прочными, но трещиноватыми породами (известняки, песчаники, изверженные породы и т. п.), в условиях сильно расчлененного рельефа. Обвальные накопления характеризуются наличием крупных глыб и обломков горных пород. На АФС свежие обвальные накопления дешифрируются по треугольной, квадратной и трапециевидной форме и светлому тону крупнозернистой структуры изображения, резко контрастирующего с окружающей местностью. С течением времени обвальные накопления покрываются мхом, травянистой и кустарниковой растительностью, что затрудняет их распознавание на АФС.

Осыпи представляют собой различные по рельефу и форме скопления обломков, образовавшиеся в результате смещения выветрелых пород вниз по склону. Состав осыпей различен (от мелко- до крупнообломочных) и определяется типами, текстурой и трещиноватостью коренных пород, питающих осыпь. На АФС осыпные накопления определяются по характерным формам и структуре изображения преимущественно светлого тона.

В основании склонов они образуют конусы — треугольники или шлейфы, а на склонах — потоки или пятна. При длительном развитии осыпи могут покрыть весь склон, образуя чехол. Крупнообломочные осыпи имеют на АФС мелкозернистую точечную структуру; иногда при увеличении можно различить отдельные крупные глыбы. Осыпи, сложенные щебнистым и и щебнисто-древсяным материалом, имеют более однородную гомогенную структуру.

По мере затухания процессов выветривания и стабилизации движения материала поверхность осыпей задерновывается и зарастает травянисто-кустарниковой растительностью, в результате чего изображение становится более темным и постепенно сливается с окружающим фоном.

Оползневые накопления формируются на склонах горных хребтов, речных долин, морских и озерных побережий, оврагов и балок. На АФС свежие оползни четко опознаются по наличию светлых полос и пятен, резко контрастирующих с окружающим фоном, и характерным формам мезо- и микро-рельефа.

На АФС по формам оползневого цирка и оползневого тела можно определить тип оползня. Для крупных сместившихся массивов скальных пород характерны оползни фронтального типа, в виде серии узких, параллельных, сместившихся запрокинутых блоков, разделенных межблоковыми понижениями. Для оползневых смещений в обломочных накоплениях типичны оползни глетчерного типа. В толще глин формируются оползни циркообразной и ложкаобразной формы. Оползневые тела имеют пологую бугристую поверхность с характерными натечными формами.

Проллювиальные отложения слагают конусы выноса временных водотоков, днища небольших сухих или очень мало-водных долин и логов в горных районах. Они представлены преимущественно грубообломочными щебнисто-глыбовыми фракциями с песчано-суглинистым заполнителем. На АФС проллювиальные отложения дешифрируются по характерным конусам выноса, прорезанным сетью эрозионных рытвин, расходящихся веером к основанию конуса, и светлому тону изображения.

Аллювиальные отложения приурочены к долинам рек и имеют характерный ленточный или полосный рисунок изображения на АФС. Русловой и пойменный аллювий по извилистым лентам четко отличается от террас, имеющих прерывисто-полосчатые контуры.

Различные русловые фации (косы, пляжи и т. д.), сложенные галечниками и песками, отчетливо распознаются по положению в русле реки и очень светлому тону изображения.

Пойменные фации в речных долинах имеют, как правило, двучленное строение и представлены супесями, суглинками и глинами, подстилаемыми песками. Нередко они в той или иной степени заторфованы. На АФС эти фации опознаются по наличию протоков, стариц, остаточных озер, прирусловым валам и веерам блуждания русел. Тон изображения неоднородный, в большинстве случаев темно-серый.

Надпойменные террасы выделяют по характерным высотным уровням при стереоскопическом изучении АФС и специфическим ландшафтам аллювиальных равнин с разнообразным рисунком фотонизображения, обусловленным особенностями геолого-литологического строения и климатической обстановки.

Дельтовые фации, представленные, как правило, тонкими песчано-глинистыми осадками, выделяются по наличию низменных поверхностей, далеко вдающихся в море и прорезанных руслами протоков и староречий. Поэтому образуется характерный веерообразный рисунок неоднородного, преимущественно светлого тона изображения.

Озерные отложения развиты в пределах современных и древних озерных котловин и в большинстве случаев представлены тонкозернистыми песками, супесями, реже глинами. На АФС они выделяются по равнинному рельефу крупных котловин и межгорных впадин и характеризуются однородным серым фототонем и нечетко выраженным рисунком, иногда приобретающим концентрически-полосчатый характер, обусловленный наличием озерных террас за счет усыхания водоема.

Ледниковые отложения широко распространены в высокогорных и равнинных областях. Среди ледниковых отложений различают: основную и конечную морены, флювиогляциальные и озерно-ледниковые. В высокогорных областях они локализуются в современных и древних троговых долинах и цирках в виде морен различного типа. Такие морены сложены глыбово-щебнистым материалом с супесчаным и песчаным заполнителем. В теле морен встречается погребенный лед. Современные морены обычно примыкают к ледникам. На поверхности морен выделяются ступени, отвечающие стадиям оледенения. Различные типы морены отчетливо выделяются на АФС по положению в рельефе и характерному рисунку: дугообразно-полосчатому (для боковых и фронтальных морен) и неоднородно-пятнистому (для срединных морен). Структура изображения поверхности зернистая или точечная, преимущественно светлого и светло-серого тона. При стереоскопическом изучении поверхность морены неровная, бугристая, местами холмистая или грядовая с многочисленными понижениями неправильной формы, термокарстовыми озерами; растительный покров отсутствует. Древние морены отделены от современных хорошо заметным усту-

пом и опознаются на АФС по более темному тону изображения, обусловленному зарастанием морен альпийскими лугами.

В равнинных районах ледниковые отложения связаны с многократным континентальным оледенением и покрывают значительные площади в пределах центральной и северной частей Русской платформы.

Основные морены сложены моренными отложениями различного возраста и представлены валунными суглинками, валунными супесями, валунно-галечниковыми и валунно-песчаными накоплениями.

Наиболее четко дешифрируются основные морены позднечетвертичного возраста в пределах развития калининского и осташковского оледенений.

Для валунно-галечниковых и валунно-песчаных отложений характерен друмлинный и грядово-холмистый рельеф с многочисленными озерами и заболоченными понижениями, а также наличие лесов (боры лишайниковые, воронично-лишайниковые). Рисунок изображения на АФС — полосчатый с узкими вытянутыми полосами гряд различной длины, выделяющихся по светлоте и светло-серому тону, и узкими заболоченными понижениями более темного тона.

Валунные суглинки и валунные супеси основной морены обычно образуют плоские волнистые и полого-холмистые равнины с незначительным эрозионным расчленением, сильно распаханые и покрытые фрагментами елово-мелколиственных и мелколиственных лесов. Местами встречаются переходные болота. На АФС изображение такой морены мелко- и среднемозаичное, преимущественно серого тона с неоднородной структурой на участках пашен, темно-серого тона зернистой структуры залесенных участков и пятен болот светло-серого тона. По краям пятен отчетливо выделяются «огрехи» — нераспаханые участки и собранные в кучу валуны.

Основная морена преимущественно глинистого состава, перекрытая с поверхности покровными безвалунными суглинками, встречается в пределах московского оледенения. Ледниковый рельеф здесь выположенный с ложбинами стока. Покровные суглинки основной морены обычно отличаются мозаичным изображением с нечеткой пятнистой и полосчатой структурой серого и темно-серого тона, образованной за счет потяжин плоскостного смыва и начальных стадий суффозионно-просадочных явлений.

Основная морена днепровского оледенения перекрыта почти на всей площади флювиогляциальными и лёссовидными отложениями, поэтому дешифрирование ее на АФС затруднено.

Конечные морены отличаются более пестрым составом отложений — валунники, гравийно-галечниковые отложения, пески, валунные супеси и глины. Они образуют характерный грядово-холмистый рельеф, оконтуренный с внешней стороны флювиогляциальной равниной, а с внутренней — основной

мореной. Холмы крупные, куполовидные с плоской вершиной. Гряды с узкими водоразделами и крутыми склонами. Межгрядовые понижения заняты лентами озер и болот.

Изображение конечных морен на АФС крупнопятнистое и извилисто-полосчатое, преимущественно светлого и светло-серого тона, с однородной структурой на участках пашен и серыми и темно-серыми лентами болот и озер.

Флювиогляциальные отложения непосредственно примыкают к краю конечных морен, образуя зандровые поля, или формируют высокие террасы долин рек, а также грядообразные возвышенности — озы.

В горных районах флювиогляциальные отложения состоят из валунно-галечникового материала с большим количеством мелкозема. В равнинных районах они представлены в основном песками.

Зандровые поля имеют плоский выровненный рельеф со слабым эрозионным расчленением в виде ложбин стока. На поверхности местами наблюдаются следы развевания песков и золовые формы аккумуляции. Гидрографическая сеть редкая. В ложбинах стока располагаются болота верхового и переходного типов. Долинные зандры слагают высокие террасы в долинах рек.

Характер растительного покрова в пределах зандров определяется высотными и климатическими факторами. В горных районах они, как правило, покрыты альпийскими лугами, что придает их изображению однородный серый тон. В равнинных районах зандры почти сплошь покрыты лесным покровом с преобладанием сосновых боров: беломошников, брусничников, вересчатников, зеленомошников и долгомошников. Поэтому на АФС рисунок зандровых полей неясномозаичный с характерной зернистой структурой преимущественно серого тона, обусловленной пространственным чередованием лесов различного типа. Местами выделяются небольшие однородные светлые пятна правильной геометрической формы (пашни) и светлые линии (грунтовые дороги, разъезженные по ширине).

Озы сложены в основном песчаными и песчано-гравийными отложениями, иногда с включением валунов. Они образуют узкие, ветвистые гряды с крутыми склонами, часто ограниченные ложбинами стока, которые заняты озерами и болотами. Вершины гряд покрыты разреженными сосновыми лесами — беломошниками, брусничниками, а склоны — черничниками.

При стереоскопическом изучении АФС озы четко отделяются от межгрядовых понижений и имеют характерный извилисто-полосный рисунок изображения зернистой структуры серого тона со светлыми пятнами полей.

Озерно-ледниковые отложения, представленные ленточными глинами, реже песками и супесями, занимают обширные пространства озерных впадин с плоским рельефом, покрытые сосновыми, сосново-еловыми и мелколиственными лесами с зарастаю-

щими озерами и болотами низинного типа. Озерно-ледниковые отложения уверенно дешифрируются на АФС по сложномозаичному изображению лесов, болот и озер, наличию торфоразработок и элементов осушительной сети.

Морские отложения представлены преимущественно разнозернистыми песками и супесями. Они приурочены к современным берегам морских бассейнов и опознаются по наличию береговых валов, дюн, откосов, кос и пляжей. На снимках морские отложения отображаются светлыми прямолинейными и слабоизвилистыми полосами или отдельными пятнами на однородном фоне.

Лёссовые отложения, представленные тяжелыми, средними и легкими суглинками с макропористой структурой, наличием карбонатов и гипса, широко распространены на Русской равнине, в Западной Сибири, Средней Азии и других районах. Они занимают обширные степные пространства, сильно распаханное и занятое под сельскохозяйственные угодья.

Отличительной особенностью этих отложений на АФС является характерный мелкопятнистый рисунок, обусловленный наличием просадочных блюдечек и западин. Тон изображения преимущественно серый. В местах, где мощность лёссовых отложений невелика, на аэрофотоизображении наблюдается явление «просвечивания» кровли подстилающих пород, подчеркиваемое различным характером эрозионного расчленения в зависимости от их литологических типов.

Изучение дочетвертичных пород

При дешифрировании дочетвертичных пород ведущую роль играют геометрические особенности геологических образований, форма геологических тел, их плановая конфигурация, слоистость и т. д. Не менее важное значение имеют тональные и структурные особенности фотоизображения. Ландшафто-индикационный подход к дешифрированию дочетвертичных пород применим лишь в тех случаях, когда особенности геологического строения находят отражение в рельефе и влияют на характер мезо- и макрорельефа и рисунок гидрографической сети. При дешифрировании коренных пород индикационную роль играют главным образом элементы геоструктуры и геоморфологические особенности, а также рисунок гидрографической сети.

Рисунки, создаваемые геологическими образованиями, связаны со слоистостью, контактами различных комплексов пород и тектоническими структурами. Во многих случаях они являются основными дешифровочными признаками и даже более информативны, чем тональные особенности фотоизображения. Так, например, параллельная и субпараллельная полосчатость структуры изображения, обусловленная слоистостью горных пород, представляет собой надежный дешифровочный признак осадочных образований; решетчатость и полигональность струк-

туры фотонизображения, обусловленная густой системой трещиноватости пород, индицирует комплексы изверженных и метаморфических пород, в которых тектоническая трещиноватость отражает их сланцеватость и сильную раздробленность. Конфигурация геологических образований (форма и размеры) во многих случаях также может указывать на природу интрузивных тел и форму их залегания. Наиболее неустойчивым из дешифровочных признаков является фототон, который может зависеть как от особенностей фотосъемки, так и от характера проективного покрытия поверхности растительностью.

На АФС возможно выделение крупных стратиграфо-генетических комплексов пород главным образом благодаря их структурному контролю. Структурные признаки, отражающие различный характер дислоцированности пород, позволяют индицировать их устойчивость по отношению к выветриванию, что является одним из показателей их петрографического состава. Определенную роль играют геометрические признаки геологических образований, рассмотренные выше. Анализ этих признаков позволяет определять типы интрузивных тел, лавовые покровы, потоки и т. п.

Наиболее информативны в отношении дешифрирования коренных пород комплексы экзогенного морфогенеза и гидрографическая сеть. Экзогенные формы рельефа позволяют индицировать литологические разности в пределах крупных стратиграфических подразделений. Так, например, отчетливо дешифрирующиеся карстовые формы являются надежным признаком карбонатных пород. Причем, осуществив типизацию морфологии карстовых форм, можно определять преобладание в разрезе сульфатных, карбонатных или гипсовых разностей.

Рисунок гидрографической сети, находящийся довольно отчетливое отображение на АФС, также определяет основные литологические разности. Например, гидросеть, характеризующаяся наличием резких коленообразных и угловатых изломов, является индикатором карбонатных пород. Древовидный рисунок индицирует глинистые породы, радиально расходящийся — лавовые покровы, соляные купола и т. д. На АФС определенную роль играет растительный покров. Например, в гумидной зоне смена типов лесов указывает на изменение литологического состава пород. В аридных районах смена комплексов пелитофитов на псаммофиты отражает изменения в литологическом составе — от глинистых пород к песчаным.

По характеру изображения можно выделить две группы осадочных пород: несцементированные и сцементированные.

Несцементированные породы в целом характеризуются более сглаженными формами рельефа. Среди них различаются глинистые, песчаные и песчано-галечниковые отложения.

Глинистые породы благодаря небольшой плотности легко размываются, образуя хорошо заметный дендритовидный рису-

нок эрозионной сети. Фототон изображения серый и темно-серый, иногда неоднородный.

Песчаные и песчано-галечниковые породы отличаются более светлым и однородным фототонном по сравнению с глинами, за исключением участков, занятых растительным покровом. Эрозионная сеть развита слабо, а формы рельефа имеют мягкие очертания.

Сцементированные осадочные породы характеризуются более резкими формами по сравнению с несцементированными. На характер рельефа сцементированных пород существенное влияние оказывают условия их залегания. При горизонтальном залегании они образуют пластообразные формы рельефа, при наклонном залегании пластов неоднородного состава — пилообразные формы, а при вертикальном залегании пластов — барьерные выступы. Все эти особенности проявляются на АФС. Среди сцементированных осадочных пород выделяются карбонатно-сульфатные, обломочные и пелитовые разности.

Карбонатно-сульфатные породы (известняки, доломиты) отличаются светлыми тонами изображения, наличием островершинных или массивных форм и развитием карста и трещиноватости.

Обломочные сцементированные породы (песчаники и конгломераты) отличаются от предыдущих по отсутствию карста и более сильному расчленению рельефа. Фототон изменяется в широких пределах от светло- и до темно-серого.

Пелитовые породы (глинистые сланцы, аргиллиты, тонкослоистые мергели) обычно менее устойчивы к разрушению по сравнению с конгломератами, песчаниками и известняками. Поэтому в случае переслаивания с более крепкими породами они образуют пониженные части рельефа, к которым часто приспосабливается речная сеть.

Магматические породы характеризуются отсутствием слоистости, массивным характером рельефа, менее значительным расчленением поверхности. На АФС они различаются по характерному решетчатому, дендритообразному или перистому рисунку, разнообразному фототону с преобладанием серого или темно-серого.

Среди вулканических пород отчетливо дешифрируются молодые кайнозойские вулканы, слабо затронутые выветриванием и тектоническими изменениями. Они выделяются вулканическими постройками, лавовыми потоками и покровами, образующими ровные наклонные площадки, расчлененные каньонообразными долинами рек. Тон изображения вулканогенных толщ преимущественно темно-серый.

Метаморфические породы опознаются по обилию различно ориентированных линеаментов, отражающих сланцеватость, слоистость и наличие разрывных нарушений, и темному фототону. В условиях значительной обнаженности мета-

морфические породы имеют сетчатый рисунок изображения. Среди этих пород по светлому тону изображения и массивным формам рельефа выделяются кварциты и мраморы.

На рис. 5 приведен пример дешифрирования различных литологических типов пород в горных районах по материалам среднемасштабной аэрофотосъемки.



Рис. 5. Дешифрирование различных литологических типов пород в горном районе:

1 — граниты разнозернистые; 2 — осыпи-потоки; 3 — осыпи-шлейфы; 4 — моренные отложения; 5 — обально-осыпные глыбовые отложения; 6 — флювиогляциальные отложения; 7 — современные аллювиальные отложения

Изверженные породы, представленные разнозернистыми гранитами, слагают узкие остроугольные водоразделы и крутые скалистые склоны. Граниты отчетливо выделяются по светло-серому и серому перистому и линейно-дендритовидному изображению, образованному системой трещин и эрозионных ложбин.

В крупных эрозионных ложбинах и у подножий склонов формируются осыпные отложения глыбово-щебнистого состава в виде осыпей-потоков и осыпей-шлейфов. Днище широкой троговой долины выполнено ледниковыми моренными отложениями глыбово-щебнистого состава с супесчаным и песчаным заполнителем и наличием погребенного льда. На АФС морена хорошо опознается по дугообразно-полосчатому рисунку серого фототона с точечной и пятнистой структурой отдельных глыб и термокарстовых воронок. Выровненная площадка на поверхности морены, имеющая однородный темно-серый тон изображения, занята флювиогляциальными отложениями валунно-галечникового состава с глинисто-щебнистым заполнителем. В основании уступов морен формируются обвально-осыпные глыбовые накопления, имеющие характерную точечную, зернистую и мелкопятнистую структуру изображения. Современные аллювиальные гравийно-галечниковые отложения различаются по очень светлой извилистой полосе русла.

6.3. ВИЗУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОРОДАХ

Визуальные полевые методы изучения минерального состава и органического вещества в породах в зависимости от типа грунта разделяются на две группы: методы изучения минерального состава и органического вещества в дисперсных породах; методы изучения минерального состава пород с жесткими связями.

Изучение минерального состава дисперсных грунтов

В зависимости от типа грунтов визуальные методы подразделяются на методы изучения крупнообломочных, песчаных и глинистых грунтов.

Изучение минерального состава крупнообломочных грунтов. Поскольку составные части крупнообломочных грунтов представляют собой обломки скальных грунтов, визуальное изучение их минерального состава производится теми же методами, какими изучается минеральный состав грунтов с жесткими связями, описанными ниже.

Изучение минерального состава песчаных грунтов. Минеральный состав песков определяется в полевых условиях с помощью лупы, что дает возможность рассмотреть отдельные песчаные зерна и определить, из каких минералов состоят частицы песка.

Породообразующими минералами песков являются кварц, полевые шпаты, слюды, обломки горных пород и глауконит.

В зависимости от состава обломочных зерен выделяются мономинеральные (содержание одного минерала более 80 %), биминеральные (содержание двух минералов более 80 %), триминеральные (содержание трех минералов более 80 %) и поли-

минеральные (содержание каждого из пяти—деяти минералов более 10 %) пески. К мономинеральным относятся широко распространенные кварцевые и реже встречающиеся полевошпатовые и глауконитовые пески; к биминеральным — кварцево-полевошпатовые, полевошпатово-кварцевые, глауконито-кварцевые и другие разновидности. Полиминеральные пески содержат в качестве породообразующих компонентов кварц, слюду и полевые шпаты, глауконит и т. д. Полиминеральные пески получают видовое название в зависимости от содержания этих минералов.

Кварц образует зерна изометричного, часто округлого или угловатого габитуса со стекляннм и реже жирным блеском. Наряду с прозрачными бесцветными зернами встречаются и белые молочные разновидности кварца. Для минерала характерны отсутствие спайности и раковистый излом. Твердость минерала 7, его зерна легко царапают стекло.

Группа полевых шпатов по своей распространенности занимает второе место после кварца. Зерна полевых шпатов присутствуют во всех песчаных породах. Из полевых шпатов в песчаных породах встречаются главным образом кислые плагиоклазы и калиевые полевые шпаты, чаще всего микроклин и ортоклаз. Зерна полевых шпатов имеют неправильную, угловатую, таблитчатую, призматическую и реже окатанную форму. Полевые шпаты обладают совершенной и ясной спайностью по плоскостям, пересекающимся под углом, равным или близким 90°. Цвет белый, бледно-желтый, розовый, иногда бурый или мясо-красный, редко зеленый. Черта минерала бесцветная. Блеск стекляннй, на плоскостях спайности часто перламутровый. Твердость 6—6,5 (царапает стекло). Минерал имеет неровный излом. Наиболее важными диагностическими признаками полевого шпата являются спайность, характер блеска и цвет минерала.

Глауконит чаще всего встречается в форме более или менее округлых зерен различного размера (от десятых долей миллиметра до двух миллиметров). Цвет глауконита меняется от темно-зеленого (почти черного) до светло-зеленого.

Изучение минерального состава глинистых грунтов. Глинистые минералы являются наиболее активной частью глинистых грунтов, в значительной мере определяющей и их инженерно-геологические свойства.

Изучение минерального состава глинистой фракции в полевых условиях представляет значительные трудности, вызванные специфическими особенностями глинистых минералов, весьма малыми размерами частиц, несовершенством кристаллической решетки этих минералов, изоморфными замещениями внутри кристаллической решетки и т. д.

Глинистые грунты делятся на мономинеральные (содержание одного минерала 90—100 %), биминеральные (содержание двух минералов 90—100 %), триминеральные (содержание трех

минералов 90—100 %, каждый не менее 15 %) и полиминеральные. В природных условиях в основном встречаются полиминеральные глины. Среди мономинеральных глин наибольшее распространение имеют каолиновые, гидрослюдистые, монтмориллонитовые (бентонитовые) и палыгорскитовые, обладающие достаточно выраженными морфологическими особенностями.

К каолиновым глинам относятся первичные и вторичные (перемытые) каолины. В первичных каолинах часто наблюдаются крупные «вермикулитоподобные», или «воротничковые», агрегаты и отдельные кристаллы каолинита. Такие каолины представляют собой жирные на ощупь, пористые глины белого и серовато-буровато-белого цвета. При растирании глин пальцами всегда обнаруживаются песчинки кварца.

Вторичные каолины образуются в результате перемыыва первичных каолинов. В минеральном составе этих глин преобладает каолинит, имеются небольшие примеси гидрослюды. Вторичные каолины представляют собой плотные, жирные на ощупь глины, окрашенные в серовато-белые и серые тона. При растирании пальцами обломочной примеси не обнаруживается. Глина, замешанная с водой, дает вязкое тесто и раскатывается в тонкую нить.

Отдельности каолинов имеют неправильную комковатую или кусковатую форму и гладкий, чешуйчатый, иногда глянцеваый излом. Твердость каолинита по шкале Мооса 2,0—2,5.

Главные породообразующие минералы в гидрослюдистых глинах — гидрослюды, в том числе и глауконит. Гидрослюдистые глины представляют собой достаточно плотные грунты серого, темно-серого, белого, буровато-серого, зеленого и пестрых тонов; имеют землистое сложение.

Форма отдельностей гидрослюдистых глин неправильная, кусковатая, плитчатая, комковатая; излом шероховатый, чешуйчатый, неровный, реже гладкий. Твердость гидрослюды по шкале Мооса 1—2.

Монтмориллонитовые глины обладают способностью быстро и сильно разбухать в воде. По внешнему виду они напоминают воск, жирны на ощупь, светлого, серовато-белого, зеленоватого и желтоватого тона, отличаются от других глин высокой пластичностью, способностью набухать в воде. В сухом состоянии монтмориллонитовые глины имеют раковистый излом, очень тверды и плохо растираются, распадаются на мелкие остроугольно-комковатые отдельности. Твердость монтмориллонита по шкале Мооса 1—2.

Палыгорскитовые глины имеют характерное спутанно-волокнистое строение и малую объемную массу (в сухом состоянии образец плавает в воде). При ударе сухой палыгорскит издает глухой («картонный») звук. Цвет белый, желтоватый или серый.

Главными породообразующими минералами полиминеральных глин являются каолинит, монтмориллонит, гидрослюда,

кварц, слюда. Обычно в них одновременно присутствуют два-три глинистых минерала и довольно часто встречаются смешанно-слоистые образования.

Второстепенные минералы — глауконит и хлориты. Содержание тех или иных глинистых минералов по-разному сказывается на свойствах полиминеральных глин. Если увеличение или уменьшение содержания каолинита и гидрослюд незначительно влияет на изменение физико-механических свойств этих глин, то изменение содержания монтмориллонита повлечет резкое изменение таких свойств глин, как, например, пластичность, набухаемость, липкость и т. д.

Морфологические особенности полиминеральных глин весьма разнообразны. Обычно это связные, пористые грунты, окрашенные в светло-бурые, бурые, коричневые, серые, темно-серые и зеленоватые тона. В зависимости от влажности, гранулометрического и минерального состава они обладают различной твердостью и пластичностью.

Среди полевых методов изучения глинистых грунтов выделяется большая группа косвенных методов определения минерального состава по характеру взаимодействия глин с водой (при изучении размокания и набухания грунта, впитывания грунтом жидкости и усыхания его).

Метод, основанный на изучении размокания грунта. Диагностика глинистых минералов при размокании грунта основана на том, что образцы грунтов различного минерального состава, помещенные в воду на 24 ч, ведут себя по-разному. Так, например, кусочек каолиновой глины в воде быстро распадается, образуя небольшой конус. Монтмориллонитовые, сильно разбухающие глины (Na-монтмориллонит), размокая, набухают и длительное время сохраняют форму. Самонтмориллонитовые, слабо разбухающие глины почти не размокают в воде. Гидрослюдистые глины обычно не разбухают в воде, они распадаются на комочки, мелкие чешуйки и пластинки, образующие пологий конус.

Метод, основанный на изучении набухания грунта. Б. М. Гуменским был предложен следующий метод: 2 см³ воздушно-сухого грунта, просеянного через сито с диаметром отверстий в 1 мм, помещается в мензурку объемом 10 см³ и слегка уплотняется; в мензурку доливают дистиллированную воду и растирают грунт до исчезновения мазков. После этого добавляют 1 см³ 5,5 %-ного раствора CaCl₂ для коагуляции глинистых частиц и через 5—6 ч измеряют объем осадка. Увеличение объема набухшего образца по сравнению с начальным для глин различного минерального состава распределяется следующим образом: каолинит увеличивается в 3 раза, гидрослюда — в 9 раз, монтмориллонит — до 40 раз.

Метод, основанный на изучении впитывания грунтом жидкости. Впитывание определенного количества воды (или электролита) воздушно-сухими образцами грун-

тов разного минерального состава происходит с разной скоростью. На этом различии в скорости впитывания воды или этиленгликоля и происходящих при этом явлениях основан метод Иржи Конта.

В силу различий в размерах и пластичности естественных неуплотненных глинистых образований между отдельными их кристаллами возникают разные по величине субмикроскопические промежутки, от которых зависит скорость впитывания жидкости. Кроме того, эта скорость связана со свойствами самой жидкости. Поверхность аншлифа глинистого грунта ведет себя, как сито различной тонкости. В зависимости от типа этого природного сита изменяются скорость впитывания жидкости, форма и профиль капли, а также характер поверхности впитывания.

Метод Иржи Конта позволяет определить принадлежность глинистых минералов к одной из четырех групп: каолинита, монтмориллонита, гидрослюд, сепиолита-пальгорскита. Для большей точности применяют метод, где наряду с водой используется этиленгликоль — вязкая жидкость, молекулы которой имеют относительно большие размеры.

Анализ по методу Иржи Конта проводится в следующей последовательности. Два образца глинистого грунта размером $2 \times 2 \times 1$ см высушивают на воздухе и шлифуют параллельно напластованию на трех стеклянных пластинах с шероховатой поверхностью. На поверхность аншлифов, предварительно очищенную кисточкой, пипеткой наносят одну каплю дистиллированной (в полевых условиях — чистой пресной) воды (первый образец); на поверхность второго аншлифа — этиленгликоль при температуре $15-18^\circ\text{C}$ примерно с высоты $4-6$ мм. В зависимости от скорости просачивания, формы и профиля капли, а также характера поверхности после просачивания определяют минеральный состав исследуемого грунта (рис. 6).

Метод, основанный на изучении усыхания грунта. Этот метод базируется на опытных наблюдениях за высыханием грунтовой пасты, равномерно распределенной слоем толщиной в 1 см по дну фарфоровой чашки. При высыхании каолиновых глин образуется тонкая разорванная пленка. Глинистая фракция Na-монтмориллонитовых глин при высыхании сильно уменьшается в объеме, дает широкие расходящиеся трещины, достигающие дна чашки; образующиеся полигональные пластинки загибаются по краям и скручиваются. При высыхании Ca-монтмориллонитовых глин образуется гладкая поверхность с несколькими трещинами.

Метод органических красителей. В основу этого метода положена способность органических красителей адсорбироваться на поверхности глинистых частиц, окрашивать минералы и менять свой цвет и спектр поглощения в зависимости от условий (рН раствора, влияния других растворов, концентрации раствора красителя и т. п.), в которых они адсорбиру-

ваны на глинистых частицах. Для окрашивания глинистых минералов применяется главным образом метиленовый голубой краситель, изменяющий свою окраску в широком диапазоне длин волн. При изучении глин методом окрашивания без замеров спектров поглощения оценка цвета дается визуально по десятибалльной шкале. Однако Л. И. Кульчицким было показано, что окраска метиленового голубого, адсорбированного на глинистых минералах, регистрируемая как визуально, так и

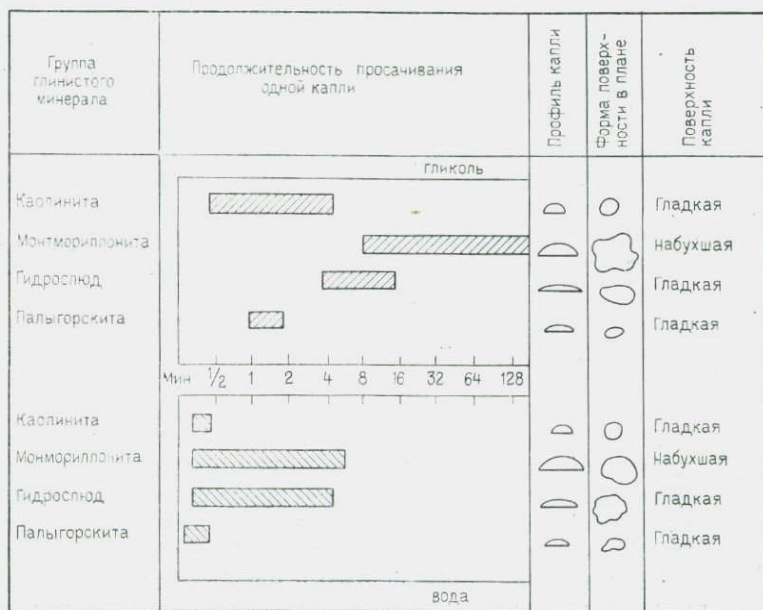


Рис. 6. Определение групп минералов с помощью метода Иржи Конта

спектрофотометрически, не может быть практически использована ни для количественного, ни для качественного минерального анализа. Метод органических красителей позволяет судить лишь об изменении величины сорбционной емкости, которая является функцией как минерального, так и гранулометрического состава. В связи с этим было предложено использовать метод красителей для условного разделения глинистой толщи на слои с одинаковой величиной сорбционной емкости. При этом с помощью графика зависимости значений сорбционной емкости от глубины (по разрезу) можно ориентировочно намечать границы изменения минерального состава глинистых грунтов, а также констатировать наличие глинистых минералов с повышенной (монтмориллонитовая группа) или пониженной (каолинитовая группа) сорбционной емкостью.

С целью количественной оценки изменчивости минерального состава по разрезу С. Д. Филимоновым была разработана методика косвенной оценки минерального состава глинистых грунтов по величине их гидрофильности. Ввиду того что гидрофильность зависит как от минерального, так и от гранулометрического состава, был предложен новый показатель, практически не зависящий от гранулометрического состава глинистых грунтов, — степень приведенной гидрофильности $K_{гп}$.

Методика определения этого показателя в полевых условиях сводится к следующему. В мензурку объемом 100 см^3 насыпают 5 см^3 порошка воздушно-сухого грунта, слегка уплотняя его резиновой палочкой. Затем в мензурку до 100 см^3 доливают дистиллированную (или кипяченую) воду и растирают грунт до исчезновения мазков на стенках. После отстаивания в течение суток определяют объем набухшего грунта и рассчитывают степень общей гидрофильности $K_{го}$ по формуле $K_{го} = (V_1 - V_0) / V_0$ (где V_1 — объем набухшего грунта; V_0 — начальный объем грунта). По специально разработанной номограмме (рис. 7), зная петрографический тип (содержание глинистых частиц) грунта, определяют степень приведенной гидрофильности $K_{гп}$ следующим образом. Из середины интервала, соответствующего данному петрографическому типу грунта, параллельно оси ординат проводят отрезок, равный $K_{го}$. Из него вычитают отрезок, находящийся между осью абсцисс и прямой $K_{гг}$, которая проведена по результатам определения величины набухания Са-каолинита и соответственно отсекает участок, где величина набухания будет определяться только гранулометрической составляющей. Полученная разность и является степенью приведенной гидрофильности $K_{гп} = K_{го} - K_{гг}$.

Определение степени приведенной гидрофильности можно упростить (если известен только петрографический тип), принимая значение коэффициента $K_{гг}$ равным: для суглинков 0,25; для глин 0,50 и для тяжелых глин 0,75.

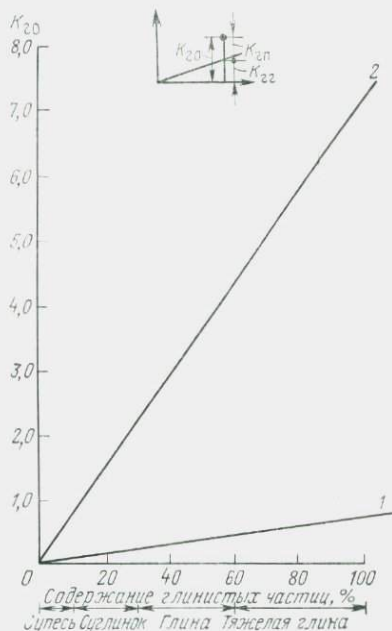


Рис. 7. Номограмма для определения степени приведенной гидрофильности ($K_{гп}$):

1 — минимальные значения $K_{го} - K_{гг}$; 2 — максимальные значения $K_{го}$

По величине показателя $K_{гп}$ все глинистые грунты делятся на четыре категории: слабогидрофильные ($K_{гп} < 1$), среднегидрофильные ($1 < K_{гп} < 1,75$), сильногидрофильные ($1,75 < K_{гп} < 3,5$) и очень сильно гидрофильные ($K_{гп} > 3,5$). Использование изложенной методики позволяет разделять толщи глинистых грунтов на слои, обладающие примерно одинаковой активностью (характеризующей минеральный состав) по отношению к воде.

Изучение органического вещества в дисперсных грунтах

Органические вещества в дисперсных грунтах могут содержаться в трех формах: 1) неразложившиеся остатки растений и организмов; 2) разложившиеся растительные и животные остатки в виде гумуса; 3) растительные остатки, разложившиеся в условиях анаэробного разложения, — торфа.

Содержание неразложившихся остатков определяется визуально при полевом описании разреза или образца грунта. Такие остатки, как правило, встречаются на поверхности почвы и в ее верхних горизонтах. Это дернина — отличающийся значительной связностью верхний слой почвы, густо пронизанный переплетенными живыми и отмершими корнями, побегами; оес — слой живых мхов и непосредственно залегающий под ним слой мохового войлока, отмерших нижних частей мхов, еще не затронутых процессами оторфованья. Верхний слой почв может состоять из неразложившегося опада деревьев (прошлогодней листвы, хвои). При описании неразложившихся растительных остатков указывается принадлежность их к той или иной группе растений: водоросли, грибницы, лишайники, мхи, корни травянистых растений, деревьев и кустарников. Указывается величина их массы в соотношении с вмещающим объемом (массовая или объемная доля в процентах).

Биохимический процесс разложения растительных остатков — гумификация превращает их в специфические вещества — гуминовые кислоты, фульвокислоты и гумины, совокупность которых называется гумусом. В полевых условиях оцениваются цвет и мощность гумусового горизонта, по которым можно визуально оценить содержание гумуса. Гумус может встречаться в виде гумуса «модер», состоящего из значительно, но не полностью гумифицированных, разложившихся и фрагментированных растительных остатков, окрашенных преимущественно в желтые (до буро-коричневых) тона, и гумуса «мулл», состоящего из высокодисперсных органических веществ от светло-бурой до темно-бурой, почти черной окраски, образующих гомогенную массу с минеральной частью грунта.

Вследствие замедленной гумификации происходят погребение и накопление растительных остатков в условиях анаэробного разложения и образование торфа. К основным характеристикам торфа относятся степень разложения, ботанический состав и золь-

ность. Для инженеров-геологов в основном представляют интерес степень разложения и зольность.

Под истинной степенью разложения торфа понимается количество растительных остатков, претерпевших в процессе торфообразования глубокое превращение своего вещества, благодаря чему они стали отчасти гумусом, лигнином, битумом, органическими кислотами и их солями и другими веществами. Под степенью разложения торфа обычно понимают процентное отношение гумуса к общей массе конкретного образца торфа, которое определяется в основном в лабораторных условиях.

А. И. Сергеевым в 1974 г. была предложена следующая полевая классификация видов торфа в зависимости от степени разложения.

Степень разложения 5—20 %. Торф от светло-желтого до светло-коричневого цвета при сжатии в руке сквозь пальцы не продавливается, непластичный. Обладает заметно выраженной упругостью. Отжимаемая вода почти не окрашена.

Степень разложения 20—30 %. Торф от светло-коричневого до коричневого цвета. При сжатии в руке слегка продавливается между пальцами, слабопластичный. Отжимаемая вода мутная, коричневого цвета.

Степень разложения 30—40 %. Торф от коричневого до темно-коричневого цвета. При сжатии в руке продавливается между пальцами, пачкая руки; пластичный. Вода отжимается слабо и имеет коричневый цвет с большим количеством взвешенных частиц.

Степень разложения >40 %. Торф от темно-коричневого до черного цвета. При сжатии в руке масса торфа хорошо продавливается между пальцами; высокопластичный. Хорошо катается в шнур любой толщины. Вода не отжимается.

Под зольностью торфа понимают содержание золы в сухом органическом остатке, выражаемое в процентах. Определение зольности торфа проводят, как правило, в лабораторных условиях.

Изучение минерального состава пород с жесткими связями

При полевых инженерно-геологических исследованиях пород с жесткими связями визуально или с помощью лупы определяется их состав с установлением основных породообразующих минералов и их процентного содержания, второстепенных и вторичных минералов. При определении минерального состава используют главнейшие физические свойства, которые имеют наибольшее диагностическое значение. К ним относятся следующие: морфологические (облик кристаллов, двойники, штриховатости граней); оптические (цвет минералов, прозрачность, цветная иризация, двупреломление, цвет черты, блеск); механические (спайность, излом, твердость, хрупкость, ковкость, упругость), а также физические — магнитные и электрические. Кроме того, учитываются такие специфические свойства, как вкус, запах, ощущение при прикосновении и др. Для ряда минералов класса карбонатов ведущим диагностическим признаком является химический, т. е. реакция с кислотами.

Форма кристаллов. По форме кристаллов различаются следующие основные типы: 1) изометрические — одинаково развитые во всех трех направлениях в пространстве (например, ромбододекаэдры граната, октаэдры магнетита, кубы пирита и т. д.); 2) формы, вытянутые в одном направлении, т. е. призматические, столбчатые, шестоватые, игольчатые, волокнистые (например, кристаллы аквамарина, турмалина и др.); 3) формы, вытянутые в двух направлениях при сохранении третьего короткого, т. е. таблитчатые, пластинчатые, листоватые и чешуйчатые кристаллы (например, кристаллы слюды, хлорита). Широко распространена и переходная между этими типами форма. Хотя далеко не все минералы легко распознаются по форме их кристаллов, для ряда минералов она является важнейшим диагностическим признаком.

Двойники. Среди минералов широко распространены двойники. Эти агрегаты часто можно распознать по входящим углам у кристаллов. Существует ряд простых и сложных двойников. Так, у полевых шпатов карлсбадские двойники представляют собой простые двойники срастания. Другой формой двойников являются двойники прорастания. У авгита из базальтов наблюдаются крестообразные двойники.

Цвет минералов. Различаются минералы цветные, бесцветные и окрашенные примесями.

Прозрачность. Многие минералы прозрачны, например кварц, горный хрусталь, кристаллический гипс, кальцит. Другие минералы могут быть мутными, просвечивающими и, наконец, непрозрачными.

Блеск минералов. Блеск минералов также относится к важнейшим диагностическим признакам. Практически общепринятыми являются следующие градации интенсивности блеска у минералов: 1) стеклянный — кварц на поверхности граней, полевой шпат, кальцит, берилл; 2) алмазный — алмаз, сфалерит; 3) жирный — кварц на поверхности излома, нефелин, сера; 4) матовый — полевые шпаты, каолинит; 5) металлический — пирит, халькопирит, галенит; 6) перламутровый — слюда, опал, гипс; 7) шелковистый — асбест, халцедон.

Спайность и излом. Эти характеристики служат одним из важных диагностических признаков, помогающих определять минералы. На практике важно различать степени совершенства проявления спайности. С этих позиций принято выделять спайность: 1) весьма совершенную — слюды, хлорит; 2) совершенную — кальцит, каменная соль; 3) среднюю — полевые шпаты, роговая обманка; 4) несовершенную — оливин, апатит, самородная сера; 5) весьма несовершенную — корунд, магнетит. Все минералы, в названии которых входит слово «шпат», обнаруживают более или менее совершенную спайность.

При раскалывании минералов, лишенных спайности или обладающих несовершенной спайностью, возникают незакономерные поверхности излома, которые по внешнему виду определя-

ются как раковистый, неровный, ровный, занозистый, шероховатый, землистый и др.

Твердость. Твердость минералов является одним из важнейших диагностических признаков. Она определяется по шкале Мооса. В практике используется следующее деление: минералы с твердостью 1—2 царапаются ногтем, от 3 до 5 — острием ножа; минералами с твердостью от 6 до 7 можно царапать стекло, а с твердостью от 8 до 10 — резать его.

Хрупкость и упругость минералов. Минералы при механических воздействиях (раскалывании, царапании, резании) ведут себя по-разному. Считается, что если порошок, образующийся при царапании минерала, разлетается в стороны, то минерал хрупкий (кварц, полевой шпат), а если остается на месте, то минерал мягкий (тальк). Минерал считается ковким, если при его царапании не образуется порошка (самородная медь). Пластичные минералы можно расплющить молотком (золото, серебро), а упругие после снятия нагрузки возвращаются в первоначальное состояние.

Реакция с кислотами характерна для всех минералов класса карбонатов. Однако интенсивность реакции у разных минералов различна, что помогает отличить внешне сходные карбонаты. Наиболее энергично с соляной кислотой реагирует кальцит. Реакция сопровождается выделением углекислого газа, пузырьки которого, появляющиеся на месте реакции, создают впечатление «вскипания» минерала. Доломит реагирует с кислотой менее энергично. В куске доломит с холодной соляной кислотой заметной реакции не дает, реагирует с ней только порошок доломита. Сидерит и магнезит взаимодействуют с соляной кислотой еще слабее и только при нагревании.

По набору перечисленных признаков определяются породообразующие минералы, входящие в состав исследуемых пород. В табл. 8 приведены визуальные признаки основных породообразующих минералов.

Кроме индивидуальных свойств породообразующих минералов, которые определяются по набору перечисленных признаков, существенное значение имеют и количественные соотношения между ними, которые при визуальном изучении определяются весьма ориентировочно. Для облегчения такого определения можно пользоваться сравнением с рисунками-диаграммами, характеризующими относительное количество двух различных составных частей (рис. 8). Например, нам надо определить количество цветного минерала в зернистой горной породе. Для этого сравниваем образец горной породы с диаграммами рис. 8. Если количество цветного минерала является средним между рис. 8, 1, отвечающим 10 %-ному содержанию вкрапленников, и рис. 8, 2 с 25 %-ным содержанием вкрапленников, то количество цветного минерала в горной породе можно определить как 15—20 %.

Визуальные признаки определения

Класс	Минерал	Форма зерен	Цвет	Блеск
Оксиды и гидроксиды	Кварц	Зернистые агрегаты, зерна неправильной формы	Бесцветный, белый, серый	Восковой, слабо жирный
Карбонаты	Кальцит	Кристаллические агрегаты тригональной сингонии	Бесцветный, белый	Стеклообразный, иногда перламутровый
	Доломит	Кристаллические агрегаты	Серый	Стеклообразный
Сульфаты	Ангидрит	Плотные мелкозернистые скопления ромбической сингонии	Белый, слабо окрашенный	Стеклообразный или перламутровый
	Гипс	Плотные мелкокристаллические агрегаты, табличчатые кристаллы	Бесцветный, белый	Стеклообразный, перламутровый, шелковистый
Силикаты	Оливин	Зернистые агрегаты или отдельные кристаллы, ромбической сингонии	Желтовато-зеленый, оливковый, бутылочно-зеленый	Стеклообразный, жирный
	Авгит	Кристаллические агрегаты, кристаллы коротко-столбчатые, моноклинной сингонии	Зелено-черный, черный	Стеклообразный
	Гиперстен	Сингония моноклинная (псевдоромбическая)	Серовато-черный, коричнево-зеленый	Стеклообразный, иногда металлический
	Биотит	Кристаллы моноклинной сингонии	Черный, бурый, зеленоватый	Стеклообразный, местами перламутровый
	Мусковит	То же	Бесцветный с желтым, розовым или серым оттенком	То же

основных породообразующих минералов

Спайность	Твердость по шкале Мооса	Прозрачность	Примечание
Несовершенная, излом раковистый	7	Прозрачный	Самый распространенный породообразующий минерал магматических, метаморфических и осадочных пород
Совершенная в трех направлениях, перпендикулярных к граням ромбоэдра	3	От непрозрачного до прозрачного	Бурно реагирует с соляной кислотой
Совершенная в трех направлениях	3,5—4	Непрозрачный	Слабо реагирует с соляной кислотой
Совершенная в одном направлении и средняя в двух направлениях под углом 90°	3—3,5	»	—
Весьма совершенная в одном направлении, в другом — средняя	2	Прозрачный или просвечивает	—
Средняя или несовершенная	6,5—7	Просвечивающий	Минерал ультраосновных и отчасти основных пород
Средняя или совершенная в двух направлениях под углом 87°	5—6	Непрозрачный	—
Совершенная в двух направлениях под углом 87°	5—6	»	Встречается главным образом в ультраосновных и основных, реже в средних и редко — в кислых породах
Весьма совершенная в одном направлении	2—3	Просвечивает	—
Весьма совершенная в одном направлении	2—3	»	—

Класс	Минерал	Форма зерен	Цвет	Блеск
Силикаты	Хлорит	Плотные кристаллические агрегаты, реже отдельные кристаллы моноклинной сингонии	Зеленый	Стекланный, местами перламутровый
	Каолинит	В виде землистых масс	Белый	Матовый
	Серпентин	Плотная масса	От беловато-зеленого до зеленовато-черного	Стекланный, жирный
	Калиево-натриевые полевые шпаты, ортоклаз	Кристаллы призматические, столбчатые, таблитчатые, частые двойники сростания	Белый, розовый, красно-желтый	Матовый
	Плагиоклаз	Кристаллы триклинной сингонии	Серый и зеленовато-серый	»

Спайность	Твердость по шкале Мооса	Прозрачность	Примечание
Весьма совершенная в одном направлении	2—2,5	Не просвечивает	Образуется при гидротермальных изменениях основных и ультраосновных пород, является породообразующим минералом метаморфических пород
Излом землистый	1	То же	—
Весьма совершенная в одном направлении	2,5—3	»	—
Спайность в двух направлениях под углом 90°, в одном направлении совершенная, в другом — средняя	5,5—6,5	Просвечивают по краю	—
Спайность в двух направлениях под углом 86—87°	5,5—6,5	То же	Образует двойники, которые заметны на плоскостях спайности в виде тонкой штриховки или полосчатости

Горные породы представляют собой закономерные минеральные ассоциации. Они характеризуются более или менее постоянным составом и определенным строением. В основу классификации горных пород положен генетический признак, в соответствии с которым породы делятся на магматические, метаморфические и осадочные сцементированные, характеризующиеся определенной ассоциацией минералов.

Магматические горные породы. Количественный минеральный состав всегда являлся основой для классификации магматических изверженных горных пород. На сегодняшний день результаты количественно-минералогических исследований А. Йохансена, П. Ниггли, Б. М. Котулаского, С. Шэнда, А. Н. Заварицкого, А. Штрекайзена, К. Смуликовского и многих других петрографов находят все большее применение в геологической практике.

По химическому составу, а именно по содержанию окиси кремния (кремнезема SiO_2) магматические породы условно делятся на четыре группы: кислые ($\text{SiO}_2 > 65\%$), средние ($\text{SiO}_2 = 65-50\%$), основные ($\text{SiO}_2 = 52-40\%$) и ультраосновные ($\text{SiO}_2 < 40\%$). При макроскопическом описании можно полу-

чить достаточно точное представление о химическом составе породы, определив ее минеральный состав.

Характерным признаком, позволяющим судить о составе горных пород, является избыток или недостаток кремнекислоты, выражающийся в присутствии или отсутствии кварца. Так, в кислых горных породах кварц содержится в значительных количествах, в средних и основных — присутствует в незначительных количествах или отсутствует вообще. В ультраосновных породах присутствует оливин, но отсутствует кварц.

Содержание цветных минералов в изверженной горной породе является признаком, который необходимо принимать во внимание при отнесении данной породы к тому или иному типу. При макроскопических исследованиях зернистых горных пород, когда нельзя на глаз определить, какой полевой шпат присутствует в породе, или трудно различить цветные минералы (пироксен или роговая обманка), относительное число цветных минералов часто является решающим признаком. В наиболее распространенных горных породах оно меняется следующим образом (в %): в гранитах до 10, сиенитах до 20, моноцитах 25, диоритах 30—40, габбро 40—50 и более.



Рис. 8. Содержание порфиroidных включений в горной породе (в %):
1 — 10; 2 — 25; 3 — 50; 4 — 75; 5 — 90

Процентное содержание плагиоклаза или полевого шпата также может служить одним из диагностических признаков породы. На рис. 9 показано относительное число главных минералов в важнейших типах изверженных горных пород. По горизонтальной оси расположены типы пород, а по вертикальной — дано процентное содержание основных минералов, которое определяется пересечением с границами областей главных минералов.

В табл. 9 приведены наиболее распространенные интрузивные и эффузивные породы и указан примерный состав поро-

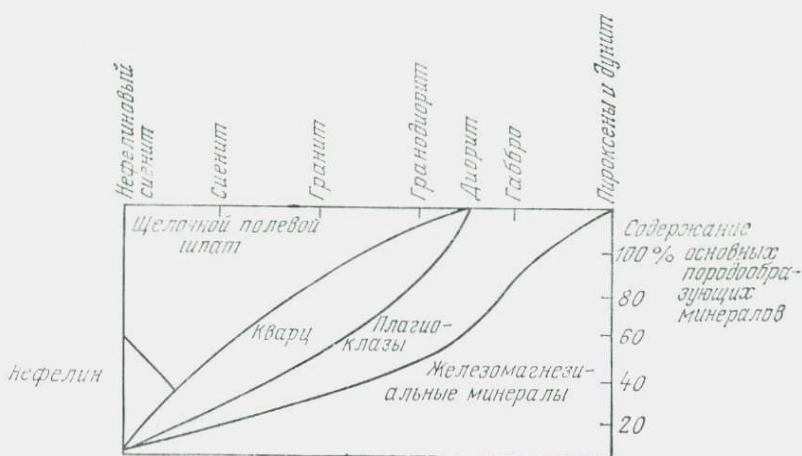


Рис. 9. Диаграмма определения минерального состава основных разновидностей магматических горных пород

образующих минералов. В таблице все породы разделены на четыре группы, соответствующие их кислотности: I — кислые, II — средние, III — основные, IV — ультраосновные. Принадлежность породы к той или иной группе устанавливается по минеральному составу и соотношению светлых и цветных минералов. В случае скрытокристаллической или афанитовой структур определение светлого минерала на глаз сильно усложняется и производится главным образом по цвету основной нераскристаллизовавшейся массы.

Из табл. 9 видно, что минеральный состав магматических пород закономерно изменяется от кислых разностей к ультраосновным за счет уменьшения содержания кварца, а начиная с основных разностей, — практически полного исчезновения его и существенного увеличения темноцветных минералов. Содержание кварца в кислых разностях достигает 35 %, в средних — 10 %, в основных — он практически отсутствует. Количество темноцветных минералов меняется следующим образом (в %): в кислых 10—15, средних 20—30, основных 40—50 и несколько больше.

Метаморфические горные породы также определяются по составу основных породообразующих минералов в соответствии с важнейшими признаками, приведенными в табл. 9. Для них характерна полнокристаллическая структура, которая различается размерами и формой кристаллических зерен. Текстура сланцеватая, полосчатая, гнейсовая. Минеральный состав метаморфических пород изменяется в широких пределах (см. табл. 9). Встречаются мономинеральные разности: кварциты, мраморы, амфиболиты. Для большей части метаморфических пород характерен полиминеральный состав. Так, гнейсы по своему составу близки к интрузивным (кислым и средним) породам. Для группы слюдяных сланцев преобладающими минералами являются кварц, слюды, небольшое количество полевых шпатов. В состав зеленокаменных сланцев входят хлорит, тальк, серпентин, кварц, кальцит.

Осадочные сцементированные горные породы характеризуются большой изменчивостью минерального состава (см. табл. 9). В песчаниках преобладает кварц, который является наиболее устойчивым минералом. В меньшей степени распространены полевые шпаты, слюда, карбонаты. В сцементированных глинистых и пылеватых грунтах — аргиллитах и алевролитах в значительном количестве присутствуют глинистые минералы и в меньшем — кварц, полевые шпаты, слюды, карбонаты; это соотношение минералов является одним из главных признаков определения таких пород. Среди карбонатных пород известняки и доломиты являются мономинеральными породами, представленными минералами того же названия с небольшой примесью терригенного материала. В мергелях наряду с кальцитом, составляющим породы, присутствуют глинистые частицы.

Минеральный состав (основные породообразующие минералы) и свойства основных типов пород

Группы пород	Горная порода	Минеральный состав*	Цвет	Структура	Текстура
<i>Магматические породы</i>					
Кислые	Гранит	Кварц (30—35), калиевый полевой шпат (35—40), кислый плагиоклаз (20—25), биотит, роговая обманка, пироксены	Светлый, светло-серый, розовый	Полнокристаллическая	Массивная
	Липаритовый порфир	То же	Бурый	Афанитовая, порфировая, стекловатая	Флюидальная, миндалекаменная
	Липарит	»	Светло-серый	Полустекловатая	Флюидальная, пузыристая, пористая
	Гранодиорит	Кварц, кислый плагиоклаз, калиевый полевой шпат, биотит, роговая обманка, пироксены	Серый, светло-серый	Полнокристаллическая	Массивная
	Дацитовый порфирит, дацит	То же	Светло-серый	Афанитовая, порфировая, стекловатая, полустекловатая	Флюидальная, миндалекаменная, массивная, пузыристая, пористая
Средние	Сиенит	Калиевый полевой шпат, средние плагиоклазы (65—70), роговая обманка, биотит, пироксены (10—30), кварц (до 5)	Белый, серовато-желтый, розовый	Полнокристаллическая	Массивная
	Трахитовый порфир	То же	Светло-желтый, розовый, светло-серый	Афанитовая, порфировая, стекловатая, полустекловатая	Флюидальная, миндалекаменная и др.
	Трахит	»	Темно-желтый, бурый	То же	То же
	Диорит	Средние плагиоклазы (65—70), роговая обманка, биотит, пироксены (25—30), кварц (до 5)	Светло-серый, зеленовато-серый	Полнокристаллическая	Массивная
	Андезитовый порфирит	То же	Светло-серый, светло-бурый	Афанитовая, порфировая, стекловатая, полустекловатая	Флюидальная, миндалекаменная, массивная, пузыристая, пористая
	Андезит	»	Светло-серый	То же	То же
Основные	Габбро	Основные плагиоклазы (53), пироксены, роговая обманка, оливин (47)	Черный, зеленовато-черный	Полнокристаллическая	Массивная
	Базальтовый порфирит, диабаз	То же	Черный, зеленовато-серый	Афанитовая, порфировая, стекловатая, полустекловатая	Флюидальная, миндалекаменная, массивная, пузыристая, пористая
	Базальт, долерит	»	Черный, темно-серый	То же	То же
Ультраосновные	Дунит, перидотит, пироксенит	Пироксены, оливин	Темный, желтовато-зеленый, почти черный	Полнокристаллическая	Массивная

Группы пород	Горная порода	Минеральный состав*	Цвет	Структура	Текстура
<i>Метаморфические породы</i>					
Массивные	Кварциты	Кварц	Белый	Полнокристаллическая, мелкозернистая	Массивная
	Мраморы	Кальцит	Светлый	Полнокристаллическая	»
	Гнейсы	Кварц (до 30), полевой шпат (до 60), слюды (10—15), реже амфиболы, пироксены	Серый, темно-серый	»	Гнейсовидная
Кристаллические сланцы	Слюдяные сланцы	Кварц, слюды, в небольшом количестве полевые шпаты	Серый, темно-серый	Полнокристаллическая, мелкозернистая	Сланцеватая
	Амфиболиты	Роговая обманка	Темный, зеленовато-серый	То же	»
	Зеленые сланцы	Хлорит, тальк, серпентин, кварц, кальцит	Зеленый, серо-зеленый	»	»
	Филлиты	Слюды, кварц	Серые с шелковистым блеском	»	»
<i>Осадочные породы</i>					
Обломочные	Песчаники кварцевые	Кварц	Светло-серый	Полнокристаллическая	Массивная
	Песчаники полимиктовые	Кварц, полевые шпаты, слюда, глауконит, карбонаты	Серый	»	»
<i>Пылеватые и глинистые</i>					
Пылеватые и глинистые	Алевролиты (пылеватые)	Глинистые минералы, кварц, полевые шпаты, слюды, карбонаты	Темно-серые, пестроокрашенные	Полнокристаллическая, тонкозернистая	Тонкослоистая
	Аргиллиты (глинистые)	То же	То же	То же	»
Карбонатные	Известняки	Кальцит, примесь терригенного материала	Обычно белый, светлый (иногда до черного)	Полнокристаллическая, оолитовая	Массивная, слоистая, пористая
	Доломиты	Доломит, примесь терригенного материала	Светлые, иногда темно-серые	Полнокристаллическая	Массивная
	Мергели	Кальцит (30—50), глинистые частицы (70—50)	Белые, светлоокрашенные, иногда пестроокрашенные	»	»
Кремнистые	Яшмы	Халцедон	Яркоокрашенные	Скрытокристаллическая, брекчиевидная	Плотная
	Кремни	Халцедон, глинистые частицы	Разноокрашенные	Скрытокристаллическая, конкреционная	»
	Диатомиты, трепелы, опоки	Мелкие зерна опала	Светлоокрашенные	Органогенная	Пористая

* В скобках дано содержание минерала в процентах.

Особую группу составляют кремнистые, преимущественно мономинеральные породы: яшмы, кремни, диатомиты, трепелы и опоки, в составе которых преобладают халцедон (яшмы, кремни), опал (диатомиты, трепелы, опоки).

Глава 7

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЖИДКОГО КОМПОНЕНТА ПОРОД

7.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Жидкий компонент и вода как главнейшая его составляющая входят в состав горных пород, слагающих природные массивы. Его присутствие сказывается на свойствах практически всех разновидностей горных пород, причем наиболее контрастно оно проявляется у дисперсных грунтов, особенно у глинистых, лёссовых, песчаных, торфяных. С увеличением содержания жидкого компонента прочность этих пород резко падает, а сжимаемость увеличивается. Влияние жидкого компонента на свойства пород с жесткими связями (скальные грунты) выражено, как правило, менее контрастно, но все же достаточно отчетливо.

Жидкий компонент в горных породах может находиться в различных фазовых состояниях: жидком, газообразном и твердом. Чаще всего в грунтах присутствуют две первые категории. В многолетне- и сезонномерзлых, а также в искусственно замороженных грунтах все они присутствуют одновременно. Количественное их соотношение в жидком компоненте, количественное содержание самого этого компонента, его состав и энергетическое состояние могут быть различными, что определяет неодинаковое влияние их на свойства пород. Поэтому все эти особенности жидкого компонента изучают при инженерно-геологических исследованиях.

В процессе полевых исследований определяют главным образом количественное содержание и состав жидкого компонента горных пород. В лабораторных условиях обычно сначала определяют количественное содержание жидкого компонента в породе, а затем качественный состав и энергетическую неоднородность.

Полевые и лабораторные методы изучения количественного содержания жидкого компонента горных пород подразделяются на прямые и косвенные. Первые предусматривают непосредственное определение массы этого компонента в данном объеме породы, вторые основаны на использовании различных физических явлений, которые «вызываются» исследователем в определенном объеме горных пород при помощи специальной аппаратуры. Из прямых методов наиболее широко используется так называемый весовой метод, а из косвенных — нейтронный. Прямые методы применяются как при полевом, так и при лабора-

торном изучении горных пород; косвенные — нашли наиболее широкое использование при полевых работах.

Следует подчеркнуть, что все наиболее часто применяемые сейчас прямые и косвенные методы определения количественного содержания жидкого компонента горных пород позволяют учесть содержание главного его элемента — воды. Масса растворенных в ней веществ не учитывается.

Количественное содержание воды в горных породах в их естественном (природном или созданном человеком) залегании характеризуют параметром, получившим название естественной влажности грунта. Ее определяют практически при всех видах инженерно-геологических исследований и рассматривают как один из важнейших показателей состава грунтов, определяющих их физическое состояние и свойства. Методы изучения этого показателя в полевых и лабораторных условиях достаточно разнообразны.

Естественная влажность, как и другие влажностные параметры, может быть выражена в различных формах: весовой*, объемной, относительной, а также в виде редко используемой весовой по отношению к влажной (сырой) навеске. Под весовой влажностью понимают величину, рассчитываемую как отношение массы воды к массе твердого компонента в данном объеме горной породы. Она выражается в процентах (или долях единицы) и изменяется от долей процента до нескольких сотен процентов в зависимости от состава и типа грунтов. Весовая влажность по отношению к влажной навеске рассчитывается как отношение массы воды к общей массе данной пробы горной породы. Она может изменяться от долей процента до ста процентов (от долей единицы до единицы). Под объемной влажностью понимают отношение объема воды, заключенного в поре, к общему объему породы. Объемная влажность может быть рассчитана по значению весовой влажности и плотности скелета грунта. Она может выражаться в процентах или долях единицы и не превышает значение пористости породы. Относительная влажность G , или степень влажности (коэффициент водонасыщения), характеризует степень заполнения пор жидким компонентом (водой) и находится как отношение объема воды к объему пор в данном объеме породы. Она обычно выражается в долях единицы. Ее значение теоретически изменяется от нуля до единицы. На практике в некоторых случаях оно может превышать единицу вследствие того, что при нагревании грунтов до 105—110°C в процессе определения влажности удаляется часть воды, входящей в кристаллическую решетку некоторых минералов (гипс, глинистые и др.). В соответствии со СНиП II-15—74 крупнообломочные и песчаные

* Здесь используется общепринятый термин «весовая» форма, хотя более правильно говорить о «массовой» форме, так как мы учитываем отношение масс жидкого и твердого компонентов грунта.

грунты подразделяются по степени влажности на: маловлажные $0 < G \leq 0,5$; влажные $0,5 < G \leq 0,8$; насыщенные водой $0,8 < G \leq 1$.

Изучение качественного состава (минерализации и химического состава) жидкого компонента — задача более сложная. Это обусловлено тем, что он, как правило, представляет собой сложный раствор легко-, средне- и труднорастворимых соединений (простых солей, гумусовых веществ, кремнекислородных соединений, продуктов разложения сложных силикатов и др.). Этот состав сформировался под влиянием естественных и антропогенных (в освоенных районах) процессов и отражает характер, а также степень засоления пород.

В полевых условиях изучение качественного состава жидкого компонента проводится с помощью специальных полевых лабораторий. В настоящее время их оснащенность позволяет получать большой объем информации о минерализации и составе этого компонента горных пород. Ее в подавляющем большинстве случаев оказывается достаточно для решения практических задач. Однако иногда приходится переносить основной объем работ по изучению качественного состава жидкого компонента в центральные лаборатории, где ведется исследование состава рассматриваемого компонента применительно к решению научных вопросов.

Изучение энергетической неоднородности жидкого компонента, особенно связанной воды, осуществляется в основном в лабораторных условиях, поскольку проведение экспериментов требует специальной аппаратуры. Поэтому этот вопрос рассмотрен во втором томе настоящей работы, где описан ряд наиболее широко используемых методик определения содержания прочно- и слабосвязанной, а также свободной воды. Там же приведена классификация энергетически различных видов воды.

7.2. ИЗУЧЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В ПОРОДАХ

В полевых условиях определение влажности породы производят при помощи геофизических методов — нейтронного, электрического и дистанционного радиофизического. Все эти методы являются косвенными, т. е. основанными на измерении определенных физических характеристик пород, зависящих от содержания воды в грунте. Поэтому перед применением их в поле возникает необходимость предварительного установления соответствующей функциональной зависимости между измеряемым свойством грунта и его влажностью.

Нейтронный метод

Наиболее эффективен для определения влажности грунтов в полевых условиях нейтронный метод, обладающий большими возможностями. Он применим для всех типов дисперсных по-

род, позволяет определять влажность породы, находящейся как в зоне аэрации, так и ниже уровня грунтовых вод. Измерение влажности можно проводить в большом объеме породы ($0,2 \text{ м}^3$), что позволяет определять влажность массива. Нейтронный метод применим как для разовых, так и для многократных измерений влажности одного и того же объема породы в скважинах, обнажениях, выемках, насыпях. Измерение влажности данным методом весьма оперативно и достаточно точно [17, 29, 42].

В настоящее время выпущен ГОСТ 24181—80, который посвящен нейтронному методу определения влажности в полевых условиях.

Нейтронный метод измерения влажности пород основан на зависимости между водосодержанием породы и плотностью потока нейтронов, замедленных* в процессе рассеяния на ядрах атомов водорода. При помощи нейтронного метода измеряют среднюю объемную влажность породы $W_{об}$ в исследуемом объеме, находящемся между источником нейтронов и измерительным преобразователем.

Нейтронный метод дает инженерно-геологическую информацию о влажности пород непосредственно на месте их залегания, что исключает многие погрешности исследований, связанные с отбором и анализом образцов, и обеспечивает получение более представительных данных. Применение этого метода позволяет: 1) получать диаграммы распределения влажности на всю заданную глубину исследований; 2) устанавливать уровень грунтовых вод; 3) проводить оценку пространственной неоднородности свойств пород.

При режимных наблюдениях в условиях гидромелиоративных изысканий применение нейтронного метода измерения влажности породы обеспечивает решение задач по определению: 1) коэффициента фильтрации при наливах в шурфы; 2) глубины и скорости промачивания слоя; 3) соотношения фильтрационных потерь на вертикальное насыщение породы и потерь в боковой зоне фильтрации; 4) особенностей фильтрационного процесса на натуральных моделях или опытно-производственных участках; 5) инфильтрационного питания грунтовых вод отдельных районов, параметров влагопереноса, а также позволяет получить значения полевой влагоемкости.

При использовании нейтронного метода измерения влажности необходимо строго учитывать факторы, влияющие на показания прибора и являющиеся следствием сложной природы взаимодействия радиоактивных излучений с веществом.

В основу нейтронного метода измерения влажности, как выше упоминалось, положена функциональная связь между водородосодержанием среды (в основном зависит от влажности) и регистрируемой плотностью медленных нейтронов. Влаж-

* Нейтроны с энергией более $0,5 \text{ МэВ}$ называются быстрыми, а нейтроны с энергией менее 1 кэВ — медленными.

ность измеряется детектором, регистрирующим медленные нейтроны. В качестве источников в нейтронных влагомерах используются герметичные ампулы, содержащие $Po+Be$, $Pu+Be$ или $Ra+Be$. Наиболее долговечным и удобным является плутоний-бериллиевый источник $Pu+Be$, период полураспада которого составляет около 24 000 лет.

Нейтронный метод основан на том, что нейтроны, испускаемые источником в окружающую среду, сталкиваются с ядрами химических элементов и рассеиваются, теряя энергию до уровня энергии теплового движения атомов среды. Так, наибольшая потеря энергии происходит при столкновении нейтронов с ядрами атомов водорода (протонами). Для замедления до тепловой энергии в воде быстрому нейтрону с энергией более 0,5 МэВ требуется всего 18 столкновений с протонами, в то время как в веществе, состоящем из основных породообразующих элементов (кремния, алюминия и т. д.), — от 150 до 300 столкновений.

При достижении энергии близкой к тепловой нейтроны перемещаются (диффундируют) в веществе до тех пор, пока не будут поглощены ядрами элементов. При поглощении (захвате) тепловых нейтронов ядрами элементов среды возникает так называемое захватное гамма-излучение, интенсивность которого изменяется в зависимости от водородосодержания грунта. Это дает возможность использовать эффект регистрации захватного гамма-излучения для оценки влажности.

В результате замедления и диффузии в среде (породе) вокруг источника образуется поле медленных нейтронов. Чем выше влажность (водородосодержание) породы, тем больше медленных нейтронов образуется вблизи источника и тем меньше линейные размеры этого поля. В породах с малой влажностью поле медленных нейтронов распространяется на большие расстояния, а концентрация медленных нейтронов вблизи источников соответственно уменьшается. Поэтому детектор, размещенный около источника, будет регистрировать различное количество медленных нейтронов в породах разной влажности, что позволяет определять влажность породы по числу зарегистрированных медленных нейтронов.

Каждый нейтронный влагомер имеет график градуировки, который выражает зависимость счёта тепловых нейтронов от влажности породы $N=f(W_{об})$. Поскольку на процесс распространения нейтронов в породе влияет и сухое вещество, плотность регистрируемого излучения и скорость счёта импульса зависят также и от плотности сухого грунта, ρ_d , что в общем виде выражается зависимостью $N=f(W_{об}, \rho_d)$. На практике часто используют усреднённую по ρ_d зависимость $N=f(W_{об})$, которая находится экспериментально при небольших колебаниях ρ_d (рис. 10). Нейтронные влагомеры градуируют в заводских и лабораторных условиях с помощью стандартных образцов или образцовых мер объёмной влажности в соответствии с инструк-

цией по эксплуатации приборов, а в полевых условиях в соответствии с ГОСТ 24181—80, а также согласно описаниям, изложенным в специальных методических пособиях, указаниях и рекомендациях [17].

Диапазон измерений значений влажности обусловлен чувствительностью прибора. Погрешности измерений зависят от конструкции датчиков, точности построения градуировочного графика прибора (систематические погрешности) и различного рода факторов, таких, как вариации химического состава породы (в том числе содержания органического вещества), степень неоднородности породы по плотности и влажности, изменение скважинных условий измерений.

Изменение плотности сухого грунта ρ_d постоянно воздействует на показания нейтронного влагомера. На графиках градуировки (калибровки) оно проявляется в форме: 1) появления некоторой начальной скорости счета импульсов, соответствующей абсолютно сухой породе ($W_{об}=0$), и 2) смещения графиков градуировки для данного ρ_d вверх или вниз в зависимости от увеличения или уменьшения величины этого параметра.

Присутствие органического вещества в породе в количестве более 5% искажает результаты определения влажности нейтронным влагомером. В связи с этим в результаты определения объемной влажности согласно ГОСТ 24181—80 вводится поправка с учетом содержания органики в породе.

Влияние скважинных факторов проявляется при изменении диаметра скважин, материала и толщины стенок обсадных труб (ГОСТ 24181—80).

Для контроля используется термостатно-весовой метод. Чтобы определение точности нейтронного метода приобрело необходимую достоверность, сравнительные измерения влажности следует производить в литологически однородных толщах породы, оперируя при этом равновеликими объемами породы при многократной повторности определения ее влажности стандартными методами. Величина погрешности нейтронного метода, определенная на основании сравнения его данных с данными стандартного термостатно-весового метода и в отсутствие влияния указанных выше факторов, определяющих величину погрешностей, оценивается в 2,5—4% объемной влажности.

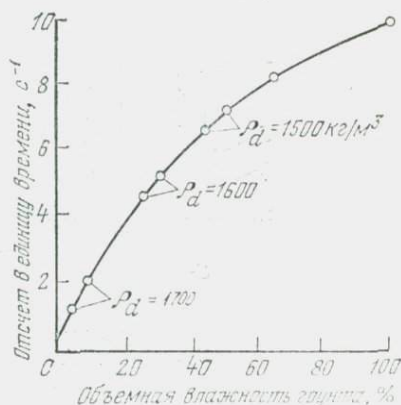


Рис. 10. Пример построения градуировочного графика нейтронного влагомера (ρ_d — плотность скелета грунта)

Аппаратура и схемы измерений. Для измерения объемной влажности породы применяют передвижные нейтронные влагомеры (ГОСТ 19611—74), а также совмещенные радиоизотопные влагоплотномеры (основные технические характеристики приборов приведены в ГОСТ 24181—80). Применяются следующие типы нейтронных влагомеров: ВПГР-1 (рис. 11) с диапазоном измерения влажности 1—100 % (глубинная, по-

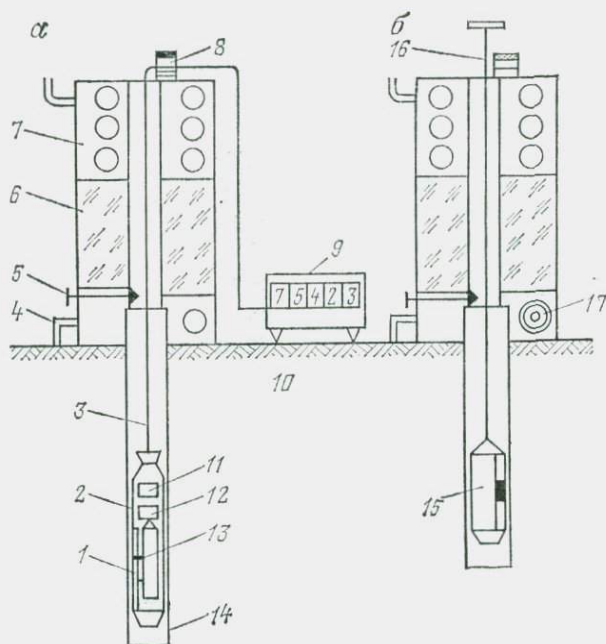


Рис. 11. Схема влагомера ВПГР-1 для глубинных (а) и поверхностных (б) измерений:

1 — источник быстрых нейтронов; 2 — глубинный зонд; 3 — кабель; 4 — ручка; 5 — фиксатор блока источника; 6 — полиэтиленовый блок; 7 — контрольно-транспортное устройство (КТУ); 8 — указатель глубины введения зонда; 9 — счетчик электрических импульсов; 10 — горизонтальный канал для размещения блока детектирования при поверхностных измерениях; 11 — преобразователь высокого напряжения; 12 — усилитель и формирователь электрических импульсов; 13 — детектор; 14 — обсадная труба; 15 — блок источника в положении для поверхностных измерений; 16 — удлинитель; 17 — блок детектирования с детектором в положении для поверхностных измерений

верхностная и поверхностная комбинированная схемы измерений); УР-70 с диапазоном измерения влажности 3—100 % (глубинная схема) и РВП-1 с диапазоном измерения влажности 1—30 % (поверхностная схема).

При измерении влажности нейтронным методом применяют три схемы: глубинную, поверхностную и поверхностную комбинированную (рис. 12).

При глубинной схеме (см. рис. 12, а, б) измерительный преобразователь с источником нейтронов помещают в скважину для определения влажности породы в радиусе от 200 до 250 мм

при $W_{об} = 40-45\%$ и в радиусе 450 мм при $W_{об} < 5\%$. При поверхностной схеме (см. рис. 12, в) измерительный преобразователь и источник нейтронов располагают на поверхности породы для изучения влажности в слое толщиной 150 мм на площади действия преобразователя. При использовании поверхностной комбинированной схемы (см. рис. 12, г) преобразователь помещают на поверхности породы, а источник нейтронов — в по-

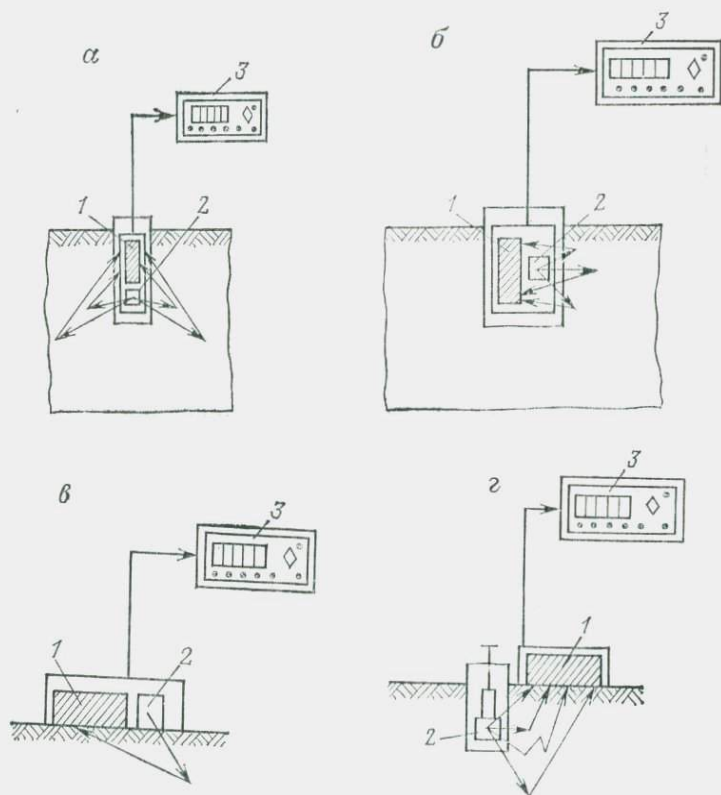


Рис. 12. Схемы измерений нейтронными влагомерами:

а, б — глубинная; в — поверхностная; г — поверхностная комбинированная. 1 — измерительный преобразователь; 2 — источник нейтронов; 3 — измерительный прибор

роде для измерения влажности породы в слое, находящемся между источником нейтронов и детектором излучения.

Проведение измерений. Полевые определения влажности породы с помощью нейтронного метода включают следующие операции: 1) бурение скважины или подготовка поверхности породы к измерениям; 2) проведение замеров влажности породы; 3) демонтаж скважины.

Точность измерения влажности породы во многом определяется диаметром, степенью нарушения стенок и плотностью обсадки скважин. Согласно ГОСТ 24181—80 скважина для

глубинных измерений влажности должна иметь диаметр не более 80 мм и не должна быть заполнена водой. Отклонение диаметра скважины от принятого по градуировке влагомеров не должно превышать ± 5 мм.

При увеличении диаметра скважин возрастает свободный пробег рассеивающихся нейтронов, в результате чего медленные нейтроны образуются на больших расстояниях от источника, а на детектор попадает меньшее число медленных нейтронов; соответственно уменьшается и регистрируемая интенсивность излучения.

Достоверные результаты определений влажности породы при помощи нейтронного метода могут быть получены только в том случае, когда при исправной работе измерительной аппаратуры и детекторов тепловых нейтронов обеспечен непосредственный контакт (без зазоров) между зондом нейтронного влагомера и породой. Зазор между зондом и обсадной трубой не должен быть более 2 мм.

Бурение скважин можно проводить станками ударно-канатного и колонкового типа; колонковое бурение обеспечивает минимальное нарушение стенок скважины. В процессе бурения скважины составляют литологический разрез, отбирают образцы и намечают точки нейтронного опробования.

При бурении в плотных глинах, суглинках и лёссах обсадка скважины может не производиться; при бурении в рыхлых или водонасыщенных отложениях необходима плотная обсадка скважины. Плотная обсадка достигается задавливанием или легкой забивкой обсадных труб в скважину. Для обсадки используются трубы с постоянным внутренним и внешним сечением, для которых проведена калибровка приборов (указывается в паспорте приборов). Диаметр труб, погружаемых в породу, не должен превышать 60 мм, а сами трубы и их стыки должны быть водонепроницаемыми.

При проведении измерений нейтронными влагомерами для обсадки скважин согласно ГОСТ 24181—80 используются стальные (с толщиной стенок не более 6 мм) и дюралюминиевые (с толщиной стенок не более 8 мм) трубы. Материал труб по-разному влияет на показания прибора. Например, трубы из дюралюминия, рассеивающие свойства которого по отношению к быстрым нейтронам мало отличаются от свойств породы, вызывают относительно небольшое снижение скорости счета по сравнению со стенками скважин без обсадки. При использовании стальных труб имеет место дополнительное снижение скорости счета вследствие того, что железо обладает свойствами слабого аномального поглотителя тепловых нейтронов. Для срезания неровностей со стенок скважины нижний торец первой трубы затачивают или снабжают фрезерным башмаком. При погружении обсадных труб в скважины величина зазора между стенкой скважины и обсадной трубой не должна быть более 3 мм.

Измерение влажности породы поверхностным способом проводится на площадке размером не менее 60×60 см. При использовании поверхностной и комбинированной схем измерительный преобразователь следует устанавливать на расчищенную от растительного слоя и выровненную поверхность породы на расстоянии не менее 500 мм от стенок сооружения или выработки. Опорная плоскость измерительного преобразователя должна быть плотно (без зазора) прижата к поверхности породы.

Нейтронный влагомер подготавливают к работе в соответствии с инструкцией по его эксплуатации. Зонд влагомера помещают в скважину на заданную глубину. Расстояния между точками измерений в зависимости от литологических особенностей и физического состояния породы, а также от детальности изучения разреза могут изменяться от 30 до 200 см. Проводить замеры через интервалы менее 30 см нецелесообразно, так как будет происходить перекрытие эффективных сфер влияния двух соседних точек измерения.

Работа приборов постоянно контролируется с помощью контрольно-калибровочного устройства, размещенного над устьем скважины примерно на высоте 30—40 см от земли, чтобы поверхность земли не оказывала влияния на замеры скорости счета. По этой же причине нельзя устанавливать контрольно-калибровочное устройство вблизи массивных предметов.

Электрические методы

Основные пути применения геофизики для измерения влажности грунтов связаны с диэлектрическими методами и методом вызванной поляризации.

Диэлектрические методы измерения влажности грунтов основаны на доминирующей роли объемной влажности при измерении диэлектрической проницаемости пород ϵ_p . При этом последняя практически не зависит от химического состава и концентрации поровых растворов. Кроме того, она наиболее четко проявляется в переменных электрических полях высокой частоты, поэтому среди электрических методов влагометрии основное положение занимают высокочастотные диэлектрические способы измерения влажности.

В качестве основных приборов, используемых для измерения влажности в грунтах, в работе [46] рассматривается несколько типов датчиков. В одном из них, использующем принцип резонансных измерений емкостей, мерой диэлектрической проницаемости материала является частота рабочего генератора. Достоинство приборов такого типа состоит в том, что они являются одношкальными, причем наиболее удобна шкала в относительных единицах с приложенными тарировочными графиками. Однако указанные радиовлагомеры имеют один существенный недостаток, суть которого заключается в том, что при измерении емкости датчика с породой они позволяют осво-

бодиться лишь от влияния потерь на сквозную проводимость. В то же время в породе действуют и дипольные потери, значение которых возрастает при увеличении дисперсности породы и ее удельной поверхности. Поэтому определенный интерес представляют радиовлагомеры, использующие компенсационный способ измерения емкости датчика и снабженные второй шкалой для измерений суммарных потерь в породе.

В работе [46] рассмотрены блок-схемы различных радиовлагомеров, приведены рекомендации по их применению для проведения режимных наблюдений за влажностью в зоне аэрации и для работ с образцами рыхлых пород в лабораторных условиях.

Для изучения динамики влажности грунтов в естественных условиях зоны аэрации датчик устанавливают в грунт (в забой скважины диаметром 75—100 мм) и оставляют там в течение всего периода наблюдений. На поверхности находится только короткий отрезок кабеля со штепсельными гнездами для подключения радиовлагомера. Для определения начальной весовой влажности W_e термостатно-весовым способом непосредственно перед установкой датчика из забоя скважины отбирают в бюксы три—пять проб грунта.

Наблюдения за изменением влажности осуществляются посредством измерений емкости датчика и диэлектрических потерь и последующего вычисления по этим данным диэлектрической проницаемости пород ϵ_e . Весовая влажность вычисляется по эмпирической формуле

$$W_e = \epsilon_e - \epsilon_{сп} + A \lg \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{сп}}, \quad (7.1)$$

где $\epsilon_{сп}$ — диэлектрическая проницаемость сухой породы; A — постоянный коэффициент, определяемый по данной формуле путем подстановки в нее всех величин, полученных в результате первого замера.

Для определения объемной влажности проводят специальные тарировочные работы, по результатам которых устанавливают зависимость между диэлектрической проницаемостью и объемной влажностью $\epsilon = f(W_{об})$ и строят тарировочный график. С помощью этого графика в ходе наблюдений осуществляется переход от электрических величин к показателям объемной влажности. По начальным значениям весовой W_e и объемной влажности $W_{об}$ грунта и его плотности ρ_s можно определить естественную пористость $n_e = [(1 - W_{об}) / (W_e \rho_s)] \cdot 100\%$ и недостаток насыщения $\mu = n_e - W_{об}$.

Порядок размещения датчиков в грунте определяется условиями и задачами исследований. Их можно устанавливать в шурфах или в специально пробуренных скважинах.

Качественное выполнение всех операций позволяет определить относительное изменение влажности грунта с точностью 1,0—1,5 %.

Метод вызванной поляризации (ВП). Решение задачи по оценке влажности пород зоны аэрации с помощью этого метода возможно в том случае, когда разрез сложен песчано-глинистыми грунтами. Ведущими геофизическими характеристиками, наиболее тесно связанными с влажностью, являются поляризуемость и удельное электрическое сопротивление пород. На эти параметры помимо влажности влияют литология и минерализация поровых растворов, поэтому удовлетворительные результаты можно получить лишь при однородном строении зоны аэрации.

Изучение влажности пород зоны аэрации целесообразно проводить по величине поляризации, а в условиях изменчивой засоленности грунтов — по величине относительной поляризуемости.

Эмпирическую зависимость между поляризуемостью и влажностью можно устанавливать по результатам измерений стенок шурфов, на основании качественной интерпретации параметрических кривых ВЭЗ ВП вблизи опытных скважин или по тем и другим данным.

Помимо данных электрических измерений для построения зависимостей необходимо располагать качественным и представительным материалом опробования горных выработок. С этой целью исследуемые на влажность скважины и шурфы опробуются через 0,1—0,2 м; при значительной мощности зоны аэрации (более 20 м) интервал опробования может быть увеличен до 1,0 м.

Метод ВП позволяет расчленять породы по влажности лишь в области малых и средних значений (для суглинков 20—25 %), так как дальнейшее увеличение влажности не вызывает изменения поляризуемости пород.

Дистанционные радиофизические методы

Весьма перспективны для определения влажности грунтов радиофизические методы. Установка соответствующей аппаратуры на самолетах и спутниках позволяет исследовать указанную характеристику с помощью дистанционных методов. Обладая высокой оперативностью, достаточной точностью и детальностью, дистанционные методы позволяют измерять величину влажности на значительных пространствах.

Радиофизические методы дистанционных исследований поверхностных слоев делятся на активные и пассивные. Первые основаны на изучении отраженных и рассеянных электромагнитных волн влагосодержащим поверхностным слоем пород. Пассивный метод использует результаты измерения собственного электромагнитного излучения земной поверхности. Следует отметить, что в настоящее время пассивные методы измерения влажности грунтов характеризуются более высокой степенью технологической готовности к практическому применению, чем

радиолокационные методы. Существующие наземные методы, по точности превосходящие дистанционные, служат для контроля и привязки данных дистанционных измерений к реперным профилям.

Методы сверхвысококачастотной радиометрии. Методы сверхвысококачастотной радиометрии (СВЧ-радиометрии) основаны на измерении собственного электромагнитного излучения поверхностного слоя на сверхвысоких частотах, находящихся в диапазоне радиоволн сантиметровой и дециметровой длины. Наиболее применимы радиоволны, находящиеся в диапазоне от 2 до 40 см, так как в этих пределах электромагнитного спектра интенсивность излучения реальной физической системы «космос — атмосфера — земная поверхность» определяется преимущественно излучением земной поверхности. При этом интенсивность излучения в радиодиапазоне характеризуется яркостной температурой $T_{\text{я}}$, равной произведению коэффициента излучения X на термодинамическую температуру T , усредненную в пределах толщины излучающего слоя. Коэффициент излучения X представляет собой безразмерную величину $X=1-R$ (где R — коэффициент отражения энергии электромагнитного излучения, образованного в поверхностном слое грунта в результате теплового движения заряженных частиц — электронов и ионов от границы земля — воздух).

Основной характеристикой грунтов, определяющей их излучательные (радиолокационные) свойства на сантиметровых волнах, является влажность. Подобная закономерность объясняется взаимосвязью интенсивности излучения и толщины эффективно излучающего слоя с диэлектрической проницаемостью и коэффициентом поглощения радиоволн в грунте. Значения указанных параметров определяются в основном содержанием влаги в грунте и характером ее распределения по вертикали.

Излучательная способность слоя грунта определяется выражением

$$\kappa_{\lambda} = \frac{(1 - R_{1,2})(1 - R_{2,3}e^{-2\tau_{\lambda}})}{1 - R_{1,2}R_{2,3}e^{-2\tau_{\lambda}}}, \quad (7.2)$$

где $R_{1,2}$, $R_{2,3}$ — коэффициент отражения соответственно от поверхности земли и от увлажненного слоя; τ_{λ} — показатель затухания в верхнем, излучающем слое (в децибелах); λ — длина волны.

Последняя характеристика связана с углом потерь δ в грунте, диэлектрической проницаемостью ϵ и толщиной верхнего слоя l соотношением

$$\frac{2\pi \operatorname{tg} \delta \sqrt{\epsilon} l}{\lambda}. \quad (7.3)$$

Соотношения (7.2) и (7.3) показывают, что при увеличении влажности происходит увеличение диэлектрической проницае-

мости и коэффициента поглощения, что соответственно приводит к уменьшению интенсивности радиоизлучения (яркостной температуры) поверхностного слоя (рис. 13). Однако радиояркостная температура зависит не только от влажности, но и от степени минерализации почвенного раствора, хотя и в значительно меньшей степени. Определенную роль в излучении земной поверхности играет растительность и характер обработки почвы.

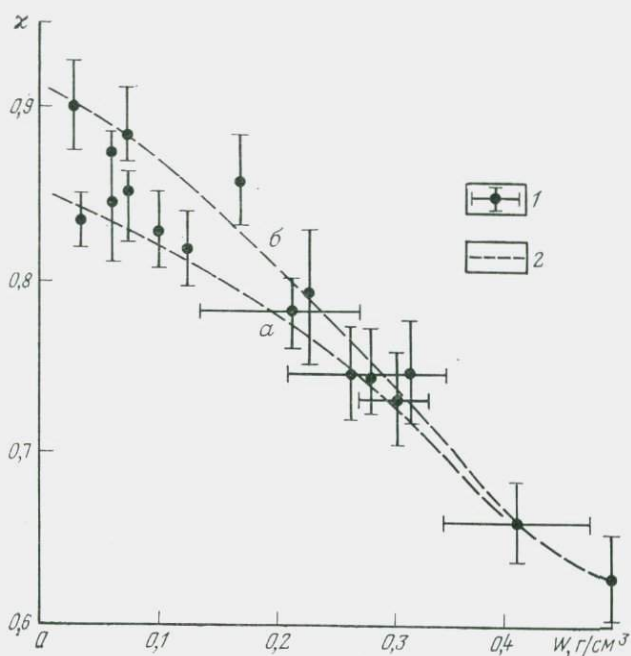


Рис. 13. Графики радиационно-влажностной зависимости на волнах 18 (а) и 20 см (б):

1 — полевые данные; 2 — лабораторные данные

Для исключения неоднозначности при оценке влажности грунтов с помощью СВЧ-радиометрического зондирования используется несколько длин волн, при этом с ростом длины волны увеличивается и глубина зондирования. Так, например, на волнах сантиметрового диапазона толщина слоя, характеризующего глубину зондирования, варьирует до 0,2—1 см, на дециметровых волнах — от 1 до 10 см.

Аппаратура и методика измерений. Наиболее современной аппаратурой, используемой для дистанционного зондирования поверхности земли, слоев с целью оценки влажности, является аппаратура, разработанная в институте радиотехники и электроники АН СССР. Радиометрическое оборудование, установленное на самолете АН-2, состоит из трех высо-

кочувствительных СВЧ-радиометров, позволяющих изучать влажность по результатам измерения яркостной температуры поверхности слоев в диапазонах волн 2,25; 18 и 30 см. В комплект оборудования самолета-лаборатории кроме трех радиометрических приемников входит антенна, сигналы от которой поступают на входы приемников. Сигналы регистрируются на диаграммной ленте с помощью самопишущих устройств. Ширина лучей антенн составляет 30—40 м, что обеспечивает разрешающую способность съемки порядка $(0,7—0,8)H$ (где H — высота полета). Высота полета может изменяться от 20 до 1000 м; соответственно ширина полосы, в пределах которой усредняется величина влажности зондируемого поверхностного слоя, будет варьировать от 10 до 700 м. Для обслуживания аппаратуры на борту самолета находятся один или два оператора.

Методика получения данных о влажности грунтов по данным СВЧ-радиометрических измерений с борта самолета-лаборатории АН-2 включает: подготовку аппаратуры к летным измерениям; проведение летных измерений; обработку полученных данных и составление карт влажности. Перед выполнением перечисленных работ необходимо выбрать маршрут и высоту полета. При неправильной форме поля, в пределах которого оценивается влажность грунтов, его разбивают на отдельные участки и облет каждого из них производится параллельными курсами вдоль более длинных сторон. Высота полета выбирается исходя из требований к пространственной разрешающей способности и на основе соотношения между высотой полета H и размерами усреднения $D: H = D/0,7$. Подготовка аппаратуры предполагает термостатирование приборов и их калибровку по внутренним эталонам. Внешняя калибровка прибора сводится к определению радиационного масштаба записи сигнала с использованием естественных объектов с известной интенсивностью излучения. В качестве реперов используются пресноводный водоем (интенсивность излучения $X=0,36$) и неполивной участок суши ($X=0,93$) или густой лес ($X=0,98$). При такой относительной калибровке обеспечивается погрешность определения влажности порядка 3—5%. После этого рассчитывается радиационный масштаб влажности M_p с учетом того, что изменение величины сигнала ΔM относительно опорного уровня (например, пресноводного водоема) прямо пропорционально интенсивности излучения ΔX и соответственно $M_p = \Delta X / \Delta M$. При проведении радиометрических измерений поступающую информацию регистрируют на протяжении всего полета над исследуемой площадью; при выполнении разворота регистратор отключают для увеличения полезного объема записи.

Обработка данных измерений может проводиться вручную или автоматизированно. В первом случае на ленту регистратора наносят градации влажности с учетом полученного радиационного масштаба записи и с использованием радиационно-влажностной зависимости. Например, при выборе в каче-

стве градаций значения влажности $W_{об}$ (в г/см³) 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 соответствующие значения интенсивности излучения X будут равны 0,86; 0,75; 0,67 и 0,59. На ленту регистратора или на специально изготовленный шаблон наносят уровни, соответствующие указанным значениям коэффициента излучения, и таким образом переводят шкалу интенсивности излучения в шкалу влажности.

Автоматизированную обработку можно осуществлять на основе соответствующих программ на ЭВМ, позволяющих проводить операции по аппроксимации радиационно-влажностной зависимости, занесению в память машины данных об обследуемых объектах и маршрутах пометов, а также операций, проводимых при ручной обработке.

7.3. ВЫДЕЛЕНИЕ ПОРОВЫХ РАСТВОРОВ ИЗ ПОРОД

Для количественной характеристики состава водных растворов, содержащихся в порах горных пород, необходимо провести соответствующее их опробование с целью выделения поровых растворов. Пробы полученных растворов затем анализируются различными методами, описанными ниже.

Исследование состава поровых растворов горных пород можно проводить по двум схемам: без отделения от твердой фазы и с отделением от нее. По первой схеме, методика которой еще до конца не разработана, потенциометрическими методами *in situ* определяются активности ионов непосредственно во влажных породах (пластичных грунтах, почвах, илах и т. д.). Для этого используются различные рН-метры со стеклянными электродами для измерения как величин рН, так и активностей ионов натрия [23]. Разработанные Е. А. Матеровой, Е. А. Берлинской и другими мембранные электроды с различной электропроводной функцией также позволяют исследовать поровые растворы *in situ* непосредственно в полевых условиях. При этом в целом ряде случаев очень важно также непосредственное измерение окислительно-восстановительного потенциала еН в горных породах.

Полная схема таких измерений еще до конца не разработана. Кроме того, принцип непосредственных измерений может быть применен лишь к значительно увлажненным горным породам (пластичным глинам, почвам, илам и т. д.). Поэтому в настоящее время основное значение имеет комплекс методов, основанных на второй схеме — выделении поровых растворов из горных пород с последующим их анализом [23].

Методика выделения поровых растворов разрабатывалась П. А. Крюковым, А. В. Трофимовым, П. И. Шаврыгиным, М. Г. Валяшко и многими другими исследователями [23]. Выделение поровых растворов из горных пород проводится как непосредственно в полевых условиях (в шурфах, обнажениях, скважинах и т. д.), так и в лаборатории (из отобранных моно-

литов пород). Однако многочисленные данные свидетельствуют о том, что при длительном хранении монолитов или керна состав порового раствора существенно меняется. Вследствие этого предпочтительнее получение поровых растворов непосредственно в полевых условиях. Ниже рассматриваются методы выделения поровых растворов, применяемые в ходе опытных полевых работ или режимных (стационарных) наблюдений, которые можно разделить на три группы методов: отпрессовывания, вакуумирования и замещения.

Метод отпрессовывания растворов. Данный метод наиболее широко применяется в полевых условиях для отбора проб поровых растворов. Суть его заключается в том, что отобранная в выработке порода с естественной влажностью сразу же помещается в поршневой прибор для отпрессовывания, после чего на образец подается внешнее давление (с помощью переносных гидравлических прессов типа «Школьник»), под действием которого из породы отжимается поровый раствор, собираемый в приемник. Такой отбор исключает некоторые необратимые изменения, неизбежно возникающие в растворе при хранении образцов-монолитов, и позволяет анализировать пробы в ходе опытных полевых работ, например, с помощью полевой гидрохимической лаборатории.

При отпрессовывании исключительно важен вопрос об интервале давлений, в котором следует проводить отжатие раствора. В работах П. А. Крюкова [23], М. Г. Валяшко, Р. И. Злочевской, В. А. Королева и других исследователей было показано, что в процессе увеличения давления отпрессовывания состав последовательно отжимаемых порций раствора меняется. По мере увеличения давления и снижения влажности образца концентрация порового электролита в отжимаемом растворе сначала остается постоянной, а затем при достижении определенной влажности (или соответствующего давления) начинает снижаться. В итоге оставшийся в образце раствор, как правило, имеет более низкую минерализацию, чем отжатый. Поскольку изменение состава отжимаемых растворов зависит от минерального состава породы, количества связанной воды и ее минерализации, для получения сравнимых результатов следует учитывать не интервал применяемых давлений, а наличие той или иной категории влаги в грунте (интервал влажности образца). Так, было установлено, что в глинистых грунтах любого минерального состава с высокой концентрацией порового раствора (больше 1 н) вообще не происходит изменения концентрации в последовательно отжимаемых порциях раствора во всем исследованном диапазоне влажностей от предела текучести W_f до максимальной гигроскопической $W_{мг}$. В глинах, содержащих разбавленный поровый раствор (менее 0,1 н), концентрация последовательно уменьшалась до достижения определенного предела влажности: для глин каолинитового состава (Na- и Ca-формы) и Ca-монтмориллонитовой при $W < W_L$ (где W_L —

предел раскатывания), а для Na-монтмориллонитовой — при $W < W_f$. Это обстоятельство, обусловленное диффузным распределением ионов в пределах двойного электрического слоя глин, необходимо учитывать при отжатии поровых растворов из глинистых пород.

При отпрессовывании важно применять приборы такой конструкции, которая обеспечивает: 1) возможность работы с образцом большого размера, что позволяет получать большой объем отжимаемой пробы; 2) чистоту получаемой пробы раствора; 3) простоту и надежность работы в полевых условиях. Этим требованиям отвечает прибор, принципиальная схема которого показана на рис. 14.

Образец породы 4 помещается в металлический цилиндр 3, внутри которого находится другой цилиндр 5 из материала, не оказывающего влияния на химический состав раствора (органическое стекло, тефлон и др.). Сверху образец контактирует с шайбой 8 из того же инертного материала, снизу — с перфорированным диском 9. Герметичность в приборе создается с помощью резиновых прокладок 7 и колец.

Перед началом работы прибор тщательно промывают последовательно спиртом, раствором соляной кислоты и трилона. После этого внутренние части прибора несколько раз промывают дистиллированной водой и сушат. Затем прибор загружают исследуемой породой, отобранной из выработки при естественной влажности. Прибор устанавливается в гидравлический пресс (типа «Школьник») между плунжерами 1. Давление устанавливается в зависимости от исходной влажности образца. Отжимаемый раствор через трубку 10 поступает в приемник 11. Затем отобранная проба анализируется. Меняя в ходе опыта приемник и отбирая пробы, соответствующие разным ступеням нагрузки, можно получить пробы последовательно отжимаемых порций порового раствора.

Вакуумный метод. Этот метод разработан и испытан Г. С. Борисовым и А. П. Негодой [5]. Отбор поровых растворов

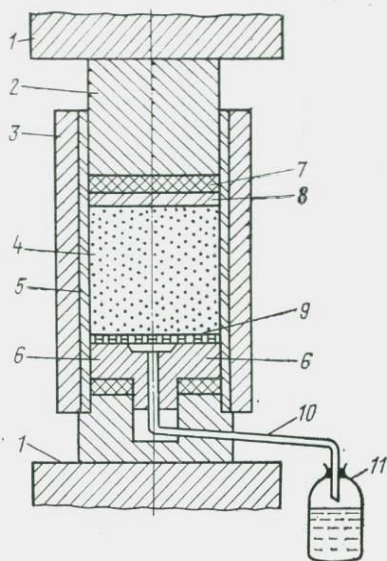


Рис. 14. Схема прибора для отпрессовывания поровых растворов:

1 — плунжеры пресса; 2 — стальной поршень; 3 — стальной цилиндр; 4 — образец; 5 — вставной цилиндр; 6 — поддонник; 7 — резиновая прокладка; 8 — шайба; 9 — перфорированный диск; 10 — отводная трубка; 11 — приемник

из горных пород *in situ* осуществляется путем отсасывания растворов за счет вакуума в пористом датчике, помещенном в грунт. На рис. 15 показана схема установки для отбора порового раствора. В качестве датчиков применяются пористо-керамические бактериальные фильтры с различными характеристиками, выпускаемые серийно.

Датчик 4 представляет собой полый керамический сосуд с пористыми стенками. С помощью стеклянных трубок 5 и вакуумных шлангов датчик подсоединяется к водоприемнику 6,

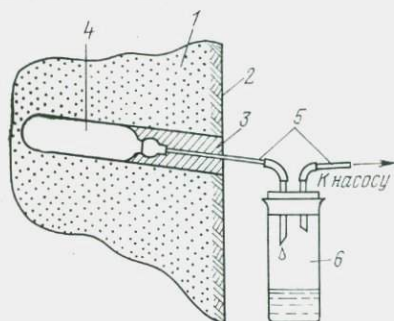


Рис. 15. Схема установки для вакуумного отбора порового раствора:

1 — грунт; 2 — стенка шурфа; 3 — затампованная полость; 4 — керамический датчик; 5 — стеклянные трубки; 6 — приемник

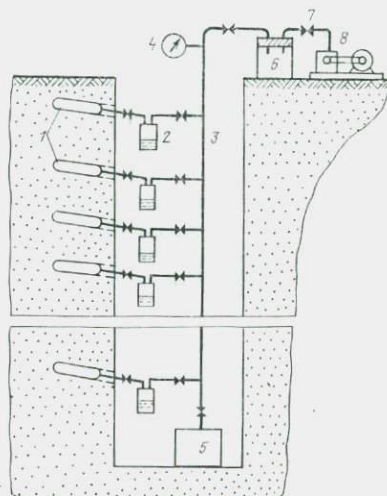


Рис. 16. Схема оборудования шурфа для режимных исследований поровых растворов:

1 — керамические датчики; 2 — приемник; 3 — вакуумный шланг; 4 — манометр; 5 — резервная емкость; 6 — аварийный маслоприемник; 7 — краны; 8 — вакуумный насос

соединенному с вакуумным насосом. В стенке шурфа 2 или выработки делается наклонная полость 3, в которую затем вставляется датчик. Оставшаяся часть полости тщательно тампонируется ранее вынутым грунтом. Материал трубок и приемника должен быть инертным по отношению к выделяемому поровому раствору. За счет разрежения, создаваемого вакуумным способом, из грунта отсасывается поровый раствор, который собирается в водоприемнике 6 и анализируется.

Вакуумный метод отбора поровых растворов позволяет проводить также режимные наблюдения за составом и минерализацией поровых растворов по всей мощности изучаемых грунтовых толщ. Для этих целей на исследуемых участках оборудуются наблюдательные шурфы по схеме, показанной на рис. 16 [5].

Во избежание обвалов стенки шурфа крепятся и герметизируются полиэтиленовой пленкой или парафином, чтобы исклю-

чить испарение поровой влаги. Предусматриваются также меры для предотвращения попадания влаги в шурф. В стенки шурфа (см. рис. 16) на глубину 40—50 см помещаются датчики 1 с интервалом, обусловленным строением толщи и целями исследований. Датчики и водоприемники 2 подключаются параллельно к магистральному шлангу, что позволяет вести одновременный отбор сразу нескольких проб по всей изучаемой глубине. Разрежение в системе, создаваемое переносным вакуумным насосом 8, контролируется по манометру 4. Для обеспечения «запаса» вакуума к шлангу 3 подсоединяется ресиверная емкость 5 объемом 20—25 л. Чтобы масло из насоса не попало в систему (при его внезапной остановке), вакуумный насос подключают в общую систему через маслоприемник 6.

Организация режимных наблюдений в шурфе по такой схеме (см. рис. 16) позволяет отбирать пробы поровых растворов в любые моменты времени и вести наблюдения сколько угодно долго. Структура исследуемого грунта при этом не нарушается, и толща может быть опробована с любым интервалом.

Метод замещения. Если породы содержат незначительное количество влаги в порах (связанная вода), то перечисленные выше методы непригодны для отбора проб порового раствора, поскольку гидратные слои воды в этом случае прочно удерживаются на поверхности минералов пород. Поэтому для отбора проб таких растворов применяется метод замещения жидкостью. Замещающей жидкостью обычно является этиловый спирт.

Данный метод используется по методике Ищерекова или в других модификациях [23]. При выделении растворов методом замещения образец исследуемой породы помещается в широкую стеклянную трубку, имеющую перфорированный поддон, под которым находится водоприемник. Сверху порода заливается спиртом, который, перемещаясь вниз, замещает поровый раствор: из трубки сначала вытекает поровый раствор, затем смесь раствора со спиртом и, наконец, чистый спирт. Отобранные таким образом пробы анализируются.

В тех случаях, когда порода имеет малый коэффициент фильтрации и замещение идет довольно медленно, замещение спиртом проводят под давлением в приборах для отпрессовывания растворов, описанных выше. При этом в полевых условиях давление создают переносными гидравлическими прессами типа «Школьник» или рычажными прессами от полевой лаборатории конструкции Литвинова (ПЛЛ-9). Выделившийся из образца раствор легко отделить от следующего за ним спирта, если применять спирт, подкрашенный каким-либо индикатором (например, бромтимол-блау).

Консервация и хранение проб поровых растворов. В ходе полевых работ часто невозможно сразу проанализировать отобранные пробы растворов, поэтому между

отбором пробы и изучением ее в полевой или стационарной лаборатории проходит определенный срок (хранение). Следует иметь в виду, что при хранении происходит изменение химического состава проб раствора вследствие развития микробиологических процессов, потери CO_2 и других растворенных газов, а также благодаря окислению, растворению и выщелачиванию стенок стеклянных емкостей и т. п. Эти изменения, согласно В. С. Самариной, проходят тем интенсивнее, чем дольше хранится проба и выше температура хранения, чем больше реакция пробы отличается от нейтральной, чем меньше герметичность закупорки и т. д. Для предотвращения указанных процессов и сохранения нестойких компонентов в растворе проводят консервацию отобранных проб.

При хранении проб с ярко выраженной щелочной реакцией, а также при длительном хранении проб, отобранных для определения кремневой кислоты, не рекомендуется пользоваться стеклянными емкостями, так как кремневая кислота дополнительно растворяется при взаимодействии воды со стеклом. В этом случае используют полиэтиленовые емкости или стеклянную посуду, покрытую изнутри парафином.

С целью предохранения проб от различных микробиологических реакций их консервируют добавками хлороформа из расчета 0,1 мл на 100 мл воды.

Чтобы уберечь пробы от потери углекислоты и изменения вследствие этого их состава, через раствор пропускают CO_2 до появления ярко выраженной кислой реакции пробы. При этом обеспечивается консервация в растворе Са, Mg, Fe.

Для определения окисляемости пробы порового раствора консервируют с помощью серной кислоты, которая добавляется с целью предохранения пробы от разложения и окисления органических веществ. Серная кислота (1:1) добавляется из расчета 1 мл на 100 мл раствора пробы.

Пробы поровых растворов, отобранные для анализов на железо, также подвергают консервации, так как оно нередко присутствует в поровом растворе в виде закисного, двухвалентного. Такое железо легко окисляется кислородом воздуха, а затем вследствие гидролитического разложения выпадает из раствора. Для консервации проб с небольшим содержанием железа используют ацетатный буфер с pH 4, добавляемый в количестве 3—5 мл на 100 мл пробы. При значительном содержании железа в исследуемую пробу добавляют для консервации 1 мл H_2SO_4 (1:1) и 0,1—0,15 г $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (сухой) на 100 мл пробы порового раствора.

7.4. ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА ПОРОВОЙ ВОДЫ

Для определения общей минерализации и состава воды в полевых условиях применяются косвенные и прямые методы: к косвенным относятся геофизические, к прямым — химические

методы. Из геофизических методов для оценки общей минерализации воды наиболее целесообразно применение комплекса электроразведочных методов: вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и вызванной поляризации (ВП). Минерализацию вод устанавливают по результатам количественной интерпретации кривых ВЭЗ и ВП. Применение электроразведочных методов позволяет с достаточной точностью и эффективностью определять минерализацию в большом интервале засоленности поровых вод — от пресных до рас-
солов.

При помощи химических методов определяют состав и минерализацию воды. С этой целью сконструированы полевые гидрохимические лаборатории, различающиеся по назначению и объему выполняемого анализа. При пользовании этими лабораториями необходимо учитывать скорость изменения физических свойств и химического состава воды и соблюдать следующую последовательность определений: 1) температура, рН, запах, прозрачность, цвет; 2) свободная углекислота, сероводород, кислород; 3) железо закисное и окисное, нитрит, аммоний и нитрат-ионы; 4) карбонат- и гидрокарбонат-ионы, жесткость, ионы кальция, магния, сульфата и хлора, вкус.

В полевых гидрохимических лабораториях широко применяются колориметрические методы для определения рН, NH_4 , Fe^{2+} , Fe^{3+} и т. д. При этом вместо стандартных растворов используются стандартные шкалы-светофильтры, окрашенные на прозрачной пленке (рис. 17). Применение их значительно упрощает и ускоряет выполнение анализов.

Окраску исследуемого раствора и стандартной шкалы сравнивают в компараторе (рис. 18) следующим образом. В две калиброванные пробирки наливают до 5 мл исследуемой воды. В одну из них добавляют реактивы, а вторая служит компенсатором. Пробирки помещают в компаратор и через определенный промежуток времени к нему прикладывают стандартную шкалу таким образом, чтобы ее окрашенная сторона приходилась против или снизу гнезда с пробиркой-компенсатором.

Шкалу передвигают до тех пор, пока цвет раствора не совпадет с одним из ее эталонов. На каждом эталоне даны цифры, соответствующие количеству определяемых ионов (в миллиграммах на литр воды), а в случае определения концентрации водородных ионов — значению рН.

Если пробирку рассматривать не сверху, а сбоку, то результат определения, обозначенный на соответствующем эталоне,

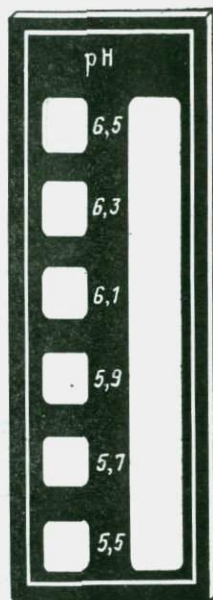


Рис. 17. Стандартная шкала для определения рН

утраивают (за исключением показателя закисного железа и рН). Когда интенсивность окраски раствора находится между двумя соседними эталонами, берут среднее значение.

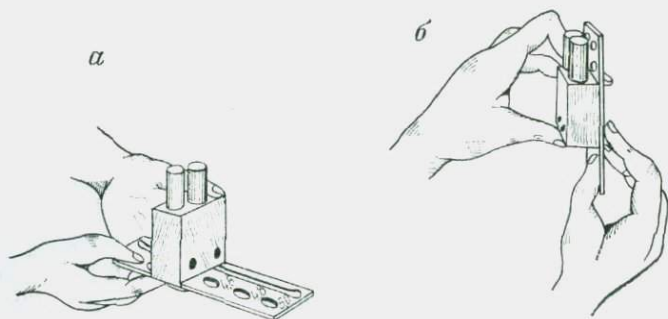


Рис. 18. Работа с компаратором:
сравнение окрасок в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях

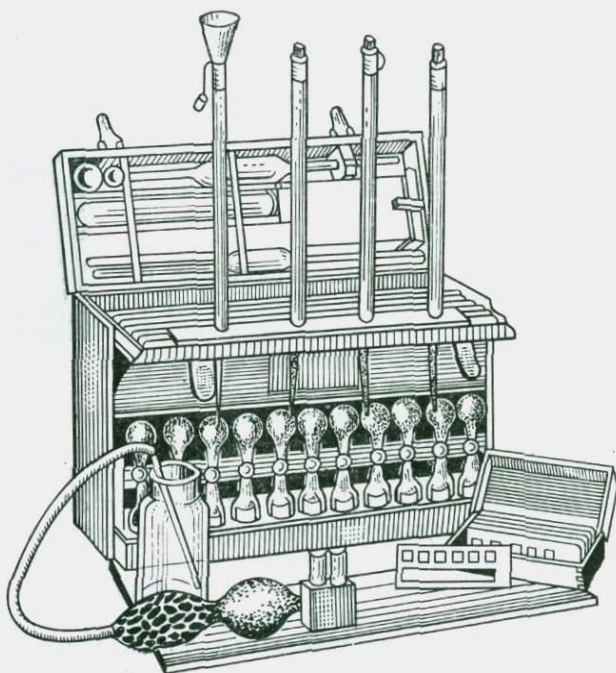


Рис. 19. Полевая гидрохимическая лаборатория для общего анализа воды (ПЛАВ)

Среди полевых гидрохимических лабораторий широкое применение в практике инженерно-геологических и гидрогеологических работ получили лаборатории системы Резникова, изготавливаемые в различных модификациях: от малогабаритных

(МЛАВ) размером $10 \times 18 \times 20$ см, массой 2—2,5 кг для анализа воды в пешеходных маршрутах до лабораторий больших размеров (ПЛАВ), содержащих набор реактивов и лабораторную аппаратуру, рассчитанную на 250 анализов (рис. 19) [36]. С помощью этой лаборатории можно достаточно точно выполнять анализы, позволяющие классифицировать природные воды, изучать динамику их солевого состава и давать их техническую, хозяйственно-бытовую и санитарную оценку.

Лаборатория позволяет выполнить химический анализ следующих компонентов: рН, CO_2 свободный; CO_2 агрессивный; O_2 , H_2S , Fe^{2+} , Fe^{3+} , $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- . Ниже приводятся методы химического анализа воды в полевых условиях.

Определение концентрации водородных ионов (рН)

В пробирку до метки, соответствующей 5 мл, наливают исследуемую воду, добавляют 0,1 мл универсального индикатора, перемешивают раствор и помещают пробирку в компаратор. В другую пробирку также наливают 5 мл исследуемой воды и помещают ее в компаратор. В качестве стандартной применяется шкала, окрашенная на пленке.

Для сравнения исследуемого раствора со стандартной шкалой пробирку рассматривают сверху. Шкалу помещают в нижнюю часть компаратора под пробирку с водой (без индикатора) и передвигают до совпадения окраски раствора с одним из эталонов. Если раствор в пробирке окажется более ярким, чем крайние эталоны шкалы, записывают результат. В остальных случаях записывают то значение рН исследуемой воды, которое обозначено на эталоне, совпавшем по окраске с раствором в пробирке.

Для приготовления универсального индикатора 0,04 г бромтимолового синего растирают с 6 мл 0,01 н. раствора NaOH на часовом стекле с помощью стеклянного пестика. Образовавшуюся смесь смывают дистиллированной водой в колбу объемом 100 мл, прибавляют 20 мл спирта и доливают до метки дистиллированной водой. Затем 0,01 г метилового красного также растирают с 3,7 мл 0,01 н. раствора NaOH на часовом стекле, смесь смывают дистиллированной водой в колбу объемом 50 мл, прибавляют 10 мл спирта и доливают до метки дистиллированной водой. Полученные растворы сливают вместе.

Определение общей щелочности, ионов HCO_3^- и CO_3^{2-}

Пипеткой отбирают 50—100 мл исследуемой воды в коническую колбу объемом 250 мл, прибавляют 2—4 капли 0,1 %-ного раствора метилового оранжевого и титруют воду на белом фоне по каплям 0,1 н. раствором соляной кислоты при постоянном перемешивании до тех пор, пока жидкость не приобретет

слабо-розовую окраску. Для того чтобы лучше отмечать изменение окраски, рядом ставят колбу, в которую наливают такое же количество исследуемой воды и прибавляют 2—4 капли 0,1 %-ного раствора метилового оранжевого.

Расчет ведется по формуле

$$X = \frac{V_n \cdot 1000}{V_1}, \quad (7.4)$$

где X — общая щелочность воды; V — объем HCl ; n — нормальность HCl , израсходованной на титрование воды; V_1 — объем воды.

Определение иона HCO_3^- при отсутствии иона CO_3^{2-} . Определяется так же, как и общая щелочность. Расчет проводят по формуле

$$X = \frac{V_n \cdot 61 \cdot 1000}{V_1}, \quad (7.5)$$

где X — содержание HCO_3^- .

Определение ионов CO_3^{2-} и HCO_3^- при их совместном присутствии. В случае малого содержания CO_3^{2-} (до 50—100 мг/л) при титровании воды, содержащей ион CO_3^{2-} , соляной кислотой с фенолфталеином в качестве индикатора до обесцвечивания ион CO_3^{2-} переводится в ион HCO_3^- по реакции $\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^-$, т. е. оттитровывается половина карбоната-иона.

При дальнейшем титровании кислотой с метиловым оранжевым в качестве индикатора происходит полное разложение образовавшегося в процессе предыдущего титрования и содержащегося в воде иона HCO_3^- по реакции $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$.

Для проведения анализа в коническую колбу пипеткой отбирают 50—100 мл воды, добавляют 5 капель 1 %-ного раствора фенолфталеина, осторожно по каплям титруют 0,1 н. HCl до обесцвечивания и отмечают израсходованное количество кислоты. Затем к этому раствору прибавляют 3 капли 0,1 %-ного раствора метилового оранжевого и титруют 0,1 н. HCl до перехода желтой окраски жидкости в слабо-розовую. Расчет ведется по формулам

$$X_1 = \frac{2V_n \cdot 30 \cdot 1000}{V_1}, \quad (7.6)$$

$$X_2 = \frac{(V_2 - V_1) n \cdot 61 \cdot 1000}{V_1}, \quad (7.7)$$

где X_1 и X_2 — количество CO_3^{2-} и HCO_3^- соответственно; V_1 и V_2 — объем раствора HCl , израсходованный на титрование воды соответственно с фенолфталеином и метиловым оранжевым.

Определение сульфат-иона SO_4^{2-}

Сульфат-ион определяют различными методами в зависимости от его содержания и требуемой точности. В полевых условиях применяется турбидиметрический метод, позволяющий установить содержание в воде сульфат-иона, если оно не превышает 70 мг/л. При определении SO_4^{2-} турбидиметрическим методом вода должна быть прозрачной и неопалесцирующей; мутные воды предварительно пропускают через фильтр. При содержании SO_4^{2-} более 70 мг/л применяют объемный трилонометрический метод.

Турбидиметрическое определение по Бутырину. Оно основано на измерении интенсивности помутнения, вызванного выделением в виде взвеси осадка BaSO_4 в мутномерной пробирке.

Пробирка градуирована до высоты 100 мм через 1 мм и имеет метку 10 мл. Внутренний диаметр пробирки — около 11,3 мм. При таком диаметре метки 10 мл и 100 мм будут совпадать и пробирку можно использовать при определениях как по методу Бутырина, так и по методу со стандартной шкалой. На дне пробирки наносят крест (толщина линий около 1 мм) и точки. Мутный раствор в такой пробирке рассматривают сверху и, если изображения на дне пробирки не видно, отбирают раствор из пробирки до тех пор, пока не появится рисунок. Высота столба раствора, при которой делается видимый рисунок, находится в определенной зависимости от интенсивности помутнения, а следовательно, концентрации SO_4^{2-} -иона.

Для анализа необходимы соляная кислота (1:1) и барий азотнокислый, получаемый путем растворения в 100 мл дистиллированной воды 10 г насыщенного раствора $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (при нагревании и последующем охлаждении до комнатной температуры).

При проведении анализа в мутномерную пробирку до метки 100 мм наливают исследуемую воду, прибавляют 0,5 мл раствора $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и две капли HCl (1:1). Жидкость перемешивают шариком-мешалкой и вставляют пробирку в гнездо мутномера таким образом, чтобы нижняя часть пробирки выступала в вырезе на 10—12 мм. Через 10 мин жидкость вновь перемешивают и отбирают пипеткой до тех пор, пока не появится едва заметное изображение креста. После этого прибавляют несколько капель мутной жидкости, пока изображение на дне пробирки вновь не скроется. Измеряют высоту столба жидкости и находят содержание SO_4^{2-} , пользуясь данными, приведенными ниже.

Высота столба раствора, мм	100	95	85	75	65	57	50	45	41	37	35	33
Содержание SO_4^{2-} , мг/л	. .	25	27	30	35	40	45	50	55	60	65	70

Если вода содержит менее 25 мг/л SO_4^{2-} , то на дне пробирки виден крест. В этом случае записывают результат определения: SO_4^{2-} меньше 25 мг/л.

Если вода содержит более 75 мг/л SO_4^{2-} , то ее разбавляют и производят ориентировочное определение SO_4^{2-} . Полученный по таблице результат умножают на кратность разбавлений.

Трилометрический метод. Определение сульфат-иона этим методом основано на титровании ионов бария, осаждающих сульфат-ион в виде BaSO_4 . Для определения SO_4^{2-} применяется прямое титрование избытка раствора трилона Б.

В качестве реактивов используются: соляная кислота 0,1 н.; барий хлористый 0,1 н.; буферный раствор (50 г NH_4Cl растворяют в дистиллированной воде, добавляют 250 мл 25 %-ного раствора аммиака и дистиллированную воду до 1 л); магний хлористый 0,1 н. (в дистиллированной воде растворяют 10,17 г $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и доводят объем в мерной колбе емкостью 1 л до метки, нормальность устанавливают раствором трилона Б); трилон Б, 0,025М раствор (9,307 г трилона Б растворяют в дистиллированной воде и доводят объем до 1 л); эриохром черный Т (0,5 г эриохрома черного Т (специальный ET-00) растирают с 50 г х.ч. NaCl); индикаторная бумажка конго.

Объем воды для определения отбирают, пользуясь данными, приведенными ниже, с таким расчетом, чтобы в нем содержалось не более 25 мг сульфат-иона, так как в присутствии большого осадка BaSO_4 нечетко устанавливается конец реакции.

<i>Общая жесткость воды, ммоль</i>	<i>Объем воды, мм</i>
0,5—7	50
7—15	25
15—50	20

Объем 0,1 н. раствора BaCl_2 для осаждения берут исходя из содержания SO_4^{2-} в анализируемой пробе, предварительно ориентировочно устанавливаемого турбидиметрическим методом. При содержании SO_4^{2-} 10, 20 и 25 мг количество BaCl_2 составляет соответственно 4, 6 и 7 мл.

Отмеренный объем воды вливают в коническую колбу, нейтрализуют 0,1 н. раствором HCl (цвет бумажки конго изменяется от красного до сиреневого), разбавляют дистиллированной водой до 50 мл * и прибавляют BaCl_2 . Затем раствор перемешивают и через 10 мин добавляют 1 мл буферного раствора, 1 мл 0,1 н. раствора MgCl_2 (для улучшения четкости титрования), около 0,1 г смеси индикатора эриохрома черного Т (ET-00) и титруют 0,025М раствором трилона Б до перехода винно-красной окраски раствора в голубую. Если переход окраски нечеткий, то добавляют еще 1 мл 0,1 н. MgCl_2 и оттитровывают трилоном Б. Титрование производят в присутствии «свидетеля», которым является перетитрованная проба.

* В случае присутствия в воде меди или марганца добавляют соответственно 1 мл 2 %-ного сульфида натрия и 1 мл 2 %-ного гидроксиламина солянокислого.

Содержание сульфат-иона вычисляют по формуле

$$X = \frac{V_{1n} - (V_2 2M - V_3 2M - V_4 n_1) \cdot 48 \cdot 1000}{V}, \quad (7.8)$$

где V_1 — объем раствора BaCl_2 ; V_2 и V_3 — объем раствора трилона Б, израсходованного соответственно на титрование и определение жесткости (в пересчете на объем воды, отобранной на определение SO_4^{2-}); V_4 — объем прибавленного раствора MgCl_2 ; V — объем воды, взятой для анализа; n и n_1 — нормальности соответствующих растворов; M — молярность раствора трилона Б.

Определение хлор-иона Cl^-

В полевых условиях хлор-ион определяют при помощи объемного аргенометрического и турбидиметрического методов. Объемный аргенометрический метод с индикатором K_2CrO_4 применяют для вод, содержащих Cl^- до нескольких граммов на литр, турбидиметрический метод используют для определения малых количеств хлора (до 20 мг/л). Осадок AgCl , фильтраты и промывные воды собирают для последующей регенерации серебра.

Объемное аргенометрическое определение с хроматом калия. Определение основано на титровании Cl^- раствором AgNO_3 в присутствии индикатора K_2CrO_4 . Первая капля избыточного раствора серебра образует с K_2CrO_4 осадок хромовокислого серебра, окрашивающего раствор в бурый цвет.

Реактивы: калий хромовокислый, 10 %-ный раствор; серебро азотнокислое, 0,1 н. раствор (17 г AgNO_3 растворяют в 1 л дистиллированной воды, нормальность раствора устанавливают по фиксажу NaCl с индикатором K_2CrO_4).

Производят два определения: ориентировочное и точное. Если по данным ориентировочного определения вода содержит большое количество Cl^- , то для точного определения ее разбавляют дистиллированной водой. Объем разбавленной воды для точного определения отбирают с таким расчетом, чтобы на одно определение расходовалось от 5 до 10 мл 0,1 н. раствора азотнокислого серебра.

1. Ориентировочное определение. В пробирку отмеривают пипеткой 1 мл исследуемой воды и прибавляют одну каплю 10 %-ного раствора хромовокислого калия. Затем при постоянном помешивании прибавляют из бюретки по каплям 0,1 н. раствор азотнокислого серебра до появления не исчезающей бурой окраски.

Расчет количества Cl^- производят по формуле

$$X = V_1 n \cdot 35,46 \cdot 1000, \quad (7.9)$$

где V_1 — объем раствора AgNO_3 , израсходованного на определение хлора в 1 мл воды; n — нормальность раствора AgNO_3 .

2. Точное определение. Если при ориентировочном определении было установлено, что содержание Cl^- в воде не превышает 400 мг/л, то точное определение производят в 50 мл воды (при более высоком содержании Cl^- для определения отбирают соответственно меньшее количество воды). К воде прибавляют 0,5 мл 10 %-ного раствора хромовокислого калия и титруют 0,1 н. раствором азотнокислого серебра по каплям при постоянном помешивании до появления не исчезающей бурой окраски жидкости.

Если на определение иона Cl^- в V миллилитрах воды было израсходовано V_1 миллилитров раствора азотнокислого серебра нормальности n , то в 1 л воды содержится хлор-иона

$$X_1 = \frac{V_1 \cdot 35,46 \cdot 1000}{V} \cdot n \quad (7.10)$$

Турбидиметрическое определение. В пробирку наливают 10 мл исследуемой воды, прибавляют пять капель 5 %-ного раствора AgNO_3 и две капли HNO_3 (1 : 1) и через 1 мин сравнивают степень помутнения исследуемой воды с помутнением стандартных растворов, рассматривая пробирки сбоку на черном фоне. Прямое определение возможно при содержании Cl^- до 5 мг/л. Этим методом из разбавленной в два раза пробы можно определить большие содержания (до 10 мг/л) хлора.

Для приготовления шкалы стандартных растворов в несколько одинаковых пробирок, градуированных на 10 мл, вносят последовательно 1, 2, 3, 4 и 5 мл стандартного раствора хлорида натрия, содержащего 10 мг Cl^- в 1 л. Объем жидкости в пробирках доводят дистиллированной водой до 10 мл (что соответствует содержанию Cl^- в эталонах от 1 до 5 мг/л) и прибавляют в каждую пробирку по две капли HNO_3 (1 : 1) и по пять капель 5 %-ного раствора AgNO_3 .

Определение кальций-иона Ca^{2+}

Для определения кальция в водах чаще всего используется трилонометрический метод с индикатором мурексидом (аммониевой солью пурпуровой кислоты). Оно основано на образовании ионами кальция с мурексидом малодиссоциированного, прочного при рН 10 соединения, окрашенного в малиновый цвет. При титровании кальций связывается с трилоном Б в еще менее диссоциированный комплекс и мурексид окрашивает щелочной раствор в фиолетовый цвет.

Реактивы: кислота соляная, 0,05—0,1 н. раствор; натрий едкий, 2 н. раствор; трилон Б, 0,025 М раствор (9,307 г трилона Б растворяют в дистиллированной воде и доводят объем до 1 л); мурексид (растирают в ступке 1 г мурексида и 100 г NaCl); индикаторная бумажка конго.

В коническую колбу емкостью 250 мл наливают исследуемую воду в объеме, содержащем не более 0,5 ммоль $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, и доводят объем дистиллированной воды до 50 мл. За-

тем в колбу опускают небольшой кусочек бумажки конго и при постоянном перемешивании прибавляют по каплям 0,05—0,1 н. раствор HCl до перехода окраски индикаторной бумажки из красной в сиреневую. Бумажку извлекают стеклянной палочкой и через раствор в течение 5 мин продувают воздух с помощью груши. К раствору прибавляют 2,5 мл 2 н. раствора едкого натра и 30—50 мг сухой смеси мурексида с хлористым натрием.

Подготовленную таким образом жидкость титруют 0,02 М раствором трилона Б (в присутствии «свидетеля») до перехода окраски в фиолетовый цвет, устойчивый в течение 3 мин.

Содержание иона кальция вычисляют по формуле

$$X = \frac{V_1 M \cdot 40,08 \cdot 1000}{V}, \quad (7.11)$$

где V_1 — объем раствора трилона Б; M — молярность раствора трилона Б; V — объем исследуемой воды, мл.

Определение магний-иона Mg^{2+}

Определение магния поровых вод в полевых условиях производится главным образом при помощи трилонометрического метода. Метод основан на титровании иона магния трилоном Б в присутствии индикатора, эриохрома черного в том же растворе, в котором ионы кальция были связаны в комплекс трилоном Б в присутствии индикатора мурексида. До титрования магния окраска, вызванная мурексидом, должна быть разрушена.

Реактивы: кислота соляная (1:2); буферный раствор (50 г х. ч. NH_4Cl растворяют в дистиллированной воде, добавляют 250 мл 20 %-ного раствора аммиака и доводят объем раствора дистиллированной водой до 1 л); трилон Б, 0,25 М раствор; эриохром черный Т (растирают в ступе 1 г индикатора и 100 г хлористого натрия х. ч.); индикаторная бумажка конго.

Пробу воды после определения иона кальция с мурексидом в течение нескольких часов оставляют на холоде. Затем раствор нейтрализуют HCl (1:2) до перехода окраски бумажки конго из красной в сиреневую. Прибавляют 2 мл буферного раствора, 0,1 г сухой смеси эриохрома черного с хлоридом натрия и титруют 0,025 М раствором трилона Б (в присутствии «свидетеля») до перехода окраски жидкости в сине-зеленый цвет.

Содержание иона магния вычисляют по формуле

$$X = \frac{V_1 M \cdot 24,32 \cdot 1000}{V}. \quad (7.12)$$

Определение иона аммония NH_4^+

Определение иона NH_4^+ производится колориметрическим методом с помощью щелочного раствора йодомеркуриата калия, так называемого реактива Несслера. При действии этого реак-

тива на растворы, содержащие ион NH_4^+ , происходит образование йодида димеркураммония, окрашивающего их в желтый цвет. При больших содержаниях NH_4^+ выпадает желто-бурый осадок. В полевых условиях определение выполняется на небольшом объеме воды в пробирках. Стандартной шкалой служит окрашенная пленка.

Колориметрический метод дает возможность определять ион NH_4^+ при его содержании от 0,05 до 5 мг/л. Определение следует производить в комнате, воздух которой не содержит аммиака и солей аммония.

Исследуемую воду наливают в пробирку до метки 5 мл, всыпают примерно четверть стеклянной лопаточки не содержащей аммонийных солей сегнетовой соли, удерживающей кальций и магний в растворе, взбалтывают содержимое пробирки до растворения кристаллов и прибавляют три капли реактива Несслера. Раствор снова взбалтывают и через 3 мин сравнивают окраску раствора в пробирке со стандартной шкалой на пленке. Сравнение производят в компараторе, рассматривая раствор в пробирке сверху.

Если окраска жидкости окажется интенсивнее самого яркого эталона, раствор колориметрируют, рассматривая содержимое пробирки сбоку. В таких случаях полученный результат утраивают. Если при рассмотрении сбоку окраска окажется ярче крайнего эталона, воду разбавляют и определение повторяют.

Примерное содержание NH_4^+ можно определить, пользуясь данными, приведенными ниже.

<i>Цвет раствора</i>	<i>Содержание NH_4^+, мг/л</i>
Весьма светло-желтоватый	0,08
Светло-желтоватый	0,2
Желтоватый	0,4
Светло-желтый	0,8
Желтый	2
Буро-желтый	4
Буро-желтый, мутный	≥ 10

Определение нитрат-иона NO_3^-

Нитрат-ион NO_3^- встречается главным образом в водоемах населенных пунктов (колодцах, прудах и т. п.). Он часто является показателем санитарного состояния воды. Вместе с минеральными удобрениями его вносят в почву, и благодаря своей высокой миграционной способности он может накапливаться в грунтовых водах.

В полевых условиях применяют экспрессное колориметрическое определение, позволяющее определить NO_3^- при содержании его от 5 мг/л и более. Метод основан на восстановлении в щелочном растворе NO_3^- до NH_4^+ на холоде без отгонки. Восстановление производится с помощью сплава Дебарда.

У Определение NH_4^+ производится колориметрическим методом с помощью реактива Несслера. Определению NO_3^- обязательно предшествует определение NH_4^+ в исследуемой воде и во всех применяемых реактивах. Воздух в помещении, где производится определение, не должен содержать паров аммиака.

Натрий едкий, 20 %-ный раствор (растворяют 20 г реактива в 80 мл дистиллированной воды), очищают от ионов NO_3^- и NH_4^+ . Для этого к 0,5 л раствора в стакане прибавляют 0,1 г сплава Дебарда и слабо нагревают до прекращения бурной реакции, затем нагревают до кипения и кипятят в течение 1 ч. После охлаждения раствор отделяют от сплава Дебарда, сливая в склянку с притертой пробкой, предварительно промытую дистиллированной водой, лишенной аммиака; реактив Несслера; сплав Дебарда (5 частей Cu , 5 частей Zn и 45 частей Al ; крупные куски реактива измельчают в фарфоровой ступке); дистиллированная вода.

Дистиллированную воду проверяют на содержание NH_4^+ . Если она содержит NH_4^+ , то к 1 л воды прибавляют 1—2 мл 20 %-ного раствора NaOH и кипятят в течение 1 ч. Воду хранят в хорошо закупоренной склянке.

В пробирку емкостью 25 мл помещают 20 мл исследуемой воды, прибавляют 1 мл 20 %-ного раствора NaOH и около 0,1 г сплава Дебарда. Пробирку закрывают фильтровальной бумагой и оставляют на срок не менее 10 ч. Одновременно выполняют контрольное определение. Для этого в пробирку наливают 20 мл дистиллированной воды без NH_4^+ , 1 мл 20 %-ного раствора NaOH и 0,1 г сплава Дебарда. Раствор перемешивают и оставляют на такой же срок. Затем осторожно, не взмучивая осадка, пипеткой отбирают по 5 мл восстановленных растворов, переносят их в пробирки для колориметрирования и прибавляют по 3 капли реактива Несслера. Растворы взбалтывают и через 3 мин колориметрируют в компараторе, рассматривая содержимое пробирки сверху, используя в качестве стандартной шкалу, окрашенную на пленке. Если окраска жидкости интенсивнее самого яркого эталона шкалы, раствор колориметрируют, рассматривая содержимое пробирки сбоку. В этих случаях полученный результат угаивают.

Если при изучении сбоку окраска окажется ярче крайнего эталона, определение повторяют. Для этого берут 1 мл восстановленного раствора, переносят его в пробирку с меткой на 5 мл, доливают до метки дистиллированной водой без NH_4^+ (т. е. разбавляют исследуемую воду в пять раз), прибавляют три капли реактива Несслера и выполняют определение, как описано выше. В случае, если окраска жидкости в пробирке окажется интенсивнее самого яркого эталона, на определение берут 1 мл восстановленного раствора, переносят в пробирку с меткой на 10 мл и доливают до метки дистиллированной водой без NH_4^+ . Раствор перемешивают и отбирают 1 или 2 мл, переносят в пробирку с меткой на 5 мл, доводят дистиллирован-

ной водой до метки (т. е. разбавляют исследуемую воду в 50 или 25 раз), прибавляют три капли реактива Несслера, перемешивают раствор и выполняют определение, как описано выше.

Содержание нитрат-иона рассчитывают по формуле

$$X = [a - (b + b')] \cdot 3,4, \quad (7.13)$$

где a — содержание NH_4^+ , установленное после восстановления в исследуемой воде; b — содержание NH_4^+ в воде, найденное при определении иона аммония; b' — содержание NH_4^+ в холстой пробе; 3,4 — переводной коэффициент (с NH_4^+ на NO_3^-).

В случае определения нитрат-иона в разбавленной воде расчет его содержания производят по формуле

$$X = [aA - (b - b')] \cdot 3,4, \quad (7.14)$$

где A — число, показывающее, во сколько раз была разбавлена исследуемая вода.

Колориметрическое определение закисного железа с α^- , α' дипиридиллом

Метод основан на способности ионов двухвалентного железа взаимодействовать в слабокислой среде с органическим основанием — дипиридиллом, образуя комплексное соединение розового цвета. Чувствительность метода позволяет определить железо при его содержании более 0,2 мг/л.

Реактивы: буфер ацетатный $\text{pH} \sim 4$ (смешивают равные объемы растворов 1 н. уксуснокислого натрия и 5,5 н. уксусной кислоты. Раствор уксуснокислого натрия готовят растворением 68 г $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ в дистиллированной воде в колбе емкостью 500 мл. Для приготовления раствора уксусной кислоты 167 г ледяной уксусной кислоты разбавляют до 500 мл дистиллированной водой); α^- , α' дипиридил, 0,5 %-ный раствор (0,5 г реактива растворяют в 100 мл 0,001 н. раствора); тимоловый синий, 0,04 %-ный раствор (растирают стеклянным пестиком на часовом стекле 0,04 г реактива с 8,5 мл 0,01 н. раствора NaOH , раствор сливают дистиллированной водой в мерную колбу на 100 мл и доливают водой до метки).

Стандартный раствор готовят следующим образом: 0,702 г соли Мора $\text{FeSO}_4 (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ растворяют в 500 мл ацетатного буферного раствора, переносят в мерную колбу емкостью 1 л и доливают водой до метки. Полученный раствор содержит 100 мг/л Fe^{2+} . Рабочий стандартный раствор, содержащий 10 мг/л Fe^{2+} , готовят непосредственно перед употреблением, разбавляя приготовленный раствор дистиллированной водой в 10 раз.

Исследуемую воду наливают в пробирку до метки 5 мл, прибавляют одну каплю 0,04 %-ного раствора тимолового синего. Если раствор окрасится в фиолетовый цвет, по каплям прибавляют ацетатный буфер до перехода окраски раствора

в желтый цвет. Затем добавляют 0,25 мл 0,5 %-ного раствора α -, α' дипиридила. Раствор в пробирке перемешивают и спустя 5 мин образовавшуюся окраску сравнивают в компараторе со стандартной шкалой, окрашенной на пленке, или со шкалой жидких эталонов, приготовленной в тех же условиях и содержащих 0,25—0,5; 0,5—1; 1—4; 4—8; 8—10 мг/л закисного железа.

Примерное содержание иона закисного железа может быть определено исходя из данных, приведенных ниже.

Цвет раствора	Содержание Fe^{2+} , мг/л
Светло-желто-оранжевый	0,25—0,5
Светло-оранжево-красный	0,5—0,1
Темно-оранжево-красный	1—4
Светло-красный	4—8
Красный	8—10

Колориметрическое определение иона окисного железа роданидным методом

При действии роданистого калия или аммония на раствор солей трехвалентного железа образуются комплексные соединения роданида и железа, окрашенные в красный цвет. Определение окисного железа рекомендуемым методом возможно при его содержаниях в водах от 0,1 до 5 мг/л; при большем содержании исследуемая вода должна быть соответственно разбавлена.

Реактивы: калий кислый серноокислый $KHSO_4$ х. ч., калий роданистый, 10 %-ный раствор (10 г $KCNS$ х. ч. или ч. д. а. растворяют в 90 мл дистиллированной воды, раствор хранят в темном месте).

Стандартный раствор готовят следующим образом: 0,863 г железозаммиачных квасцов $FeNH_4(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ прибавляют в мерной литровой колбе в дистиллированной воде, прибавляют 5 мл концентрированной H_2SO_4 (плотность 1,84) и доводят водой до метки. Полученный раствор содержит 100 мг/л Fe^{3+} . Рабочий стандартный раствор, содержащий 10 мг/л Fe^{3+} , готовят непосредственно перед употреблением разведением приготовленного раствора дистиллированной водой в 10 раз.

Исследуемую воду наливают в пробирку до метки 5 мл, прибавляют около 0,2 г $KHSO_4$ и 0,5 мл 10 %-ного раствора $KCNS$. Раствор взбалтывают и через 3 мин колориметрируют в компараторе, рассматривая окраску сверху и сравнивая ее со стандартной окрашенной шкалой на пленке или с жидкой стандартной шкалой, приготовленной в тех же условиях и содержащей 0,1; 0,5; 1; 2; 3; 5 мг/л Fe^{3+} . Пересчетный коэффициент с Fe^{3+} на $Fe(OH)$ равняется 1,9. Примерное содержание окисного железа может быть определено с помощью данных,

приведенных ниже. Цвет раствора устанавливается в пробирке наблюдением сверху вниз.

<i>Цвет раствора</i>	<i>Содержание Fe³⁺, мг/л</i>
Едва слабо-желтовато-розовый	0,05—0,1
Слабо-желтовато-розовый	0,1—0,5
Желтовато-розовый	0,5—1,0
Желтовато-красный	1,0—2,0
Красный	> 2,0

Расчетные методы

Определение натрий-иона Na⁺. В правильно проведенном анализе суммы эквивалентов катионов и анионов равны. Зная количество миллимолей всех анионов и сумму всех миллимолей катионов, за исключением натрия, по разности получают его значение.

Определение общей жесткости. Определяют раздельно ион кальция и ион магния и полученные результаты (в миллимолях на литр) суммируют.

Определение карбонатной жесткости. Карбонатную жесткость выражают через содержание миллимолей гидрокарбонатов и карбонат-ионов (HCO₃⁻+CO₃²⁻) в 1 л воды. Если количество HCO₃⁻+CO₃²⁻ в воде больше, чем кальция и магния, то карбонатную жесткость принимают равной общей жесткости.

Содержание минеральных веществ в воде (минерализация) определяется суммированием всех определенных ионов (в г/л).

Глава 8

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ГАЗОВОГО КОМПОНЕНТА ПОРОД

8.1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОВОГО КОМПОНЕНТА ПОРОД

Наряду с жидким компонентом поры в грунтах могут быть заполнены газами, и практически все горные породы в том или ином количестве содержат газовый компонент. Газообмен между атмосферой и толщей пород вызывается рядом факторов: диффузным перемешиванием газов, колебаниями температуры и давления воздуха, атмосферными осадками, ветром и др. Однако атмосферный воздух отличается количественным и качественным составом от газового компонента горных пород. Это обусловлено как биохимическими процессами в породах, так и влиянием различных физико-химических процессов, протекающих в горных породах и определяемых геологической историей их развития. Наряду с природными факторами существенное воздействие на изменение газового состава грунтов

оказывает инженерная деятельность человека, особенно в крупных промышленных районах.

В составе газового компонента грунта количество CO_2 в несколько раз больше, чем в атмосфере. Углекислый газ в 1,5 раза тяжелее воздуха и характеризуется повышенной растворимостью в поровой воде. Содержание кислорода в порах грунтов обычно ниже, чем в воздухе, так как кислород обладает высокой химической активностью и расходуется за счет поглощения корнями растений и жизнеобеспечения некоторых микроорганизмов. В земной коре кислород встречается редко, в небольших количествах и лишь в самой верхней части литосферы. Содержание азота в поровом пространстве несколько больше, чем в воздухе атмосферы. Водород наиболее легкий газ (в 14,5 раз легче воздуха), в результате чего он мигрирует в поверхностные толщи пород. Водород является газом преимущественно метаморфического происхождения. Его содержание в верхних горизонтах почти соответствует содержанию в воздухе. Большое практическое значение как полезное ископаемое могут иметь содержащиеся в грунтах такие газы, как метан, сероводород и тяжелые углеводороды. В чистом виде метан присутствует в болотных грунтах. Скопление его и тяжелых углеводородов (этана, пропана, бутана) в толщах земной коры может достичь больших размеров. Эти газы являются спутниками нефтяных месторождений. В состав газообразного компонента входит также вода в виде пара. Кроме того, в грунтах встречаются инертные газы: тяжелые — аргон, криптон, ксенон и легкие — гелий, неон. Они не образуют свободных скоплений и встречаются в виде примесей, в количестве не выше 1 % к углеводородным и азотным газам. Однако гелий представляет исключение, его содержание в газах достигает нескольких процентов и увеличивается за счет природных процессов радиоактивного распада.

По физическому состоянию газ в грунтах делится на свободный, заземленный, адсорбированный и растворенный [14, 38].

Свободный газ находится в крупных капиллярных и открытых порах, сообщающихся с атмосферой. Это наиболее подвижная форма газового компонента пород. Содержание этой категории газа в породах меняется в зависимости от влажности пород (возрастает с ее уменьшением). Подвижность свободного газа падает при уменьшении диаметра капилляров. Наличие свободного газа в грунтах оказывает влияние в основном на физические свойства: теплоемкость, теплопроводность и электропроводность.

Заземленный газ — это часть свободного воздуха, находящегося в замкнутых порах, не сообщающихся с атмосферой. Он имеет значение при учете упругих характеристик грунта и нарушениях его устойчивости при динамических воздействиях, обуславливает многолетние осадки грунта, влияет на его струк-

туру, теплофизические, электрические и фильтрационные свойства, а также на капиллярное поднятие воды.

Адсорбированный газ. При небольших значениях влажности (меньше максимальной гигроскопичности) грунты способны сорбировать газы, находящиеся в порах. Поглощение газов твердым компонентом грунта может обуславливаться рядом процессов. Физическая адсорбция — обратимое сгущение газа на поверхности грунтовых частиц за счет действия сил молекулярного притяжения, при котором молекулы газа сохраняют индивидуальность. Хемосорбция — необратимое поглощение вследствие образования химической связи между молекулами твердого компонента и газом. Сорбция (суммарный процесс поглощения) газов породами зависит от строения первых. Газы, имеющие полярное строение молекул (NH_3 , H_2S , H_2O), поглощаются тем интенсивнее, чем выше их дипольный момент. Сорбция газов пропорциональна их давлению и обратно пропорциональна температуре. Кроме того, она во многом обусловлена составом и свойствами поверхности адсорбента. Сорбция тем выше, чем больше дисперсность грунта. Наибольшей поглощательной способностью по отношению к газам обладают: из глинистых минералов — монтмориллонит, гумус и полуторные окислы; меньшей — кварц, карбонаты, гипс. Объем, концентрация и состав адсорбированных газов в породе определяются, кроме того, концентрацией и составом свободного и заземленного газа в порах породы. При уменьшении содержания свободных газов в порах породы количество и состав адсорбированных газов также меняются в результате десорбции, что необходимо учитывать при отборе проб адсорбированных газов.

Растворенный газ присутствует в жидком компоненте грунтов и образуется в результате процессов адсорбции и диффузии. Газы, входящие в состав грунтов, имеют различную растворимость в воде. Наибольшей растворимостью обладают аммиак, сероводород, уголекислота. Растворимость в воде газов возрастает с увеличением их парциального давления и с понижением температуры. В ряде случаев она увеличивается также с повышением минерализации воды.

Газы, растворенные в поровом растворе, существенно меняют его свойства. Увеличение содержания CO_2 в газовой составляющей приводит к увеличению содержания уголекислоты в воде, что способствует повышению растворимости карбонатов, сульфатов, гипса и других минеральных компонентов. Наличие свободной CO_2 в подземных водах определяет их агрессивность по отношению к бетону.

Окислительно-восстановительные свойства порового раствора определяются растворенными в нем O_2 , N_2 , H_2S и другими газами и их соотношением. Так, инфильтрующиеся после снеготаяния воды содержат избыток O_2 , который придает грунтовым водам окислительные свойства. С увеличением глубины из-за отсутствия доступа кислорода поровые растворы приобретают

в основном восстановительные свойства. Окислительно-восстановительные процессы приводят к миграции некоторых элементов особенно в верхних горизонтах земной коры, результатом чего являются процессы химического выветривания. Кроме того, они увеличивают коррозионную активность грунтов. В ряде случаев увеличение содержания газов в поровом растворе под действием биохимических процессов приводит к росту порового давления и изменению физико-механических свойств пород.

8. 2. ОПРОБОВАНИЕ ПОРОД С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ СВОБОДНОГО, ЗАЩЕМЛЕННОГО И АДСОРБИРОВАННОГО ГАЗА

В инженерно-геологических исследованиях полевые методы изучения состава газового компонента грунтов применяются редко. Наибольший опыт в этой области накоплен почвоведом [7] и нефтяниками-геофизиками.

Получение пробы газового компонента грунта в полевых условиях представляет большие трудности, так как при отборе его необходима тщательная герметизация аппаратуры во избежание проникновения атмосферного воздуха в анализируемую среду. В зависимости от глубины можно использовать различные способы отбора газа.

При отборе с небольших глубин (до 2,5 м) пользуются в основном двумя способами. Первый основан на отборе газа с помощью бура. При этом остается неизвестным объем грунта, из которого отобран газ. Пробу, полученную таким путем, можно использовать для определения состава газового компонента грунта на определенной глубине и только очень приблизительно можно судить о количестве газа и его распределении. Вторым методом — получение пробы грунта определенного объема и вытеснение из нее газа жидкостью или путем отсасывания насосом. При этом можно определить состав газа и количество его в единицах массы и объема.

Буровой метод использует иглы-буры различных конструкций. Игла-бур Вершинина—Поясова (рис. 20) изготавливается из металлической трубы определенной длины (50, 100, 150, 200 см и т. д.), в которую вставлен шток 5 с запирающимся наконечником 7. Шток диаметром 11 мм плотно входит в трубу 6 и увеличивает ее прочность. Конусообразный наконечник штока герметически закрывает иглу при введении ее в грунт. Газ из грунта и канала иглы забирают через штуцер 4. При заглублении иглы в грунт с помощью сальника 3 отключают атмосферный воздух. Штуцер и сальник монтированы в насадку 1. На верхней части трубы крепится массивная насадка-головка 2. Ударами молота по головке бур погружают в грунт на заданную глубину. После этого головку или колпак можно снять. При помощи ключа 8 вращением вправо заглубляют наконечник и шток на 1—3 мм. Между торцевой частью трубы и наконечником появляется свободное от грунта кольцевое простран-

ство, в которое устремляется газ. По продольному пазу на штоке газ поступает в приемную камеру и через штуцер по резиновой трубке в пипетку для воздуха или прямо в газоанализатор.

Игла-бур М. Т. Ястребова [7] представляет собой полую трубку, нижняя часть которой (длиной 0,35 м) сточена на конус. Рабочая часть — острый конус длиной 0,02 м, на расстоянии 0,035—0,04 м от конца которого в суженной части расположены три газозаборных отверстия диаметром 2 мм, сделанные в высеченных квадратах, расположенных по спирали.

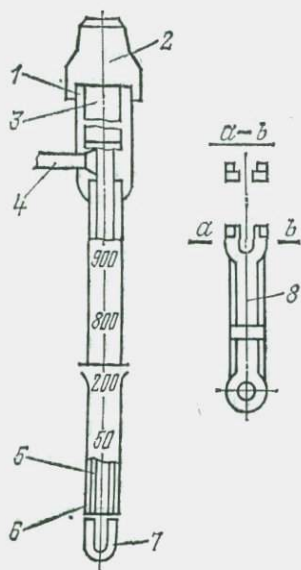
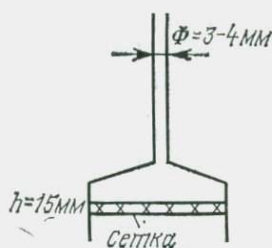


Рис. 20. Игла-бур Вершинина—Поясова

Рис. 21. Трубка с воронкой для стационарных наблюдений



Такое расположение отверстий для забора газового компонента снижает давление грунта и предохраняет отверстия от забивания. Иглу М. Т. Ястребова можно применять в слабых грунтах или использовать для стационарных наблюдений в верхних горизонтах. Для стационарных наблюдений могут быть использованы специальные трубки, оканчивающиеся воронкой диаметром 0,04 м и высотой 0,03—0,04 м (рис. 21). В воронку вделана металлическая сетка. Чтобы предохранить сетку от забивания грунтом, на ее поверхность кладут стеклянную вату, которую перед погружением воронки в скважину укрепляют нитками. В грунте бурят скважину на заданную глубину. Керн из скважины складывают рядом и после установки воронки возвращают в скважину. Грунт вокруг газовой трубки уплотняют по возможности до естественной плотности и производят отбор газовых проб во времени.

Для отсасывания пробы газа из грунта можно использовать пипетку Зегера объемом 200—300 мл, наполненную насыщен-

ным раствором NaCl (рис. 22). На концах пипетка закрывается притертыми кранами. Концы пипетки присоединяют к буру и вакуумному устройству — аспиратору, заполненному NaCl, или ртутному насосу. Сначала из грунта отбирают 50 мл газовой пробы для промывки системы, затем пипетку отъединяют от иглы и наполняют раствором. Отверстие штуцера иглы должно быть изолировано от атмосферного воздуха, для чего на штуцер надевают резиновую трубку с зажимом. Затем вновь присоединяют пипетку Зегера к штуцеру иглы и проводят забор газа.

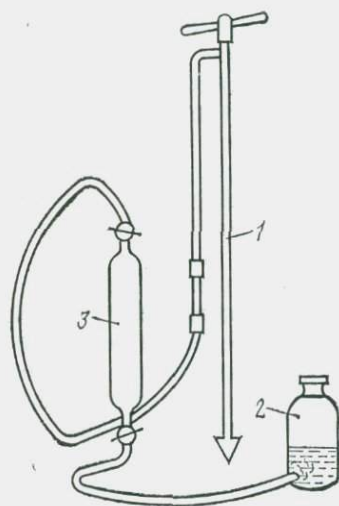


Рис. 22. Установка для отбора проб почвенного воздуха:
1 — игла-бур Ястребова; 2 — напорная склянка; 3 — пипетка Зегера

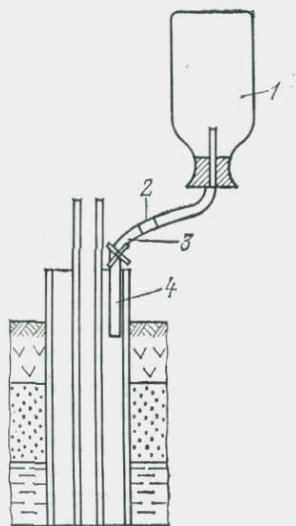


Рис. 23. Прибор для отбора пробы пульпы из затрубного пространства:
1 — стеклянная бутылка; 2 — переходник; 3 — кондуктор; 4 — пробоотборник

После наполнения пипетки ее помещают в специальный ящик и взятую пробу анализируют в полевых условиях или в лаборатории.

Определение состава газового компонента на глубине из скважин слагается из отбора проб бурового раствора, керна и шлама, извлечения газов из отобранных проб и анализа извлеченного газа. Отбор проб является одним из наиболее ответственных этапов, определяющих качество газометрических работ. Пробы газа из промывочной жидкости отбирают в процессе бурения скважины согласно требованиям анализа. Например, при оценке углеводородных и неуглеводородных газов следует брать не менее 1,5 л промывочной жидкости. Содержание атмосферного воздуха и других газов, растворенных в промывочной жидкости в момент ее закачки в скважину, учитывается путем отбора контрольных проб.

Прибор для отбора проб промывочной жидкости представляет собой стеклянную бутылку емкостью 0,5 л (рис. 23), в горлышко которой вставлена резиновая пробка с отверстием. Сквозь это отверстие проходит стеклянная или металлическая трубка диаметром 5—7 мм; нижний ее конец находится под обрезом пробки, а верхний выступает на 2,5—3 см над ней. На трубку надевается вакуумная каучуковая трубка с зажимом. Перед работой пробоотборники должны быть хорошо промыты, пропарены, выборочно проверены на чистоту и затем вакуумированы. Для вакуумирования пробоотборник соединяют с вакуумным насосом (например, насосом Камовского) и производят откачку. Остаточное давление в сухих пробоотборниках не должно превышать 266,6—533,3 Па. Отбор проб промывочной жидкости можно проводить непосредственно из желоба или затрубного пространства. При отборе проб из желоба применяют каучуковую трубку, которую опускают в промывочную жидкость, затем открывают зажим и соединяют вакуумированную полость пробоотборника с желобной системой.

При отборе промывочной жидкости из затрубного пространства между буровой штангой и обсадной трубой опускают шланг длиной 1—1,5 м, непогруженный конец которого должен оканчиваться переходником. После заполнения шланга буровым раствором его через переходник соединяют с пробоотборником (см. рис. 23). Для отбора промывочной жидкости или шлама с нужной глубины надо знать отставание промывочной жидкости — время, необходимое для подъема ее от забоя до устья скважины, которое может быть определено расчетным или индикаторным способами, описанными в соответствующих руководствах.

Отбор газа из проб керна и шлама. Пробы керна и шлама на газовый анализ отбирают с герметизацией их (с сохранением пластового гидростатического давления) или с помощью керноприемной колонковой трубы с последующей герметизацией их на поверхности после извлечения из колонковой трубы. Для герметизации керна непосредственно на забое применяют керногазоотборник КС-2М, представляющий собой буровой снаряд диаметром 89 мм, который спускают в забой на колонне бурильных труб. Интервал проходки КС-2М составляет 0,5—0,6 м, диаметр керна — 32—36 мм, максимальная глубина бурения — 1200 м.

При отборе керна с герметизацией на поверхности пробу массой 400—600 г отбирают сразу после извлечения керна из колонковой трубы. Ее быстро очищают от глинистого раствора стерильным ножом, взвешивают, помещают в стеклянную банку или бутылку с широким горлом емкостью 0,5 м и герметизируют. Пробы шлама отбирают только тогда, когда это позволяет состав вскрываемых скважиной пород (карбонатные породы, аргиллиты). Как и пробы глинистого раствора, их отбирают в процессе бурения скважин, через каждые 5—6 м проходки. Пробы

(массой 400—600 г) следует брать непосредственно из желоба, как можно ближе к устью скважины, с помощью сит. Пробу необходимо промыть чистой водой, не содержащей газов, взвесить, положить в банку вместимостью 0,5 л или в бутылку с широким горлом и герметизировать. Привязка проб шлама к глубине производится по времени, затраченному на его транспортировку от забоя скважины до устья. Все отобранные пробы керна трижды дегазируются на месте в керноприемной камере: сначала отбирают пробы газа, свободно выделившегося из керна, а затем керноприемную камеру соединяют с прибором ПТП и откачивают пробу газа, выделившегося из керна под вакуумом без нагрева и с нагревом. После этого керн извлекают из приемной камеры, помещают в стеклянную банку, герметизируют и дегазируют обычным способом. При отборе проб газа его количество измеряют с точностью до 1 см³.

8.3. ОПРОБОВАНИЕ ПОРОД С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ

Для изучения состава растворенных газов производят отбор проб воды из скважин, естественных водопроявлений и в отдельных случаях из колодцев. Отбор воды с глубины 500 м и более из пьезометрических и наблюдательных скважин, в которых статический уровень находится на глубине, производится специальным пробоотборником или батометром (рис. 24). Следует обращать внимание на состояние скважины с точки зрения возможности проникновения в нее загрязнений из воздуха или поверхностных вод.

В процессе испытания каждого водоносного горизонта в скважине проводят весь комплекс гидрогеологических исследований: предварительную откачку воды до установления постоянного химического состава (по хлору), замеры статического и динамического уровней, дебита, температуры. Пробы на газовую составляющую отбирают пробоотборником, одновременно отбирая газ, свободно выделяющийся в процессе бурения.

Пробы воды на газовый анализ из переливающихся и фонтанирующих скважин отбирают в вакуумированные бутылки (аналогично отбору проб глинистого раствора). Все операции по заполнению бутылей необходимо производить как можно быстрее, чтобы избежать потерь газовых компонентов и попадания в пробу микроорганизмов из воздуха. Воду в бутылки следует наливать доверху, оставляя под пробкой свободное пространство высотой не более 3 см. Газовую составляющую из воды извлекают методом дегазации аналогично методу получения газа из бурового раствора, описанному выше.

При газовом анализе воды некоторые определения следует производить или непосредственно на месте взятия пробы, или через непродолжительное время после ее отбора. Если это не-

возможно, то следует принять меры по консервированию наименее устойчивых составных частей газового компонента воды (сероводород и агрессивная углекислота). Для определения агрессивной углекислоты следует взять специальную пробу воды в склянку вместимостью 250—300 мл с добавкой мелко истертого и хорошо промытого чистого CaCO_3 (две-три части на пробу). Надо иметь в виду, что для вычисления содержания агрессивной углекислоты необходимо знать содержание HCO_3^- в исследуемой воде до внесения CaCO_3 . Если общий анализ исследуемой воды не производится, то одновременно с пробой на агрессивную углекислоту необходимо взять в склянку емкостью 250—300 мл специальную пробу (без добавки CaCO_3) для определения содержания HCO_3^- .

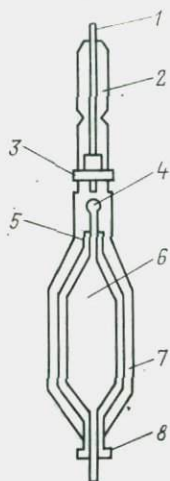


Рис. 24. Батометр:

- 1 — трос; 2 — посыльный груз; 3 — боек с пружиной; 4 — капсюль; 5 — головка; 6 — стеклянный баллон; 7 — металлический корпус; 8 — стеклянная пробка

8.4. ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА ГАЗОВОГО КОМПОНЕНТА ПОРОД

Для проведения газового анализа в полевых условиях может быть использована передвижная геохимическая лаборатория ПГЛ-2, предназначенная для работы при температуре окружающего воздуха от -10 до $+30$ °С. С помощью аппаратуры такой лаборатории можно производить термовакuumную дегазацию вод, буровых растворов и образцов горных пород, а также компонентный анализ извлеченных проб газа для определения предельных и непредельных углеводородов C_1 — C_8 , изомеров C_4 — C_6 при их концентрации по метану от $2 \cdot 10^{-6}$ до

100 % и неуглеводородных газов (кислорода, азота, углекислоты, гелия) при концентрации от $5 \cdot 10^{-3}$ до 90 %. Время дегазации одной пробы составляет 10 мин, время компонентного анализа — 25 мин, подготовка лаборатории к работе в летнее время занимает 10 мин, а в зимнее — 20 мин.

В состав лаборатории входит дегазатор ПГЛ-2, предназначенный для извлечения газа из проб воды, промывочной жидкости и образцов горных пород. Принцип его действия состоит в одновременном воздействии температуры и вакуума на дегазируемую пробу с последующим, циклически повторяющимся отводом извлеченного газа в измерительную бюретку. В результате этой цикличности равновесие между газом, содержащимся в пробе, и вне ее нарушается, что вместе с постоянством вакуума в реакционном пространстве дегазатора способствует более полному извлечению газа из дегазируемых проб. Отвод извлеченного газа осуществляется вручную или автоматически

с помощью блока управления дегазатором. Температура дегазации после ее установки поддерживается автоматически.

Для анализа газа в лабораторию ПГЛ-2 входит газовый хроматограф — прибор, предназначенный для количественного определения состава природных газов. Описание, порядок работы и обработка результатов газовой хроматографии подробно описаны во втором томе настоящего руководства. Наряду с передвижной газовой лабораторией в практике почвенных и гидрогеологических исследований используются некоторые простейшие виды анализов, которые могут быть проведены в полевых условиях.

Определение кислорода. В колбу с исследуемым газом вносят пипеткой 15—20 мл щелочного раствора KI и 40—60 мл сернокислого или хлористого марганца (для понижения поверхностного натяжения и ускорения реакции добавляют 1—2 капли изоамилового спирта); затем отверстие тубуса закрывают каучуковой пробкой. Для поглощения кислорода содержимое тщательно взбалтывается в течение 20—25 мин. При этом окраска жидкости переходит из бесцветной в бурую, затем в темно-коричневую, почти черную, не изменяющуюся при дальнейшем взбалтывании. В колбу быстро вносится 20—25 мл концентрированной HCl или H₂SO₄ (разбавление 1:1). Содержимое колбы взбалтывается; при этом выделяется йод, который оттитровывается 0,1 н. раствором гипосульфита натрия. В конце титрования в качестве индикатора прибавляют 2 мл водорастворимого крахмала. При 0°C и давлении 0,1 МПа 1 мл 0,1 н. раствора гипосульфита соответствует 0,56 мл O₂. Расчет содержания кислорода в процентах от общего объема производят по формуле

$$\frac{Ak \cdot 0,56 \cdot 100 \cdot 760 (273 + t)}{(V_k - V_p) (P - p) \cdot 273}, \quad (8.1)$$

где A — содержание 0,1 н. Na₂S₂O₃ с поправкой k ; V_k — объем колбы; V_p — объем взятых растворов, t — температура воздуха; P — давление воздуха; p — давление водяных паров при t .

Наряду с аналитическим способом определения кислорода в газовой фазе существуют методы поглощения кислорода, преимущество которых заключается в том, что уменьшается объем анализируемой пробы. С этой целью в качестве поглотителей используются металлическая медь или раствор пирогаллола.

Пластинки меди или отрезки медной проволоки помещают в раствор NH₄Cl в водном растворе аммиака. Кислород поглощается поверхностью медной пластинки, а образующаяся при этом закись меди растворяется в растворе аммиака. По сравнению с водным раствором пирогаллола медь имеет большую поглотительную способность. При хорошей защите от кислорода атмосферы после одной зарядки прибора можно провести до 200 определений.

Пирогаллолтриоксибензол является легкоокисляющимся веществом, особенно в щелочных растворах. Он обладает высокой адсорбционной способностью по отношению к кислороду. Применяют свежеприготовленные сильнощелочные растворы. Во время адсорбции при высоком содержании кислорода (40—50 %) и при повышении температуры до 35 °С может выделяться ядовитая окись углерода. Сначала готовят 33 %-ный раствор КОН: 48 г сухого КОН растворяют в 100 мл воды. Смесь 28 г пирогаллола с 80 мл слегка подогретой воды приливают к 118 мл раствора 33 %-ного КОН.

Определение двуокиси углерода. Содержание CO_2 в газовой фазе можно определять по уменьшению объема газа при пропускании воздуха через раствор $\text{Ba}(\text{OH})_2$ в результате поглощения CO_2 и по изменению концентрации раствора $\text{Ba}(\text{OH})_2$, оттитровав его раствором HCl до и после пропускания через него воздуха.

Определение сероводорода. При высоком содержании H_2S в качестве поглотителя применяют мышьяковистую кислоту H_3AsO_3 , а при малом — определение проводят с помощью титрования с использованием 0,1 н. раствора I_2 в йодистом кали, через который пропускают определенный объем воздуха $\text{H}_2\text{S} + 2\text{I} = 2\text{HI} + \text{S}$. Оставшийся свободный йод оттитровывают 0,1 н. раствором $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (гипосульфит) в присутствии 1 %-ного раствора крахмала. Наличие H_2S можно обнаружить лакмусовой бумажкой — влажная синяя бумага краснеет.

Определение аммиака. Аммиак NH_3 поглощается 10 %-ным раствором H_2SO_4 после поглощения CO_2 . Обнаружить NH_3 можно качественной пробой (красная лакмусовая бумажка в его присутствии синеет) или с помощью реактива Несслера, который при взаимодействии с аммиаком окрашивает раствор в желтый цвет.

Определение паров воды. Пары воды поглощаются P_2O_5 (фосфорным ангидритом) или CaCl_2 . Чувствительной реакцией является действие паров воды на карбид кальция, в результате чего выделяется ацетилен $\text{CaC}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{C}_2\text{H}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$. Объем или массу выделившегося ацетилена измеряют, устанавливают коэффициент пересчета объема или массы выделившегося ацетилена на воду и вычисляют содержание H_2O в пробе.

Расчет приведения газа к нормальным условиям производят по формуле

$$V_0 = V \frac{P_1}{760(1 + 0,0037t)}, \quad (8.2)$$

где P_1 — атмосферное давление; t — температура в момент опыта.

**МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ БИОТИЧЕСКОГО КОМПОНЕНТА
(МИКРООРГАНИЗМОВ) В ПОРОДАХ**

Микроорганизмы играют в природе важную и своеобразную роль, во многом определяя специфику превращения **веществ**. Они способны осуществлять в грунте разнообразные процессы: разрушение, трансформацию и синтез минералов и органических соединений, изменение состава твердой, жидкой и газовой фаз; влияют на агрегацию минеральных частиц и пористость породы, участвуют в коррозионных процессах и т. д. Особое значение микробиологические процессы могут приобрести при нарушении стабильного состояния грунта в результате инженерно-геологических работ, которые значительно изменяют условия развития микроорганизмов и оказывают влияние на направленность и интенсивность микробиологических трансформаций. Например, обводнение территории при строительстве плотин на сильноожеженных грунтах может привести к микробиологическому восстановлению соединений железа, его выносу и соответственно разупрочнению породы; вскрытие пластов с высоким содержанием соединений серы может вызывать активизацию микроорганизмов, следствием чего является увеличение агрессивности вод и быстрое разрушение металлических конструкций и другого оборудования.

Важное значение имеет изучение процессов трансформации веществ, вызываемых микроорганизмами, в связи с вопросами охраны окружающей среды. Так, например, некоторые бытовые и промышленные отходы вызывают интенсивное развитие микробов, что может быть причиной возникновения высокого порового давления вблизи свалок, содержащих органический материал, и вызывать снижение прочности пород. Поэтому изучение инженерно-геологических свойств грунтов не будет полным без серьезных исследований по микробиологии и сопряженной с ней биохимии [14].

Исключительное разнообразие типов обмена веществ у микроорганизмов и гетерогенность природных объектов обуславливают возможность развития почти в каждом биогеоценозе самых разнообразных микробных видов (автотрофов и гетеротрофов, аэробов и анаэробов, окисляющих и восстанавливающих различные соединения микробов, и т. д.). Поэтому изучение качественного и количественного состава микрофлоры и ее активности требует применения широкого набора методов.

Общее содержание микроорганизмов в грунте целесообразно определять на основании данных: прямого микроскопического подсчета методами Виноградского, Джонса — Моллисона, люминесцентно- или электронно-скопического; метода высева на определенный набор питательных сред или косвенных характеристик, например по выделению CO_2 . Определение видового со-

става микрофлоры проводят на питательных средах и по биохимическим тестам. Эти исследования выполняются в лаборатории (см. т. 2). В полевых условиях определяют активность микробиологических процессов по потреблению кислорода или образованию углекислоты, ферментативной активности, разложению стерильной льняной ткани и разжижению желатинового слоя непроявленной фотопластинки или фотопленки и др. Особенности развития микроорганизмов в природных объектах можно наблюдать с помощью стекол обростания Холодного, капиллярных педоскопов (или пелоскопов) Перфильева, люминесцентной микроскопии монолитов по Звягинцеву и т. д. Наиболее ценные сведения о развитии и активности микроорганизмов можно получить при полевых исследованиях, в то время как определение количества и видового состава микроорганизмов обычно проводят в условиях стационара или в лаборатории.

Следует разработать научную гипотезу исследований в полевых условиях на основании сбора исчерпывающих материалов о геологическом строении изучаемого района, минеральном составе пород и условиях их обводнения, определить набор экологических условий (концентрация солей, окислительно-восстановительный потенциал, содержание кислорода, сероводорода, биогенных элементов и др.), благоприятный для развития данной группы микроорганизмов, произвести отбор образцов.

В случае ценозов, находящихся в анаэробных условиях, особое внимание уделяют изучению анаэробов. В грунтах с высоким содержанием серы изучают тионовые и сульфатредуцирующие бактерии, а при близком залегании нефти — микроорганизмы, способные усваивать газообразные и жидкие углеводороды, и т. д.

Микроорганизмы распределены в среде обитания чрезвычайно неравномерно — макро- и микроочагами, поэтому необходимо проводить анализ большого числа индивидуальных образцов, при этом можно получить сведения не только о среднем содержании микроорганизмов, но и о размахе колебаний их количественного и качественного состава, что дает возможность судить о разнообразии, степени разброса и достоверности данных. Статистический анализ показал, что для учета грибных организмов в почве необходим отбор образцов в десятикратной повторности не менее трех раз за вегетационный период, — только такой объем материала позволяет получить достоверные сведения о типичных и случайных грибных формах. В более глубоких слоях грунта также установлены существенные колебания численности микроорганизмов, поэтому для получения данных об очаговости их развития и в этом случае необходим отбор большого числа образцов и отдельный их анализ. К сожалению, эти рекомендации часто не могут быть выполнены в полном объеме из-за громоздкости микробиологических экспериментов. Поэтому для получения ориентировочного представ-

ления о среднем количественном и видовом составе микрофлоры допускается анализ среднего образца грунта, который составляется смешением 3—7 проб массой по 100—200 г.

Пробы отбирают с помощью широкого ножа, который тщательно очищают, обтирают ватным тампоном, смоченным спиртом, и обжигают на пламени. При отборе проб только для количественного анализа можно ограничиться многократным втыканием ножа в горизонт, из которого берется образец. Образцы необходимо брать из свежерытого шурфа, скважины или почвенного разреза. Отбор проб из обнажений не рекомендуется вследствие принципиальных отличий условий развития микрофлоры в них от существующих в глубине массива. Даже при зачистке обнажения до 1,5 м могут оставаться сомнения в корректности полученных данных. Образцы берут по всей глубине, обычно из середины слоя с четко выраженными морфологическими особенностями. При необходимости отдельно анализируют микроорганизмы ризосферы, содержащиеся в почве, прочно связанной с корнями растений и удерживающейся после встряхивания.

Желательно проведение микробиологических исследований в день отбора образцов, так как при хранении состав микрофлоры может существенно измениться: обычно уменьшается общее количество микроорганизмов и особенно число малоустойчивых форм, т. е. искажается соотношение между отдельными группами. Если проведение анализов в ближайшие сутки невозможно, то образцы сразу после отбора высушивают при температуре не выше 30 °С и затем исследуют воздушно-сухие образцы, которые хранят в стерильных пергаментных пакетах, уложенных в полотняные мешочки. Иногда прибегают к замораживанию образцов непосредственно после отбора в широкогорлых сосудах Дьюара с сухим льдом (твердый CO₂) при температуре —78 °С; образцы хранят в замороженном состоянии, а перед анализом оттаивают.

При отборе образцов для электронно-микроскопического изучения в связи с возможностью быстрого изменения состояния клеток (прорастание спор, деление клеток, их лизис и т. д.) рекомендуется обработка 95 %-ным этиловым спиртом с бенгальским розовым; в лаборатории спирт замещается окисью пропилена и отфильтровывается.

Методы определения биологической активности имеют важное значение при изучении интенсивности и направленности определенных процессов в грунте, особенно в связи с антропогенным воздействием. Эти методы делятся на две группы: методы определения актуальной (естественной, природной) биологической активности, которая определяется в полевых условиях, и методы определения потенциальной (максимальной) биологической активности, которая проявляется в лабораторных условиях, наиболее благоприятных по всем параметрам для протекания определенного процесса.

Чтобы охарактеризовать всю микрофлору в целом, выбирают процесс, который способно осуществлять подавляющее большинство микроорганизмов. Таким процессом в первую очередь является дыхание, интенсивность которого в полевых и лабораторных условиях определяют по выделению CO_2 и поглощению кислорода. Однако следует учитывать, что углекислоту выделяют не только микроорганизмы, но и корни растений, кроме того, некоторые микроорганизмы потребляют CO_2 .

Данные о протекании отдельного процесса можно получить аппликационными методами (разложение целлюлозы, разжижение желатинового слоя непроявленной фотопластинки); по изменению содержания и скорости изменения содержания потребляемого или окисляемого субстрата (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mn^{4+} , $\text{S/S}_2\text{O}_3^{2-}$ и др.), радиоизотопными методами (интенсивность хемосинтеза, образование и окисление метана).

Представление о состоянии (активном или неактивном) клеток, их расположении по отношению к другим организмам и частицам грунта и интенсивности развития в условиях, приближающихся к естественным, дают методы—стекло обрастания Холодного; капиллярный Перфильева; шлифов; обнаружения активного грибного мицелия Торнтон и Честерса и др.—основанные на способности активных форм развиваться на поверхности и внутри специальных приспособлений.

Изучение особенностей развития микроорганизмов

Метод стекло обрастания Холодного. В грунт вносят предметные стекла, предварительно очищенные, выдержанные в концентрированной серной кислоте и отмытые в 1 % -ном растворе соды и в дистиллированной воде. При установке стекло, которая обычно осуществляется с помощью ножа, необходимо по возможности сохранить естественное сложение и первоначальную плотность грунта. Ставят несколько параллельных стекло, места их нахождения отмечают. Срок экспозиции составляет 1—3 мес.

По истечении этого срока стекла осторожно извлекают, нижние стороны протирают, а верхние подсушивают на воздухе, фиксируют в пламени горелки и помещают в стакан с водой, чтобы отделить крупные частицы, затрудняющие микроскопическое изучение. После промывки препарат окрашивают карболовым эритрозинном (5 г карболовой кислоты и 1 г эритрозина на 100 мл воды) и просматривают под микроскопом. При использовании люминесцентной микроскопии стекла окрашивают водным раствором акридина оранжевого (1:10 000). О степени активности микрофлоры судят по плотности обрастания стекла за определенный срок, а взаиморасположение клеток дает сведения об их взаимоотношениях *in situ*.

Капиллярный метод Перфильева. Плоская поверхность стекла, используемая в предыдущем методе, не-

сколько изменяет условия развития микроорганизмов, свойственные капиллярам. Этот недостаток устранен в педоскопах, которые состоят из набора пятиходовых капиллярных ячеек с тонкой кровлей, вставленных в стеклянную обойму (рис. 25). Каналы капилляров имеют ширину 0,65—1,0 мм и высоту 0,2—0,3 мм. Микробы развиваются в них, прикрепляясь к стенкам. Перед помещением в грунт педоскопы стерилизуют сухим жаром, закладка их производится при помощи специального пробойника. Ориентировать обойму с педоскопами следует таким образом, чтобы каналы ячеек приняли вертикальное положение, соот-

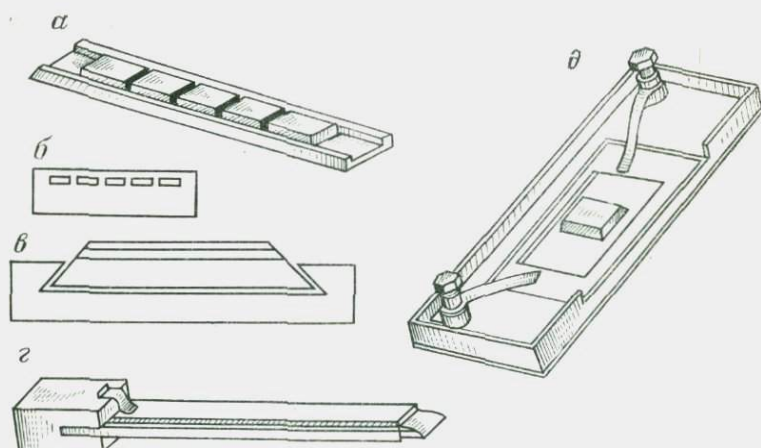


Рис. 25. Капиллярный педоскоп:

а — общий вид; *б* — капиллярная ячейка в разрезе; *в* — держатель с капиллярными ячейками в разрезе; *г* — металлический пробойник для закладки капиллярных педоскопов в грунт; *д* — металлическая рамка для тонких предметных стекол

ветствующее преобладающему направлению движения жидкой фазы. После экспозиции в течение 1—3 мес и более педоскопы извлекают из грунта, их поверхность протирают и просматривают микроорганизмы, развившиеся в каналах, в живом состоянии или после фиксации и окрашивания карболовым эритрозиним. Ячейки педоскопов с помощью канадского балъзама укрепляют на специальной тонкой пластине (толщиной 0,3—0,2 мм), заменяющей предметное стекло, помещают в держатель и изучают под микроскопом с применением иммерсионного масла. Этим методом в донных отложениях озер были обнаружены разнообразные микроорганизмы, которые не выделялись на питательных средах.

При изучении почв Т. В. Аристовская рекомендует заполнять капилляры фракциями гумусовых веществ. Органиоинеральные комплексы гумусовых веществ с полуторными окислами получают следующим образом: 50 г сильногумусированной почвы заливают 1 л 0,1 н. NaOH, настаивают в течение ночи, затем

отфильтровывают и доводят рН фильтрата до 5,0 с помощью 0,2 н. раствора HCl. После этого в него по каплям добавляют 20 %-ный раствор FeCl₃ до полного выпадения гумусовых веществ. Полученный гель отфильтровывают, отмывают от солей (проба на Cl⁻ с 1 %-ным AgNO₃). Около 5 мл геля растирают в ступке, взбалтывают в 1 л воды, добавляют 0,1 %-ный раствор агара и стерилизуют при 5·10⁴ Па, а затем выливают в стерильную чашку Петри и помещают в нее педоскопы. Подсушенные капилляры, заполненные средой, помещают в почву и после определенной экспозиции и окрашивания карболовым эритрозином проводят микроскопическое изучение. Этим методом Т. В. Аристовской удалось получить данные об особенностях развития и взаимоотношений микробов в почвах, описать новые виды.

Методы наблюдения микробов на почвенных монолитах по Звягинцеву. Использование люминесцентной микроскопии в падающем свете позволяет при жизни изучать окрашенные микроорганизмы непосредственно на поверхности монолитов, структурных отдельностей, корней и т. д., причем наблюдения можно вести в динамике. Монолит получают с помощью небольшой формочки из стали, пластмассы или стекла. Ее вдавливают в грунт, а затем осторожно вынимают так, чтобы над краями возвышался слой грунта, который срезают бритвой. На поверхность монолита наносят каплю акридина оранжевого и покрывают тонким покровным стеклом (толщиной 0,10—0,12 мм). Через 10—20 мин формочку помещают на предметный столик люминесцентного микроскопа и просматривают с иммерсией. Возможен просмотр без покровного стекла при малых увеличениях. Следует отметить необходимость тщательного подбора оптимальной концентрации красителя, которая устанавливается опытным путем, что позволяет более четко выявить свечение клеток микроорганизмов.

Метод шлифов. Сущность метода состоит в том, что отобранный с помощью того или иного приспособления образец ненарушенного строения пропитывается застывающим цементирующим материалом и используется для получения шлифов толщиной около 0,03 мм, структура которых исследуется под микроскопом как в падающем, так и в проходящем свете. Необходимым этапом является окраска готового шлифа эритрозином. Грунт перед приготовлением шлифа окрашивают фиксирующим и красящим раствором следующего состава (в мл): 5 %-ный водный раствор синьки 10; ледяная укусовая кислота 5; вода 15.

Количество используемого раствора не должно быть больше, чем требуется для поднятия уровня жидкости на $\frac{1}{4}$ высоты образца. На верхнюю плоскость грунта помещается прослойка из фильтровальной бумаги и нейтрального водопоглощающего материала. Поднятие жидкости осуществляется капиллярными силами. Фиксация и окрашивание продолжаются 10 мин, затем

избыток реактива отмывают дистиллированной водой (снизу вверх). Промывание заканчивают, когда вода в верхней части образца перестает окрашивать лакмусовую бумажку в красный цвет. Высушенный образец пропитывают канифолью, бакелитовым лаком, различными смолами или другими цементирующими веществами. Микроскопирование шлифов позволяет выявить состояние микробов (покоящиеся споры или активный мицелий) и их взаимоотношения.

Методы обнаружения активного грибного мицелия. Низшие грибы могут находиться в грунте в виде покоящихся спор или активно развивающегося мицелия. Чтобы определить виды грибов, находящихся в активном состоянии, обычно применяют методы Торнтон и Честерса и их модификации, основанные на том, что через отверстия стекла-экрана специальной камеры или капилляры в стенках стеклянных трубок разного размера проникает лишь активно растущий мицелий. Наиболее простой и не требующей специального оборудования модификацией последнего метода является метод Мюллера и Дюреля, в котором вместо специальных трубок Честерса (рис. 26) используются центрифужные пластиковые пробирки. С помощью трафарета в них по спирали проделывают отверстия диаметром 5 мм; расстояния между отверстиями могут быть различными. Пробирки обматывают изоляционной лентой и наполняют до высоты 4 см агаризованной питательной средой, закрывают ватной пробкой и стерилизуют в автоклаве. Перед помещением в грунт изоляционную ленту протыкают толстой иглой, прокаленной на пламени. После четырех — шестисуточной экспозиции в грунте трубки вынимают. Ленту разматывают в стерильных условиях и по мере разматывания участки агара, расположенного против отверстий, помещают на чашки Петри со средой для культивирования грибов. Метод дает возможность определить видовой состав активных форм.

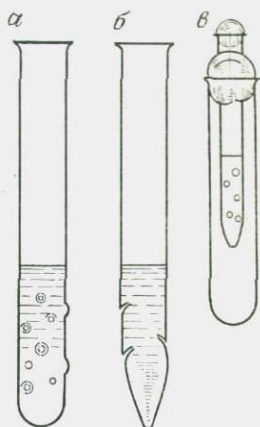


Рис. 26. Трубки Честерса:

а — трубка с гладкими отверстиями, края которых находятся на уровне стенок; *б* — то же, с отверстиями, ведущими к конусообразным внутренним капиллярам; *в* — то же, перед помещением в грунт

Изучение биологической активности

Определение дыхания. В полевых условиях наиболее удобен адсорбционный метод определения CO_2 по Карпачевскому, который позволяет вести наблюдения одновременно

на нескольких вариантах и с необходимой повторностью. Определения проводятся в следующей последовательности.

В точно фиксированный момент времени на изучаемых объектах помещаются стеклянные стаканчики емкостью 50—100 мл и с измеренным микрометром диаметром, содержащие 2 мл 0,1 н. КОН. Через 20 мин стаканчики снимают и оттитровывают из микробюретки 0,1—0,05 н. H_2SO_4 по фенолфталеину. Определение повторяют. Перед титрованием образцов определяют титр щелочи. Расчет выделившегося из грунта CO_2 ведут по формуле

$$C_{CO_2} = \frac{66n(V_1 - V_2)}{S}, \quad (9.1)$$

где n — нормальность кислоты; V_1 — количество H_2SO_4 , затраченное на титрование контрольных 2 мл щелочи; V_2 — количество кислоты, затраченное на титрование испытуемого раствора; S — площадь поверхности жидкости в стаканчике.

Широко применяются для определения интенсивности дыхания в полевых и лабораторных условиях также методы Варбурга (манометрический) и Вострова.

Метод Варбурга основан на измерении смещения уровня жидкости в чувствительном манометре под влиянием изменения давления газов в замкнутом сосуде, присоединенном к манометру. При постоянных температуре и давлении смещение мениска происходит под влиянием газового обмена микроорганизмов. При замерах давления определенного газа необходимо исключить влияние других; например, при измерении дыхания по поглощению кислорода с помощью щелочи связывают выделяющуюся углекислоту.

Определение микробиологической активности по выделяющейся углекислоте согласно методу Вострова проводится с помощью газоанализатора Орса—Лунге. Описание этого прибора, а также прибора Варбурга и порядок определений указанными методами приводятся в пособии [31].

Определение разложения целлюлозы. Многим микроорганизмам присуща способность разлагать целлюлозу. Интенсивность разложения обычно определяют простым аппликационным методом, который заключается в том, что тонкая льняная неотбеленная ткань, пришитая к полимерной пленке или плотно покрывающая стеклянную пластинку, помещается в изучаемый грунт на 1—3 мес и более. Ширина ткани обычно равна 10 см, а длина варьирует от 25 до 50 см. Перед использованием ткань стерилизуют горячим утюгом или в автоклаве. Несколько (три—пять) одинаковых полотен помещают в свежий разрез, плотно прижимая к стенке; разрез засыпают. Через месяц, а при неблагоприятных для развития микроорганизмов условиях (засуха, низкие температуры) через 2—3 мес полотна осторожно извлекают, отмывают от минеральных частиц и продуктов полураспада и подсушивают. Для определения динамики процесса куски ткани извлекают последовательно через опреде-

ленные интервалы времени. Об интенсивности процесса разрушения клетчатки судят по уменьшению массы ткани или по изменению величины сопротивления растяжению, определяемой с помощью приборов, применяемых в текстильной промышленности. Разложение целлюлозы расценивается как очень слабое, если за вегетационный сезон разложилось менее 10 % массы ткани, о средней интенсивности разложения говорят при разложении на 30—50 %, при очень сильном разложении теряется более 80 % массы полотна.

Этим же методом, но при условии тщательной предварительной очистки ткани от аминокислот и белков промыванием 70 %-ным этиловым спиртом можно определить интенсивность накопления свободных аминокислот и белков за 10—30 дней экспозиции в грунте. В этом случае ткань после изъятия из грунта просушивают, очищают приставшие к ней частицы щеточкой и опрыскивают 0,5 %-ным раствором нингидрина в ацетоне. Затем ткань высушивают и оставляют в темном месте при комнатной температуре на сутки и более для полного выявления окраски. При определении белков окрашивание нингидрином проводят после кислотного гидролиза, а аминокислоты экстрагируют этиловым спиртом. Количественное определение указанных продуктов проводят фотоэлектроколориметрически. Для этого ткань измельчают ножницами на лоскутки размером $0,25 \times 1$ см, помещают в мерную пробирку объемом 25 мл с притертой пробкой и заливают 20 мл 75 %-ного этанола. Через 10 мин пробирки встряхивают, экстракт сливают в колбу на 50 мл, а измельченную ткань вновь заливают 20 мл этанола той же концентрации. В третий раз берут 10 мл этанола, затем экстракт доливают спиртом до метки. Плотность окраски раствора измеряют на фотоэлектроколориметре, сравнивая с плотностью стандартных растворов, полученных разбавлением раствора какой-либо аминокислоты, окрашенной нингидрином. Строится стандартная кривая, и с ее помощью количество нингидринположительных веществ спиртовой вытяжки из экспонированной в грунте ткани условно выражается в миллиграммах взятой в качестве стандарта аминокислоты, обычно глицина. Расчет проводят на 1 см^2 поверхности ткани.

Определение ферментативной активности. Ферментативная активность обусловлена присутствием в грунте специфических белковых соединений, выделяемых живыми организмами в процессе превращения различных природных субстратов и в результате лизиса их клеток. Ферменты, выделяемые в грунт, довольно долго сохраняют свою активность и определяют интенсивность и направленность биохимических процессов в нем. Ферменты, осуществляющие различные трансформации, относятся к разным классам. Каталазы разлагают перекись водорода, образующуюся в процессе дыхания живых организмов и при различных биохимических реакциях окисления органических веществ. Дегидрогеназы участвуют в процессе

дыхания, отщепляя водород от окисляемых субстратов. Пероксидазы катализируют окисление полифенолов в присутствии перекисей, они участвуют в реакциях конденсации веществ при образовании молекул гуминовых кислот. Указанные ферменты относятся к классу оксидоредуктаз, катализирующих окислительно-восстановительные реакции. К этому классу относится еще целый ряд ферментов, осуществляющих превращения соединений железа, марганца, азота и др. Обширный класс ферментов, осуществляющих реакцию гидролиза разнообразных органических соединений, представляют гидролазы. Таким образом, ферментативная активность грунта является показателем развития в нем живых организмов.

Разработаны методики определения многих ферментов. Они изложены в ряде руководств [11, 31]. Определение ферментативной активности желательнее проводить в полевых условиях, так как даже непродолжительное хранение образцов существенно изменяет этот показатель.

Особый интерес представляет метод определения суммарной протеазной активности, разработанный Е. Н. Мишустиним, Д. И. Никитиным и И. С. Востровым, который позволяет получить представление об интенсивности разложения белков непосредственно в грунте. Метод состоит в том, что в грунт закладывают непроявленные фотопластины или плоскую фотопленку прикладывая стороной, покрытой эмульсией, к стенке разреза. Пластинки или пленки оставляют на срок от 1 до 4 сут. Во избежание повреждений при извлечении из грунта пластинки и пленки можно завернуть в тонкую стеклоткань, предварительно прокаленную и отмытую соляной кислотой и водой. По окончании экспозиции их осторожно извлекают из грунта и отмывают от частиц под слабой струей водопроводной воды и подсушивают на воздухе. Об интенсивности процесса судят по степени разжижения желатинового слоя.

Определение азотфиксации. Определение интенсивности азотфиксации обычно проводят ацетиленовым методом, основанным на способности фермента нитрогеназы восстанавливать ацетилен до этилена в количестве, пропорциональном количеству азота, которое может быть восстановлено в тех же условиях. Интенсивность азотфиксации оценивают по количеству образовавшегося этилена.

Прибор для полевого определения азотфиксации (рис. 27) представляет собой металлический цилиндр со съёмным колпаком из полиэтиленовой пленки, на котором имеется резиновая пробка для отбора проб. Цилиндр погружают в почву до упора в кольцевую канавку. Для предотвращения утечки газов грунт по внешнему периметру цилиндра увлажняют на ширину 5—10 см. Внутри цилиндра вставляют бюкс, в котором находится 25—30 г карбида кальция. На металлический обруч натягивают полиэтиленовый колпак, а в кольцевую канавку цилиндра заливают воду, служащую затвором. Карбид кальция увлажняют

и быстро надевают колпак, обруч которого должен быть погружен в воду в кольцевой канавке. Через пробку в колпаке вводят шприцем точно измеренное количество (2—5 мл) пропана, служащего внутренним стандартом, и отмечают время начала инкубации. Длительность инкубации составляет от 1 до 24 ч в зависимости от предполагаемой интенсивности процесса. По окончании инкубации большим шприцем отбирают три пробы по 15 мл в вакуумированный пенициллиновый флакон. Пробы хранят в темноте при комнатной температуре до анализа на газовом хроматографе. Чтобы определить лишь величину фиксации азота, необходимо результат, полученный для этилена, разделить на три в соответствии с реакциями восстановления азота и ацетиленом. Параллельно производят контрольное определение неспецифического этиленогенеза, проводя инкубацию без карбида Са.

Определение интенсивности хемосинтеза. Радиоактивные методы определения интенсивности процессов разработаны и применяются при изучении водных сред (озер, рудничных вод). При определении интенсивности хемосинтеза свежееотобранную рудничную воду прямо в шахте наливают в пенициллиновые склянки, которые закрывают пробкой так, чтобы под ней остался пузырек воздуха. Затем шприцем через пробку вносят 0,1 мл раствора радиоактивного $\text{Na}_2\text{C}^{14}\text{O}_3$. Каждый вариант опыта повторяют дважды. Меченую соду предварительно фильтруют через мембранный фильтр № 3 и хранят в запаянных ампулах по 10—15 мл, в которых она стерилизуется многократным кипячением на водяной бане. Время экспозиции составляет от 1 до 10 сут. По окончании опыта в каждую склянку вносится по 0,5 мл 40 %-ного формалина. Затем в лабораторных условиях раствор отфильтровывают через мембранный фильтр № 2, который обрабатывают 2 %-ной HCl для удаления остатков радиоактивного карбоната, и активность просчитывают под торцевым счетчиком. Величину суточного хемосинтеза рассчитывают по формуле

$$C_x = \frac{C_{\text{карб}} r}{Rt} - C_{\text{гет}}, \quad (9.2)$$

где C_x — величина суточного хемосинтеза; $C_{\text{карб}}$ — содержание углерода в воде; r — радиоактивность бактерий на фильтре; R — общая радиоактивность воды в склянках после добавления

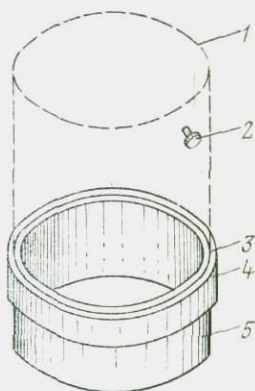


Рис. 27. Прибор для определения активности азотфиксации в грунте:

1 — полиэтиленовый колпак; 2 — резиновая пробка; 3 — металлический обруч для натягивания полиэтиленового колпака; 4 — кольцевая канавка; 5 — металлический цилиндр

раствора соды; t — срок инкубации; $C_{\text{гет}}$ — поправка на гетеротрофное усвоение CO_2 , для получения которой надо знать содержание бактерий в воде.

При наличии воздушного пространства в склянке для определений величина $C_{\text{карб}}$ определяется по методу Сорокина [24].

Определение образования метана. В пенициллиновые флаконы, заполненные водой и илом, вносят по 0,2 мл 0,075 %-ного раствора $\text{NaN}^{14}\text{CO}_3$ удельной активности $247,9 \times 10^{13} \text{ c}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$. Микрофлора в контрольных флаконах инактивируется 0,5 мл формалина. Флаконы закрывают резиновыми пробками и в штативе-держателе опускают в водоем на те же глубины, с которых были взяты образцы. В параллельных пробах определяют содержание CO_2 и бикарбоната. После суточной экспозиции в водоеме пробы вынимают и фиксируют формалином. В лаборатории проводят отдувку метана током аргона при нагревании флаконов на водяной бане, полноту отдувки контролируют на счетчике. Радиоактивность новообразованного метана просчитывают с помощью счетчика СБМ-8 с заполнителем из смеси аргона и изопентана. Общее количество метана, образованного микроорганизмами в течение суток путем восстановления углекислоты водородом, рассчитывают по формуле

$$C_{\text{CH}_4} = \frac{rC_{\text{общ}}A}{Rt}, \quad (9.3)$$

где r — радиоактивность образовавшегося метана; $C_{\text{общ}}$ — количество углерода CO_2 и бикарбонатов; A — константа; R — радиоактивность исходного бикарбоната; t — время опыта.

Определение окисления метана. Пенициллиновые флаконы заполняют пробами воды и закрывают пробками. В флаконы вносят шприцем по 0,2 см³ радиоактивного метана с активностью $3 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$, разбавленного в 30 раз аргоном. В контрольные флаконы вносят по 0,5 мл насыщенного раствора NaOH . Инкубацию проводят в течение 24—27 ч в водоеме на тех же глубинах, с которых были отобраны образцы. Затем в опытные флаконы через пробку шприцем вводят по 0,5 мл насыщенного раствора NaOH для инактивации метаноокисления и фиксации CO_2 . После фильтрации радиоактивность просчитывают в счетчике. Общее количество метана, окисленного микроорганизмами в течение суток, рассчитывают по формуле

$$C_{\text{CH}_4} = \frac{rC \cdot 24}{Rt}, \quad (9.4)$$

где r — суммарная радиоактивность углерода; C — количество метана; R — радиоактивность исходного метана; t — время опыта.

**МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
И ИХ МАССИВОВ**

Глава 10

ИЗУЧЕНИЕ МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

**10.1. ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИЗНАКОВ СТРОЕНИЯ МАССИВОВ
ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ**

**Основные характеристики строения скальных пород
и их массивов**

Скальными породами в инженерной геологии называют горные породы, которые в приповерхностных термодинамических условиях деформируются и разрушаются как квазитвердые тела. Это обширная группа минеральных образований, включающая породы различного генезиса,— от магматических до химически осажденных. Скальные горные породы в абсолютном большинстве характеризуются кристаллическим строением и кристаллизационным типом связи между отдельными минералами и их агрегатами. Это обуславливает высокую прочность скальных пород, значительно превышающую давления и напряжения, существующие в инженерной практике [38].

Второй важной особенностью скальных пород является то, что наиболее важные в практическом отношении изменения в поведении их при строительстве инженерных сооружений происходят на том уровне неоднородности геологической среды, который сопоставим с размерами инженерного сооружения и существенно превышает размер элементарного блока, образованного системами лито- и петрогенетических трещин. Масштабный эффект в отношении прочностных и деформационных характеристик наиболее резко и качественно по-иному проявляется при переходе от образца горной породы к массиву, соизмеримому с размерами инженерного сооружения.

Скальные горные породы в условиях естественного залегания образуют массивы (по Л. Мюллеру), которые в свою очередь являются структурными элементами земной коры [1].

В инженерно-геологической литературе имеются многочисленные определения понятия «массив горных пород», которые можно разделить на две группы. По мнению одних ученых (П. Н. Паниюков, М. В. Рац, Л. Мюллер и др.), массив горных пород— это участок земной коры, находящийся в сфере воздействия инженерного сооружения, исследуемый с целью определения условий производства инженерных работ и эксплуатации сооружений и обладающий определенной инженерно-геологической структурой.

Другие исследователи, такие, как Л. Д. Белый, Г. А. Голодковская, Л. В. Шаумян, М. Матула, Ч. Джегер и др., рассматривают массив горных пород как объективно существующее геологическое тело, независимо от того, находится оно во взаимодействии с инженерным сооружением или последнее отсутствует. Это положение аргументируется следующим. 1. В строении скальных массивов, представленных совокупностью разных горных пород или одной горной породой, наблюдаются различные по своим размерам компоненты, диапазон которых непостоянен и не зависит от инженерных задач, обусловленных видом строительства, а определяется геологической природой массива как физического тела. 2. Массив горных пород может всесторонне изучаться и до того, как возник инженерный замысел о возведении в данном месте того или иного сооружения. 3. Массив горных пород везде и всегда прежде всего геологический объект, представляющий собой систему с определенным соотношением элементов. Они инвариантны, т. е. сохраняются в системе практически постоянно и требуют тщательного геологического изучения, не допуская никаких целенаправленных инверсий или подмены их неадекватными аргументами [1].

Поскольку разные ученые вкладывают в один термин различные понятия, каждое из которых используется при инженерно-геологическом изучении скальных массивов, будем для первого случая применять название — область воздействия инженерного сооружения, а для второго — массив горных пород.

Таким образом, массив горных пород — это геологическое тело, образующее тектоническую структуру или ее часть, сформировавшееся в определенной геолого-структурной и палеогеографической обстановке и характеризующееся определенными геологическими, гидрогеологическими и инженерно-геологическими закономерностями.

Массивы скальных горных пород представляют собой геологические образования, при инженерно-геологическом изучении которых необходимо исходить из анализа геологической структуры, состава, условий залегания и соотношения пород в разрезе, а также учета изменений, связанных с особенностями геологического развития территории [13].

К числу важнейших характеристик массивов скальных горных пород как инженерно-геологических объектов относятся: 1) минеральный состав, структура и текстура горных пород, слагающих массив; 2) структура самого массива, которая определяется слоистостью, сланцеватостью, характером залегания горных пород (трещиноватостью, дислоцированностью, разрывами, разломами и другими дизъюнктивами) и характеризуется неоднородностью и анизотропностью.

Минеральный состав, структура и текстура горных пород являются ведущими факторами в строе-

нии массивов. Генезисом и составом пород определяются такие компоненты строения массива, как первичная трещиноватость, слоистость, сланцеватость, а также инженерно-геологические особенности массива: форма рельефа, строение и устойчивость склонов, физико-механические свойства, специфика геологических и инженерно-геологических процессов и др.

Так, например, массивы эффузивных пород — базальтов существенно отличаются по своему строению от массивов интрузивных пород — гранитов и еще больше от массивов осадочных пород — карбонатных пород. Для массивов базальтов характерна высокая прочность горных пород; особенностью их структуры является многогранная, чаще всего шестигранная, столбчатая отдельность. Эти массивы характеризуются достаточно высокой однородностью и квазиизотропией. Массивам гранитов свойственна несколько меньшая прочность горных пород, призматическая форма первичной отдельности, а также достаточно высокая однородность и квазиизотропия. Иную картину представляют собой массивы осадочных терригенных пород, имеющие существенно меньшую прочность горных пород, отчетливую слоистость, плитчатую и тонкоплитчатую форму первичной отдельности, большую неоднородность и отчетливо выраженную анизотропию. Специфической чертой массивов, сложенных карбонатными породами (известняками), являются их растворимость, повышенная водопроницаемость и закарстованность.

Наряду с минеральным составом пород существенное влияние на характеристики строения массивов оказывают структурные и текстурные особенности горных пород (см. т. 2, гл. 5). Так, в зависимости от размера кристаллов породы одинакового состава обладают существенно отличными формой и размером первичной отдельности, характером и интенсивностью протекания процессов выветривания, устойчивостью пород в естественных и искусственных склонах и др.

Текстурными особенностями также определяются размер и форма первичной отдельности, изотропное или анизотропное строение массива, анизотропия физических и механических свойств и т. д.

Форма залегания горных пород разнообразна и обычно представлена множеством типов, обусловленных происхождением горных пород и формированием геологической структуры, к которой они относятся. Согласно П. Н. Панюкову, по типу залегания различают следующие горные породы: 1) недислоцированные, 2) с моноклинальным залеганием пород, 3) простого складчатого строения, 4) сложного складчатого строения, 5) сложного складчато-разрывного строения с интенсивной вторичной складчатостью и плейчатостью пород. Свообразным явлением в строении некоторых массивов представляются диапировые складки, карстовые образования и оползневые дислокации.

Важнейшим компонентом строения скальных массивов является их трещиноватость. Вследствие трещиноватости массивы различного генезиса представляются состоящими из блоков, кусков и других более мелких образований, входящих в «элементарные» (в механическом смысле) объемы горных пород. Форма, размеры, взаимное расположение элементарных блоков и типы контактов между ними создают структуру массива.

Слоистость, которая является отличительной чертой осадочных горных пород, выражается в чередовании параллельных слоев различного состава и строения и образует слоистую текстуру скального массива, приводящую к анизотропии прочностных и деформационных свойств.

Сланцеватость — характерная черта метаморфических горных пород, которая проявляется в ярко выраженной направленности (упорядоченности) столбчатых и пластинчатых минералов (главные оси минералов определяют плоскость сланцеватости) или в наличии расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, приблизительно параллельных, механически активных плоскостей, по которым порода может расщепляться, отделяться или сдвигаться.

Особенностью строения массивов скальных пород является их неоднородность, или пространственная изменчивость таких компонентов строения, как форма и размер элементарного блока, литологическая неоднородность и т. д., обусловленная особенностями генезиса и геологического развития территории. Это явление значительно усложняет инженерно-геологическое изучение и описание массивов. Геологическое тело называется однородным, когда все его части имеют одинаковое строение и обладают одинаковыми физико-механическими свойствами. В противном случае тело называется неоднородным.

Неоднородный геологический объект характеризуется: 1) размерами элементов неоднородности и 2) степенью неоднородности. Элементом неоднородности (по М. В. Рацу) называется наибольший объем породы, который при данном масштабе исследований может рассматриваться «как внутренне однородный» по какому-либо одному признаку или совокупности заданных признаков и отличающийся по этим признакам от смежных с ним объемов.

Под степенью неоднородности понимаются интенсивность и характер различия совокупности значений заданных признаков или одного из них в пределах исследуемой области.

Методы описания основных характеристик строения массивов

Ведущим методом инженерно-геологического изучения массивов скальных горных пород является инженерно-геологиче-

ская съемка, которая представляет собой комплекс полевых, лабораторных и камеральных работ, в процессе которых выявляются основные закономерности формирования и пространственной изменчивости главных факторов, определяющих инженерно-геологические особенности массивов скальных пород. Масштаб съемки зависит от цели и стадии исследований.

Основным объектом инженерно-геологического картирования являются горные породы, их состав, структурно-текстурные особенности, распространение, залегание, трещиноватость, дислоцированность, тектоническая нарушенность, неоднородность, анизотропность и т. д.

На основе инженерно-геологической съемки намечают места расположения разведочных выработок и проведения специальных инженерно-геологических исследований, схему опробования и т. д. Рациональное размещение горных выработок и скважин, а также создание оптимальной схемы опробования — один из наиболее важных вопросов комплексного инженерно-геологического изучения массивов горных пород.

Разведочные выработки и сети опробования скального массива должны располагаться достаточно равномерно по площади и характеризовать все типы массивов различных порядков, выделяемых в процессе инженерно-геологического картирования. Таким образом, в ходе опробования должны быть изучены все типы геологических структур или их частей; литологические формации, комплексы и типы; зоны трещиноватости разного генезиса и интенсивности, а также различного характера блочности, а внутри их — различного состояния.

Разведочная сеть и сеть опробования должны быть приурочены к линиям инженерно-геологических профилей, которые располагаются вкрест простираения геологических структур.

Густота сети опробования и оптимальный интервал опробования являются наименее разработанными вопросами инженерно-геологического изучения скальных массивов. Они зависят от многих факторов, и в частности от масштаба исследований, типа инженерного сооружения, сложности геологического строения массива, стадии исследования и целого ряда других факторов. Тем не менее для любого ответственного сооружения сеть опробования должна быть задана с такой густотой, чтобы уверенно охарактеризовать все типы массивов различных порядков с учетом особенностей их состояния и масштаба исследований.

Намечая разведочную сеть, которая всегда совмещена с сетью опробования, необходимо стремиться использовать для инженерно-геологических исследований разведочные выработки других служб: геологических, гидрогеологических, строительных и т. д.

Так, в частности, при разведке месторождений полезных ископаемых инженерно-геологические исследования должны проводиться одновременно и в комплексе с разведкой полезного

ископаемого, что позволит использовать богатейший геологический и геофизический материал, получаемый при разведке, а также разведочные выработки и скважины для инженерно-геологического опробования и проведения в них специальных инженерно-геологических исследований [26].

Основные компоненты строения массивов горных пород изучаются в естественных или искусственных обнажениях и в горных выработках: по керну буровых скважин, в штольнях, шахтах, карьерах и т. д.

Описание строения массива начинается с указания типа обнажения, его географической привязки, определения типа региональной и локальной тектонической структуры, установления литологической формации, геолого-генетического комплекса и типа пород.

Минеральный состав, структура и текстура горных пород. При описании горных пород в полевых условиях фиксируются: их возраст, генезис, название, цвет, минеральный состав, структура, текстура, мезо- и микротрещиноватость.

Основные требования к описанию минеральной части пород приведены в разд. 6.3 и сводятся к следующему: макроскопически или с помощью лупы определяется минеральный состав горных пород с установлением состава основных породобразующих минералов и их процентного содержания, состава второстепенных и вторичных минералов. При описании изверженных горных пород важным диагностическим признаком является процентное содержание темноцветных минералов и кварца, а при описании осадочных пород — их карбонатность, которая определяется с помощью раствора кислоты.

При описании в полевых условиях структурных характеристик породы устанавливаются: 1) степень их кристалличности (полнокристаллическая, стекловатая, гипокристаллическая и т. д.); 2) абсолютная величина кристаллических зерен (грубо-, крупно-, средне-, мелко- и тонкозернистые); 3) относительная величина кристаллов или зерен (равномерно- или неравномернозернистая, порфиристая и порфириовидная); 4) форма минеральных компонентов (изометрические, таблитчатые, призматические и т. д.); 5) идиоморфизм и последовательность выделения кристаллов в изверженных горных породах.

При описании текстурных характеристик горных пород фиксируется расположение минеральных составляющих в породе и определяется тип текстуры (однородная, директивная, сферическая), а также отмечается характер выполнения пространства минералами (плотное компактное, пористое).

Во время исследования директивных текстур указываются ориентировка текстурных элементов, их минеральный состав, мощность и расстояние между ними. Для пористых текстур указывается примерное процентное содержание пор.

Большое внимание уделяется соотношению в разрезе пород различного состава и описанию характера их контактов. В пределах однородных по литологическому и петрологическому составу толщ выявляются закономерности изменчивости их структурно-текстурных особенностей. Особенно пристально изучаются прослои, линзы и различные включения слабых пород.

В ходе инженерно-геологического изучения строения массива особое внимание обращается на степень выветрелости и вторичной измененности пород, а также на характер и степень их микротрещиноватости, которая прослеживается в пределах элементарного блока породы и имеет унаследованный характер по отношению к макротрещиноватости. При описании микротрещиноватости выделяются главные системы трещин, определяются их ориентировка в пространстве, густота, протяженность, характер стенок, форма и размер микроотдельностей, которые создают вторичную структуру породы.

Форма залегания. В процессе инженерно-геологической съемки с помощью обычных геолого-структурных приемов устанавливают характер залегания горных пород (пласты, покровы, батолиты, штоки, дайки и т. д.), определяют мощность основных структурных элементов, элементы залегания, тип контактов между формациями, геолого-генетическими комплексами и типами пород, исследуется характер дислоцированности.

При складчатом строении определяются тип (симметричные, асимметричные) и характер (стоячая, наклонная, опрокинутая, лежачая, перевернутая) складок, их форма (округлые, угловатые, полукруглые, зигзагообразные, гребневидные, параболические, гиперболические, веерообразные, сундучные и т. д.). Кроме того, в пределах складчатых структур выделяют отдельные элементы складок (ядро, крылья, шарнир, ось). С помощью компаса и рулетки измеряют ширину, высоту, крутизну, амплитуду и радиус складок.

Тектонические нарушения. Если в строении массивов имеются тектонические нарушения, то они исследуются самым тщательным образом. Прежде всего определяются порядок или размеры тектонического нарушения (глубинные разломы, разрывы и трещины), устанавливается тип нарушения (сбросы, сдвиги, сбросо-сдвиги, надвиги, шарьяжи); прослеживаются элементы тектонического нарушения (поверхность разрыва, зона разрыва, крылья); определяются амплитуда смещения, угол падения поверхности смещения по отношению к горизонтальной поверхности и вмещающим породам и т. д.

Во время мелкомасштабных исследований, когда строение массива изучается на уровне формаций, целесообразно оценивать степень тектонической нарушенности, используя коэффициент мегатрещиноватости (по Т. Ю. Пиотровской, Н. С. Кра-

силовой), представляющий собой отношение протяженности тектонических нарушений к единице площади (1 км^2).

Трещиноватость. Она является одним из важнейших и обязательных компонентов строения массивов. Методика изучения трещиноватости рассмотрена в разд. 13.3. Для ее изучения применяется трещинная съемка, включающая: 1) установление генезиса трещин, их возраста и последовательности образования; 2) выявление основных систем трещин, их ориентировки, геометрических параметров и закономерностей распределения в массиве; 3) определение количественных критериев трещиноватости (коэффициент трещинной пустотности, модуль трещиноватости, блочность); 4) картирование зон трещиноватости определенного генезиса — первичной, тектонической, выветривания, присклоновой разгрузки и определенной интенсивности (слабо-, средне-, повышено-, сильно-, очень сильнотрещиноватых, раздробленных пород), 5) прослеживание и привязку к плану сети крупных трещин.

Таким образом, в результате изучения проводится районирование массива по интенсивности трещиноватости и характеру (форме и размеру) блочности.

Слоистость. В процессе изучения слоистости определяются ее тип (горизонтальная, косая, волнистая и т. д.), мощность и состав прослоев, взаимное расположение и повторяемость, характер поверхности напластования, ориентировка в пространстве. Особого внимания заслуживают зеркала скольжения, часто приуроченные к поверхностям напластования.

Сланцеватость. При исследовании слоистости, определяются тип сланцеватости, степень рассланцевания, расстояние между поверхностями сланцеватости, характер поверхности. Особое внимание уделяется выявлению поверхностей сланцеватости с зеркалами скольжения, их густоте и протяженности. Определяется ориентировка сланцеватости и устанавливается ее связь с элементами залегания горных пород, естественными склонами и проектируемыми искусственными инженерными выработками.

Неоднородность. Оценка неоднородности строения массива проводится на основании анализа изменчивости величины элементарных блоков, размер и содержание которых определяются масштабом и целями исследований. Так, при описании массивов, сложенных породами одной формации, в качестве однородных элементов могут рассматриваться массивы, отвечающие объему понятия геолого-генетический комплекс. В массивах, образованных породами одного типа и обладающих однородной по интенсивности трещиноватостью, элементарные блоки, образующие структуру массива, ограничены системами мелких трещин различного генезиса (первичной отделимости, тектоническими, выветривания и т. д.).

Для оценки однородности используются зарисовки или фотографии форм и размеров элементарных блоков с примене-

нием простейших статистических приемов обработки (построение гистограмм блочности). При мелкомасштабных исследованиях такую статистическую обработку можно проводить применительно к блокам, вырисовывающимся на карте.

Анизотропия строения массивов оценивается на основании исследования поверхностей неоднородности (слоистости, сланцеватости, трещиноватости) и по разным направлениям. Обязательными являются направления вкрест ориентировке неоднородностей и параллельно им. Наиболее полное представление о характере анизотропии получается при круговом построении профилей. При исследованиях можно замерять границы неоднородностей, приводя их к единице длины, или размеры элементов, обобщая их в виде гистограмм. Степень анизотропии оценивается коэффициентом анизотропии, представляющим собой отношение минимальных векторных показателей к максимальным.

Сведения о неоднородности и анизотропии строения массивов служат основой для построения инженерно-геологических моделей и постановки исследований по изучению физико-механических свойств горных пород и слагаемых ими массивов.

Следует отметить, что приемы и методика визуального изучения строения горных пород и слагаемых ими массивов мало зависят от масштаба исследований. Они отличаются только размерами неоднородностей, которые составляют структуру массивов разных порядков.

Таким образом, схема определения строения горных пород и слагаемых ими массивов представляется следующей. В процессе инженерно-геологической съемки определяется тип региональной и локальной тектонической структуры, обособляются массивы различных порядков по характеру массивообразующих единиц (формации, геолого-генетические комплексы, типы, виды). В пределах последних устанавливаются черты строения массива: характер и форма залегания, слоистость, сланцеватость, генезис и интенсивность трещиноватости, форма и размер элементарного блока, неоднородность, анизотропность и т. д.

Особую группу скальных массивов, отличающуюся некоторым своеобразием их изучения, составляют массивы дизъюнктивов. Они характеризуются рядом неблагоприятных инженерно-геологических условий — аномально высокими значениями трещиноватости, аномально низкими показателями физико-механических свойств и, как правило, высокой фильтрационной проницаемостью. Своеобразие этих массивов заключается в том, что они образуют вытянутые линейные тела, обладающие четким зональным строением. В их пределах, по М. В. Рацу и М. И. Погребинскому, выделяются следующие зоны: 1) собственно разрыва, 2) дробления и мланитизации; 3) повышенной трещиноватости или влияния разрыва. В пределах каждой из выделенных зон описывается тип горных пород, иссле-

дуются закономерности распределения трещиноватости как главного компонента структуры (ориентировка главных систем трещин, модуль трещиноватости, коэффициент трещинной пустотности, зеркала скольжения и т. д.). Оценивается всегда четко выраженная анизотропия трещиноватости. Изучение трещиноватости этих массивов по линиям профилей, пересекающих все основные подзоны и ориентированных вкрест основного нарушения, более рационально, чем метод опорных площадок.

10.2. ДИСТАНЦИОННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

При инженерно-геологическом изучении строения массивов скальных пород широкое применение получили стереофотограмметрические методы, обеспечивающие получение адекватных объекту съемки стереомоделей, которые можно изучать в привычном для нас виде и, что особенно важно, измерять, обеспечивая нанесение на карту геологических и других границ с инструментальной точностью. Объемную модель объекта, воссозданную стереоприбором при помещении в него стереопар снимков, можно изучать при увеличении в 5—8 раз и большем, что резко повышает детальность дешифрирования контактов пород, разрывов, трещин, их морфологии и т. п. Результаты дешифрирования наносят на инженерно-геологическую карту с помощью универсальных стереофотограмметрических приборов одновременно с рисовкой рельефа. Оба процесса механизированы, что сокращает время составления карты и увеличивает ее точность. Необходимость использования стереофотограмметрических съемок при изучении массивов сложного геологического строения, значительной высоты и крутизны определяется также тем, что практически невозможно покрыть их наземными маршрутами с необходимой частотой.

Применение стереосъемки облегчает полевые исследования, сокращает их сроки и приводит к получению результатов нового качества. С этой целью можно использовать: космические, высотные и обычные аэрофотоснимки; перспективные стереопары, полученные с вертолета; дальние и ближние наземные, а также подводные фототеодолитные стереоснимки. Они могут быть получены в черно-белом, в естественном или условном (спектрональном) цветных вариантах. Представляются перспективными аэрокосмические и наземные тепловые, радиолокационные и другие съемки, применяемые в комплексе с традиционными методами стереофотограмметрии.

Как указано в разд. 6.2, космические и высотные фотоснимки дают возможность оценить принадлежность скального массива к определенной складчатой или разрывной геологической структуре. По аэроснимкам устанавливают основные неоднородности массивов, их тип и формы залегания. Эти методы важны в основном при региональных исследованиях.

При изучении локальных участков наибольшее значение имеет сочетание крупномасштабной аэрофотосъемки и съемок с вертолета с наземной фототеодолитной съемкой. Необходимость такого сочетания обусловлена неодинаковыми возможностями этих методов при решении инженерно-геологических задач.

При изучении строения массивов скальных пород стереофотометоды обеспечивают: нанесение на карту с инструментальной точностью геологических, геоморфологических и других контуров, характеризующих строение массива и его неоднородность; точное определение положения пластов и разрывов, в том числе если они занимают большую площадь; изучение строения и размеров обвально-оползневых ниш отрыва и их объемов, что необходимо, например, для определения среднего сопротивления пород сдвигу методом обратных расчетов; качественную и количественную характеристику трещиноватости пород. В благоприятных случаях можно установить генетические типы тектонических разрывов и трещин (скальвания и отрыва) и их относительный возраст, что способствует изучению истории деформаций. Количественная характеристика разновозрастных эрозионных форм в различных комплексах пород используется в качестве косвенного показателя свойств пород в массиве. По фотону и растительным сообществам судят об обводненности массивов пород.

Фототеодолитная съемка менее известна в среде инженеров-геологов. В связи с этим надо кратко рассмотреть ее.

Фототеодолитная съемка, ее модификации и дешифрирование снимков

Фототеодолитная стереосъемка подразделяется на дальнюю и ближнюю. Рубежом между ними служит отстояние 20 м. Дальняя съемка производится фотокамерами типа 1318 фирмы «Карл Цейсс, Йена» с фокусным расстоянием около 200 мм, ближняя — спаренными малоформатными камерами различных типов.

В первом случае для получения стереофотограмметрических пар снимков объект фотографируют с концов базиса определенной длины (десятки и первые сотни метров). Базис выбирают примерно параллельным объекту съемки. Обычно с одного базиса получают три пары снимков: левые AL , правые BL и нормальные AB . При съемке каждой стереопары оптические оси фототеодолита строго горизонтальны и взаимно параллельны. Плановое положение любой точки объекта определяется прямой пространственной засечкой проектирующими лучами с концов базиса фотографирования, иначе говоря, прямой фотограмметрической засечкой. Длина базиса зависит от масштаба съемки, точнее, от удаления объектов, изображение которых необходимо получить на плане с определенной точностью.

Пары снимков обрабатывают стереоскопически на специальных стереофотограмметрических приборах универсального типа — стереоавтографе *EL1318* или технокарте. Процесс построения прямой засечки автоматизирован и совмещен с измерением снимков с помощью особого развертывающего устройства. Горизонтали и геологические контуры вычерчиваются на карте непосредственно без набора плано-высотных точек.

Каждую стереопару на стереоавтографе обрабатывают фотограмметрист и инженер-геолог. Они совместно составляют топографическую основу, проводят геологические и другие границы, поэтому инженер-геолог обязан научиться рисовать геологические границы с помощью стереоавтографа.

Малоформатные камеры сконструированы в СССР. Серийную камеру *УМК 10/1318* выпускает фирма «Карл Цейсс, Йена». Установки состоят из двух камер, симметрично закрепленных на базисной линейке или подвижных. Камеры синхронные с изменяющимися фокусными расстояниями. Установка крепится на обычном топографическом штативе. Съемку можно производить с наклонной оптической осью ($0 \pm 90^\circ$). Иногда это дает возможность установить оптические оси камер перпендикулярно к наклонной поверхности скального массива, что особенно важно при изучении трещиноватости пород. С увеличенных снимков можно получать планы площадок размером 10×10 и 15×15 м в масштабе $1:100$ — $1:400$.

Для решения инженерно-геологических задач наибольший интерес представляют модели стереофотограмметрических камер (для расстояний 1—20 м), приведенные в табл. 10.

Таблица 10

Основные технические характеристики стереофотограмметрических камер, сконструированных И. Г. Индиченко

Модель камеры	Фокусное расстояние, мм	Формат кадра, мм	Переменный базис съемки, см	Примечание
СКИ-5	$50 \div 10$	24×36	13—100	Для съемки с базиса больше 150 см камеры автономно устанавливаются на штативах
СКИ-7	$40 \div 10$	24×36	12—150	
СКИ-8	$105 \div 20$	60×60	15—180	Камера универсального типа, автоматическая

Крутые и высокие морские береговые склоны, типа крымских, в связи с условиями рельефа приходится снимать фотогеодолитом в косых ракурсах, что значительно затрудняет инженерно-геологическую оценку массивов пород по стереоснимкам. Поэтому морской склон необходимо снимать аэрофотоаппаратом с движущегося судна при субпараллельных к простиранию берега и косых галсах.

Иногда оценить устойчивость приморского склона затруднительно или невозможно, не имея данных о строении, морфологии и истории развития его подводной части, формировавшейся, что следует подчеркнуть, как единое целое с надводной частью. В связи с этим возникает необходимость специально производить в крупных масштабах аэрофотосъемку массивов на морской отмели. Может быть снято и дно реки. Например, это было сделано при изучении одного из полиметаллических месторождений Сибири [44].

Как известно, аэрофотосъемка позволяет получать изображение морского дна до глубины 25 м, речного — до 10 м. В первом случае специальные съемки в ультрафиолетовой зоне спектра в три-четыре раза увеличивают этот предел. Для получения изображения дна на больших глубинах начинают применять подводную стереофотосъемку. Получают стереопары, покрывающие площадь морского дна в несколько квадратных метров.

Стереоскопическое дешифрирование фототеодолитных снимков с помощью измерительных приборов наиболее достоверно. Изучение строения массивов начинают со структурно-геологической типизации складчатых и разрывных форм, т. е. с дешифрирования на фототеодолитных снимках напластований, трещин, разрывов. Трещины напластования как основной элемент для определения формы и размера складок, другие первичные трещины, тектонические, сейсмогенные и экзогенные трещины дешифрируются по морфологическим признакам и размеру. Так, трещины напластования обнаруживаются благодаря их выдержанности и характерной частоте. Измеряют мощности слоев и пачек пород в типичных разрезах, что способствует реконструкции складок, выявлению их морфологических и генетических типов.

По морфологическим признакам и относительной интенсивности трещиноватости пород дешифрируются трещины-сместители, зоны дробления, главные сместители разрывов и их шовные, ленточные и четковидные участки. Простые разрывы распознают по резкой смене характера и интенсивности трещиноватости пород. Измерив элементы залегания сместителя и восстановив направления перемещения крыльев разрыва по смещению характерных элементов пород или сетки трещин, например, по прожилкам или элементам залегания одноименных трещин, можно указать тип разрыва — сброс, сдвиг и т. д. В благоприятных условиях можно отдешифрировать по морфологическим признакам и типичному расположению оперяющие трещины скальвания и отрыва, по которым, как известно, возможны реконструкции направлений относительных смещений крыльев разрывов.

Относительные возрастные соотношения трещин определяют с учетом их генезиса по выклиниванию и смещениям трещин, ксенолитов, контактов и т. д.

Элементы залегания пород, трещин и разрывов устанавливают по методу трех точек на благоприятных для этого площадках или пластовых треугольниках. Отметки точек получают непосредственно в масштабе плана. В том случае, когда плоскость пласта (трещины) в масштабе плана очень мала и точки оказываются очень близко друг от друга, по координатам, снятым со счетчиков прибора, точки надо нанести на миллиметровую бумагу в произвольно большем масштабе, чем план (в 10—100 раз). На миллиметровой бумаге отмечают линию севера и вычисляют азимуты простирания и падения разрыва или трещины. Эти определения точнее тех, которые дают замеры компасом на малых площадках.

Методы количественной характеристики трещиноватости скального массива

Измерение по планам, полученным стереофотограмметрическим способом, длины трещин и разрывов, а также расстояний между ними не представляет большой сложности. Согласно обобщениям и разработкам, сделанным Б. М. Фаминцыным, А. Ф. Бернгофом и В. С. Федоренко, сетки трещин разного генезиса можно измерить по снимкам сравнительно ровных площадок, «падающих» под углом от 20 до 65° в сторону базиса съемки. В зависимости от величины этого угла трещины зарисовывают с помощью стереоавтографа на горизонтальную или вертикальную плоскость. Такой выбор возможен при наличии стереоавтографа с электромеханической передачей между прибором и координатным столом, на котором выполняется автоматическая рисовка рельефа обнажения и геологических линий и контуров.

Длину трещины или разрыва измеряют на горизонтальном или вертикальном плане (с учетом их наклона к плоскости проекции) или вычисляют аналитически по пространственным координатам их концов. Аналитический способ требует большого объема вычислений. Способ становится более эффективным и точным при использовании ЭВМ. В общем случае при сравнительно небольшом объеме исследований практичнее измерять длины и расстояния между трещинами на проекциях, графически трансформированных в плоскость обнажения. Трансформация выполняется методом «квадратов», по трем-четырем или большему числу трансформационных точек, планово-высотное положение которых измерено с помощью стереоавтографа (рис. 28).

Трансформирование в плоскость обнажения можно произвести также фотомеханическим и оптико-графическим способом. В первом случае фотонизображения, имеющиеся на негативах стереопары, придают необходимый масштаб с помощью фототрансформатора, используя известные приемы фотограмметрии. Оптико-графическую трансформацию снимков

стереопары или нетрансформированного плана производят на приборе для переноса контуров с аэроснимков.

На трансформированных снимках проще измерять площади зон и контактов ослабления массивов пород. Необходимость в измерении площадей поверхностей по стереопарам наземных съемок возникает при вычислении коэффициентов трещинова-

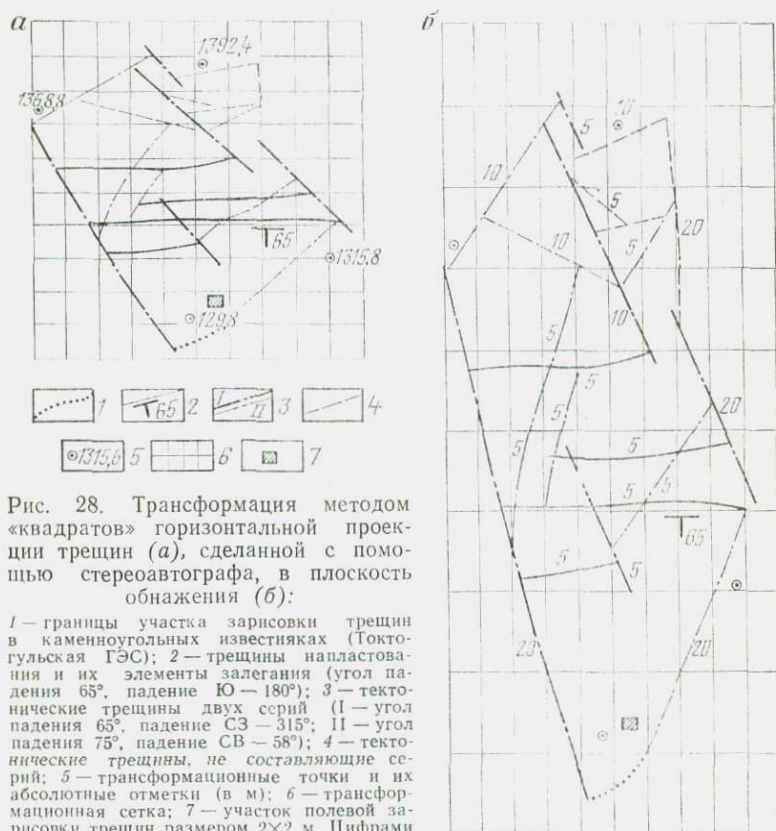


Рис. 28. Трансформация методом «квадратов» горизонтальной проекции трещины (а), сделанной с помощью стереоавтографа, в плоскость обнажения (б):

1 — границы участка зарисовки трещин в каменноугольных известняках (Токтогульская ГЭС); 2 — трещины напластования и их элементы залегания (угол падения 65° , падение Ю — 180°); 3 — тектонические трещины двух серий (I — угол падения 65° , падение СЗ — 315° ; II — угол падения 75° , падение СВ — 58°); 4 — тектонические трещины, не составляющие серий; 5 — трансформационные точки и их абсолютные отметки (в м); 6 — трансформационная сетка; 7 — участок полевой зарисовки трещин размером 2×2 м. Цифрами показана ширина трещины в миллиметрах

тости пород, объемов оползне-обвалоопасных массивов пород и конусов накоплений, определении среднего сопротивления скальных пород сдвигу методом обратных расчетов и в других случаях. Приходится измерять не только сравнительно ровные поверхности с относительно правильными границами (параллелограммы, треугольники и т. д.), но и поверхности со сложными границами и микрорельефом. Их надо делить на простые правильные участки, площадь которых вычисляют по плоским координатам их вершин, считанным со счетчика прибора.

Стереометод обеспечивает получение зарисовки серии трещин в перпендикулярной к ним плоскости, что необходимо для

установления частотного ряда трещин, т. е. истинных расстояний между трещинами в их естественной последовательности. Если удастся получить масштабные зарисовки для всех преобладающих серий трещин, то по частотным рядам можно оценить блочность массива пород. Б. М. Фаминцыным разработан способ составления таких зарисовок при проектировании трещин с помощью стереоавтографа на перпендикулярную к ним плоскость, выбранную на серии параллельных разрезов. Необходимо, чтобы след каждой трещины пересекался в двух точках хотя бы одним разрезом. Этим и определяется число разрезов. Для построения надо знать элементы залегания пород и серии трещин, а также азимут базиса съемки.

Сущность построения заключается в следующем. У подошвы обнажения мы как бы выбираем линию, параллельную базису съемки, и бесконечную плоскость, которая через нее проходит. Затем наклоняем эту плоскость до положения, когда она перпендикулярна к «бесконечным» трещинам данной серии. По отношению к плоскостям, проходящим перпендикулярно к «пласту» через линии простирания и падения трещин, рассматриваемая плоскость зарисовки занимает обычно диагональное положение. Но поскольку она перпендикулярна к поверхности трещин, следы трещин, зарисованные на ней с помощью стереоавтографа, будут находиться на истинных расстояниях друг от друга (в масштабе плана). Измерения дают более точные данные, если бесконечная плоскость выбрана возможно ближе к поверхности обнажения. В этом случае меньше угловые погрешности, максимально влияющие на общую точность измерений.

Определение ширины трещин сложнее. Например, вертикальная трещина, секущая склон в поперечном направлении, на снимке выглядит, как уходящая вдаль дорога. Это значит, что на ближнем плане ширину ее изображения можно измерить с одной точностью, в средней части стереомодели — с другой, а на дальнем плане это вообще невозможно.

Для установления ширины трещин по материалам съемки фототеодолитом и малоформатными стереофотокамерами искусственных обнажений предложено три способа: координатный, сравнения и дешифрировочный. Первым способом раскрытия трещин определяют по разности координат видимых границ трещин в вертикальном или горизонтальном сечении стереомодели обнажения. По отношению к элементам залегания трещин эти сечения обычно являются косыми. Трещины, имеющие в плоскости снимка наклон менее 45° , измеряют в вертикальном сечении, а более 45° — в горизонтальном. Координатным способом можно измерять раскрытия трещин на ровных поверхностях обнажения, если их фотоизображения шириной не менее 0,2 мм, т. е. в три раза превосходят размер визирной марки стереоприбора (обычно равный 0,07 мм). В предельном случае погрешность измерения не превышает 20 %. Чтобы

повысить точность замеров этим и другими способами, целесообразно увеличить стереоснимки в три—пять раз. Так, например, на фототеодолитных снимках, полученных с отстояний порядка 1000 м, можно измерять трещины шириной больше 20 см, а на увеличенных — больше 5 см.

Способ сравнения применяют при ширине фотоизображения менее 0,2 мм. Визуально оценивают, какая доля марки или сколько марок укладываются в изображении трещины. Различают изображения шириной в десятые доли марки, в полторы марки, две с половиной и три марки. Рельеф обнажения влияет на точность оценок. Этим можно пренебречь, если фотоизображение трещины шириной от 0,1 до 1,0 марки. Чтобы не вводить сложно получаемые поправки на рельеф обнажения при измерении более широких фотоизображений, места для замеров надо выбирать на сравнительно ровных участках обнажения, почти перпендикулярных к оптической оси фотокамеры и приблизительно параллельных базису съемки. Поправки не требуются для изображений размером 0,04—0,1 мм при наклоне поверхности обнажения более 70° и значениях угла встречи плоскости трещины с поверхностью обнажения более 60°, а для изображений размером 0,1—0,2 мм — соответственно при углах более 80 и 70°.

Ширину трещин, имеющих изображение меньше одной десятой марки стереоприбора, можно приближенно определить косвенным способом — по минимально возможной ширине трещины, которая целиком или прерывисто изобразилась на фотопластинке данного качества в зависимости от дальности фотографирования. Заметим, что прерывистость фотоизображения трещины имеет диагностическое значение только в пределах плоских субвертикальных участков обнажения.

Сопоставление полученных этими способами значений ширины трещин с полевыми данными и анализ погрешностей стереофотограмметрических измерений показали, что по своей точности последние равноценны полевым, а в области больших раскрытий превосходят их. По существу, такие определения всегда точнее полевых, так как при стереоизмерениях ширина каждой трещины может быть оценена не в нескольких, а во многих характерных местах, поскольку они в равной степени «доступны». Это дает возможность полнее учесть изменчивость раскрытий и в целом достовернее оценить вклад крупных трещин в значение коэффициента трещинной пустотности (КТП).

Этот вывод справедлив для измерений по стереопарам, полученным камерами СКИ с отстояний до 20 м. В этом случае редкие максимальные погрешности не превышают 20 % ширины трещин с раскрытием больше 1 мм. При увеличении малоформатного снимка в пять раз среднее отклонение от истинных значений ширины трещин при измерениях координатным способом равно 4 % (при полевых измерениях — 5 %). При этом среднее отклонение между полевыми и камеральными

определениями не превышает 2,5 %. Применение косвенного способа также дает приемлемые результаты.

На фототеодолитных снимках, полученных с отстояния 100 м и меньших и в интервале 750—1100 м, с такой же точностью ($\pm 20\%$) измеряются трещины шириной соответственно более 10 и 200 мм. Если увеличить снимки, то этот диапазон раскрытий может предположительно начинаться соответственно с 5 и 100 мм. При дальности фотографирования 100—750 м также должны оцениваться трещины шириной от 20 до 200 мм.

При отстоянии съемки фототеодолитом от 50 до 200 м масштаб рисовки трещиноватости с помощью стереоавтографа равен 1:25—1:100, при отстояниях 200—100 м он изменяется от 1:100 до 1:500. Съемка малоформатными камерами обеспечивает рисовку трещин в масштабах 1:10—1:100. Площадь обнажения, которая захватывается стереопарой СКИ-7 с отстояния 20 м, составляет около 100 м², а фототеодолитом с отстояния 100 м—около 2500 м². Эти площади во много раз больше тех, которые обычно изучаются в поле способом непосредственных измерений (4—25 м²). Поэтому полученные на таких больших площадях крупномасштабные зарисовки трещин являются более представительными, а данные о трещиноватости—более точными. Во многом это связано с более точной оценкой редких, но крупных трещин, зон трещиноватости и разрывов. Так, коэффициент трещинной пустотности каменноугольных известняков района Токтогульской ГЭС, полученный на одном из участков методом полевых зарисовок обнажений площадью 4 м², был оценен в 0,66 %. Изучение трещиноватости стереометодом на большой площади (600 м²) показало, что его значение равно 1,7 %.

С каждого отстояния съемки стереометодом возможна количественная характеристика только некоторой группы трещин, т. е. получение лишь частных коэффициентов трещинной пустотности. Значения общего КТП крупного массива можно получить, изучая в пределах его систему обнажений с типичной трещиноватостью. Чтобы наметить такую систему, сначала необходимо в пределах всего обнажения выделить по специально полученным аэро- и фототеодолитным снимкам участки с однотипной трещиноватостью. При этом трещиноватость пород на недоступных для этих съемок «мертвых» пространствах оценивают по материалам перспективного фотографирования с вертолета.

Размеры типичных обнажений должны быть в 10—15 раз больше среднего расстояния между трещинами наиболее редкой серии того диапазона раскрытий трещин, который изучается на данном обнажении.

На обнажении выбирают несколько типичных площадок для раздельного изучения трещин с малыми (0,1—3 мм), средними (4—10 мм) и крупными (11 мм и более) раскрытиями. Иногда отдельные площадки приходится выбирать вне типич-

ного обнажения. В зависимости от условий съемки (возможности подхода к обнажению на необходимое расстояние, выбора базиса определенной ориентировки и длины, условий освещения и т. д.) типичные обнажения и площадки могут исследоваться при различных сочетаниях съемок фототеодолитом и малоформатными камерами и методов непосредственного изучения трещин. В определенной мере последнее практически всегда необходимо для опробования заполнителей трещин, определения их влажности, степени выветривания пород вдоль трещин и т. п.

Как правило, на каждом участке с однотипной трещиноватостью достаточно иметь по два-три типичных обнажения, а в их пределах — по столько же типичных площадок каждого класса. Общий КТП типичного обнажения получают суммированием частных значений КТП, вычисленных таким же путем на площадках. Аналогичным образом вычисляют КТП участка.

Использование стереофотограмметрических методов позволяет изучать трещиноватость крупного массива в трех взаимно перпендикулярных или субперпендикулярных плоскостях и таким образом количественно оценить объемную трещиноватость массива и составить его геолого-структурную модель. По формуле $\rho = \rho_0(1 - K_V)$ вычисляют плотность пород массива (ρ_0 — плотность породы в образце; K_V — коэффициент объемной трещиноватости).

При изучении объемной трещиноватости методы стереофотограмметрии обеспечивают получение надежных признаков для идентификации трещин, их серий и систем, разрывов. Возможность точной пространственной привязки этих структур и фотограмметрического определения их залегания также способствует идентификации. Важно лишь последовательно накапливать и систематизировать признаки дешифрирования этих структур (по частоте трещин, элементам залегания, взаимным сочетаниям, характеру линий изображения и их ширине и т. п.). Признаки надо обобщать по группам трещин с разными раскрытиями.

Составление геолого-структурной модели массива и подсчет его объема

С помощью стереометодов можно составить геолого-структурную модель массива и подсчитать его объем, что особенно важно для оценки устойчивости оползне-обвалоопасных массивов и тех, которые избраны для искусственного обрушения, например при возведении плотины направленным взрывом. Построение модели возможно, если пласты образуют сравнительно простые структурные формы, а разрывы и основные системы трещин хорошо выдержаны. Если этого нет, то обязательно изучение строения массива разведочными средствами. В этом случае в штольнях целесообразно использовать мало-

форматные камеры, а при бурении скважин — буроскопы. Наибольший интерес представляют фототелевизионные модификации буроскопов. Их значение возрастет, когда они станут стереоскопическими. Наиболее совершенными являются буроскопы конструкции Гидропроекта.

Модель массива воссоздают с помощью серии продольных профилей, ориентированных сверху вниз по склону на характерных участках и, следовательно, расположенных на разных расстояниях друг от друга. Целесообразно строить их в более крупном масштабе, чем масштаб плана. При построении профиля визирное приспособление координатографа стереоприбора последовательно устанавливают в характерных геоморфологических и геологических точках и считывают их отметки. Профиль, построенный таким способом, точнее составленного по горизонталям плана. В качестве поперечных профилей можно рассматривать сечения, образующие на плане горизонтали (вместе с геологическими границами и характерными точками в их пределах).

Для построения модели важно знать частотные ряды трещин и напластований, последовательность расстояний в них и пространственное положение характерных точек пересечения рядов. То же относится к пересечениям последних с теми контактами и зонами ослабления массивов, которые не образуют серии. Такое построение — важный шаг к созданию инженерно-геологической модели скального массива.

Исключительно важны для оценки устойчивости, скорости и дальности смещения массива определения стереометодом геометрических характеристик поверхности движения — наклонов и размеров ее плоскостей и в целом, — формы ниш отрыва, формируемых естественным путем. Иногда такие определения — единственный способ изучения недоступных массивов.

При определении объема массива скальных пород на каждом из продольных разрезов показывают заданную или естественным образом сформированные поверхности отчленения массива, после чего измеряют площадь его сечения. Полученную величину используют для вычисления частных объемов при каждом профиле, суммирование которых дает общий объем массива.

Методы реконструкции поверхности склона, определения строения и объема ниш отрыва обвалов и оползней

Строение ниш отрыва оползней и обвалов устанавливают по фототеодолитным снимкам достаточно подробно, особенно если они сфотографированы фронтально. Полевые уточнения необходимы в основном в отношении выветрелости пород, заполнителя трещин, морфологии поверхности их стенок и т. п.

Для реконструкции предоползневой поверхности склона используется метод, предложенный Б. М. Фаминцыным и В. С. Фе-

доренко. Поверхность реконструируется по горизонтальной и вертикальной проекциям и серии характерных разрезов, полученных в одном масштабе при стереофотограмметрической обработке фототеодолитных снимков и связанных между собой по правилам проекционного черчения. В упрощенном виде, т. е. с редкими горизонталями, без напластований, разрывов, геологических границ и т. п., принципиальная схема таких построений приведена на рис. 29.

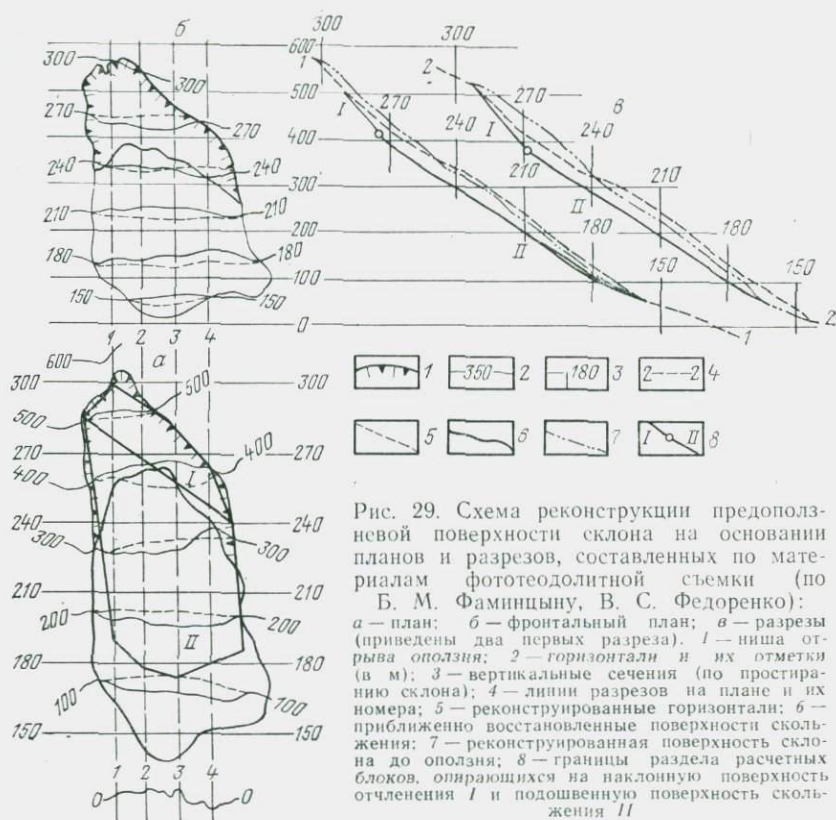


Рис. 29. Схема реконструкции предоползневой поверхности склона на основании планов и разрезов, составленных по материалам фототеодолитной съемки (по Б. М. Фаминщину, В. С. Федоренко): а — план; б — фронтальный план; в — разрезы (приведены два первых разреза). I — ниша отрыва оползня; 2 — горизонтали и их отметки (в м); 3 — вертикальные сечения (по простиранию склона); 4 — линии разрезов на плане и их номера; 5 — реконструированные горизонтали; 6 — приблизительно восстановленные поверхности скольжения; 7 — реконструированная поверхность склона до оползня; 8 — границы раздела расчетных блоков, опирающихся на наклонную поверхность отклонения I и подошвенную поверхность скольжения II

Предоползневая поверхность склона сначала реконструируется способом приближений по плану (рис. 29, а) и разрезам, ориентированным по генеральному падению склона. Сначала на разрез выносят основные точки, характеризующие бровку ниши отрыва, нижний край оползневой или обвальной тела, тыловой шов погребенной террасы, геологические контакты, разрывы и т. п. Приблизительно намечают, где должен находиться нижний край ниши отрыва (например, у тылового шва террасы или на некоторой высоте над ним). При этом учитывают, насколько ниша отрыва приурочена к конкретным зонам ослаб-

ления. На плане восстанавливают горизонтали, учитывая их «ход» в верхней и нижней, а затем в средней частях склона, а также морфологические особенности соседних склонов-аналогов. Намеченные горизонтали выносят на разрезы, где и получают первый предполагаемый вариант предоползневой поверхности склона. При этом точки пересечения реконструированных на плане горизонталей с линией соответствующего разреза то выносят на нем вперед (в области ниши отрыва), то «заглубляют» в склон (в зоне аккумуляции масс).

Второй вариант положения поверхности получают независимо от первого построения, используя фронтальный план (рис. 29, б). В этом случае точки пересечения предполагаемых горизонталей с линией разрезов выносят вверх от линии современной поверхности (в области ниши отрыва) или же вниз от нее (в зоне аккумуляции масс). Варианты усредняют, и во всю систему построений вносятся коррективы.

Вторую корректировку производят при сравнении на осевых разрезах сечений зон отрыва и аккумуляции. Эта операция наиболее ответственна, при проведении ее необходимо учитывать: степень возрастания объема тела вследствие его дробления; «растекание» глыбово-щебнистых масс; величину срезки гребня обвального или оползневой перекрытия вторичными оползнями, смещающимися в противоположные стороны вниз и вверх по долине и т. п. У блоковых оползней больших объемов указанные выше сечения на разрезе через осевую зону ниши отрыва и гребневую часть перекрытия практически равны, в других случаях сечение оползневой тела по площади больше на 20—25 %, а иногда при значительном растекании масс в стороны от главной оси движения оно может быть меньше, но, как показывает опыт, не более чем на 15 %. Из этих цифр следует, что максимальная погрешность в определении объема смещенного массива не должна превышать 25 % (при условии, что закономерности формирования, тип и строение оползневой или обвального тела хорошо известны).

После того как сделаны реконструкции по всем разрезам, производят третью корректировку. Точки сопряжения на разрезах субплоскостей, образующих нишу, выносят на план и взаимно смещают так, чтобы они составляли на нем прямые линии. Необходимы поправки и на разрезах (понижение или повышение нижней точки висячей ниши отрыва, изменение глубины захвата склона и т. п.). После двух-трех попыток удается удовлетворительно восстановить предоползневую поверхность склона и положение подошвенной поверхности скольжения даже при отсутствии разведочных выработок.

Рассмотренные построения, выполняемые на стереофотограмметрической основе, обеспечивают: 1) удовлетворительно точный подсчет объема сместившегося массива с проверкой по объему оползневой или обвального тела, если оно

сохранилось или реконструировано; 2) определение строения, размеров и наклонов элементов ниши отрыва, т. е. ее типа, и связи этих элементов с разрывами, трещинами, напластованиями и т. п.; 3) точное определение профиля склона по главной оси движения отчленившегося массива и оползневого тела и в итоге — внешней границы опасной зоны. Все это дает возможность составить принципиальную схему строения ниши отрыва с указанием тыловой и боковых поверхностей отчленения и подошвенной поверхности скольжения, их границ, наклонов, площадей и т. п.

На рис. 28, а показана весьма простая ниша отрыва, состоящая из двух поверхностей крутизной 50° (I) и 32° (II), пересекающихся по диагональной к склону линии. В других случаях аппроксимация неровных ниш отрыва до простых форм гораздо сложнее. На основании принципиальной схемы строения ниш отрыва составляют систему уравнений для вычисления среднего сопротивления пород сдвигу (см. разд. 16). При этом объем массива вычисляют путем суммирования объемов, прилегающих к каждому разрезу, или (по Э. Г. Газиеву) интегрируя соответствующее уравнение при некотором интервале горизонталей, пересекающих смещенный блок.

Как правило, ниши отрыва имеют сложную форму. Поэтому для решения задачи об их устойчивости необходимо иметь несколько ниш отрыва или отчленившихся массивов, одновременное смещение которых может быть доказано. Применение стереофотограмметрии дает возможность использовать для этого и недоступные ниши, и массивы.

10.3. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Изучение строения скальных массивов, включающее определение положения и формы их кровли под чехлом рыхлых образований, выявление в пространстве контактов различных комплексов пород, выделение и прослеживание линий и зон тектонических нарушений и зон повышенной трещиноватости, определение мощности и строения зоны поверхностного выветривания и т. д. имеют весьма важное значение в инженерной геологии [38].

По результатам геофизических исследований производится схематизация исследуемого массива с выделением зон и блоков различных уровней и порядков, характеризующихся определенными геофизическими параметрами. Изучение особенностей геологического строения участка проектируемого сооружения облегчает проектирование, позволяет принимать более обоснованные решения по компоновке тех или иных узлов сооружения, намечать необходимые мероприятия по съему или укреплению ослабленных участков породы и т. д. Знание деталей геологического строения при подземном строительстве трудно переоценить.

Физическими предпосылками решения указанных задач являются теоретические и экспериментальные зависимости между параметрами различных геофизических полей (упругих волн, электрических, магнитных и др.) и характеристиками исследуемых пород [34, 37]. Искомые решения основываются на абсолютных значениях измеренных геофизических параметров и закономерностях распределения их в пространстве. Для получения необходимой геофизической информации применяются довольно сложные системы измерений при тесном сочетании наблюдений на поверхности горных массивов и во внутренних точках среды. Инженерно-геологическая интерпретация полу-

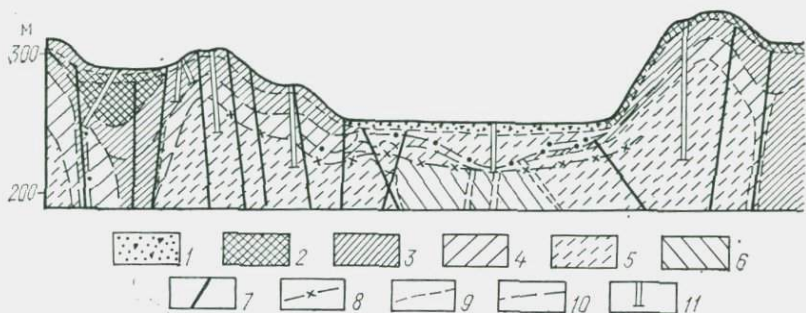


Рис. 30. Геолого-геофизический разрез:

1 — делювиально-аллювиальные отложения; 2 — 6 — кварциты и кварцитовидные сланцы с различными значениями v_p (в м/с) и ρ (в Ом·м) (2 — $v_p = 1,4-2,0$, $\rho = 40-80$; 3 — $v_p = 2,0-2,8$, $\rho = 80-150$; 4 — $v_p = 2,8-3,5$, $\rho = 150-200$; 5 — $v_p = 3,5-4,7$, $\rho = 250-500$; 6 — $v_p = 4,7-5,3$, $\rho > 500$); 7 — зоны тектонических нарушений; 8 — подошва зоны интенсивного выветривания; 9 — литологические границы; 10 — границы между породами разной степени сохранности; 11 — скважины

ченных данных производится на основе накопленного опыта подобных работ с учетом информации, получаемой при бурении, инженерно-геологической съемке и других видах изыскательских работ.

Для изучения строения скальных массивов наиболее перспективны площадные и объемные системы наблюдений при одновременном использовании нескольких геофизических методов, характеризующих среду совокупностью различных геофизических параметров. Этим достигается не только значительное увеличение полноты и надежности выделения в массиве пород с различными геофизическими свойствами, но и повышается достоверность инженерно-геологической интерпретации геофизических материалов. В качестве примера, подтверждающего изложенное, на рис. 30 приведен геолого-геофизический разрез, полученный в результате проведения комплекса площадных сейсморазведочных, электро- и магнитометрических исследований. Последующим бурением установлено, что погрешность определения основных инженерно-геологических границ не превышает 5 %.

В последние десятилетия при изучении строения массивов пород применяются сейсмические и ультразвуковые методы, с помощью которых можно получать достаточно обоснованное и полное представление о строении скальных массивов при одновременном значительном сокращении числа разведочных выработок. Ниже дается краткое изложение общих принципов и методики решения наиболее типичных задач с помощью сейсмических и ультразвуковых методов.

Прслеживание кровли скального массива под чехлом рыхлых отложений

Задача сводится к определению в пространстве положения горизонтальной или слабо наклонной границы раздела. Подстилающая среда характеризуется значительно более высокими значениями скорости распространения продольных волн, чем покрывающая среда, т. е. $v_2 > v_1$. При решении задач подобного типа в инженерной сейсмике применяется метод преломленных волн (МПВ), что обусловлено его большей информативностью и отсутствием ограничений на глубину исследований по сравнению с методом отраженных волн. С помощью МПВ можно изучать границы, расположенные на глубинах от единиц до десятков и сотен метров. В то же время метод отраженных волн в силу конструктивных особенностей применяемой аппаратуры позволяет выявлять границы раздела, начиная с глубин в первые сотни метров. Кроме того, МПВ дает возможность определять не только положение границ раздела, но и скорости упругих волн во всех выделенных пластах, в то время как метод отраженных волн (МОВ) — только положение границ. Единственное ограничение МПВ связано с тем, что скорости волн должны возрастать с глубиной, причем безразлично как, плавно или скачкообразно. Но, как показывает практика, в пределах верхней части разреза требование это в подавляющем большинстве случаев выполняется. Более благоприятны для изучения так называемые сильные границы, к которым относятся все границы с соотношением скоростей $v_2/v_1 \geq 1,33$. С этих позиций кровля скальных массивов почти всегда представляет собой сильную границу. При этом следует различать случаи, когда кровля скального массива расположена выше уровня грунтовых вод (УГВ) или ниже него. В первом случае задача проста и никаких сложностей обычно не возникает, так как перепад скоростей достаточно велик. Обводнение рыхлых образований приводит к резкому увеличению в них скорости распространения волн до значений 1700—2000 м/с и более, следствием чего может быть превращение сильной границы в слабую, особенно если скальный массив имеет зону выветривания. Наиболее неблагоприятен случай, когда УГВ расположен всего на несколько метров выше кровли скального массива. В этом случае бывает очень

трудно разделить волны от зеркала грунтовых вод и от кровли скального массива. Такие случаи обычно встречаются при разведке створов плотин на горных реках — в нижней части склона, где он сочленяется с террасой или поймой реки.

Наличие у скальных массивов зоны выветривания (ЗВ) ограничивает предельную мощность рыхлого чехла, при которой возможно надежное выделение кровли скального массива. Если мощность рыхлых образований превышает 20 м, то скорости у их подошвы могут быть близки к скоростям в верхней части зоны выветривания, что может привести к так называемому «выпадению» пласта, соответствующего ЗВ, и вместо кровли ее будет выделена подошва (ЗВ в этом случае объединяется с рыхлым чехлом).

Стандартная методика при прослеживании кровли скального массива — продольное профилирование с получением систем встречных и нагоняющих годографов и многократным (не менее четырех) перекрытием каждого интервала между пунктами взрыва (ПВ) или пунктами удара (ПУ). Расстояния между сейсмоприемниками обычно варьируют в пределах 2—10 м, в зависимости от мощности рыхлого чехла и масштаба исследований. Упругие колебания возбуждаются молотком или взрывным способом (при работах с многоканальной аппаратурой). Если на исследуемом участке имеются буровые скважины, то разведочные профили обязательно должны проходить через них для последующей увязки по глубине и введения поправок в значения скорости в покрывающей среде.

Изучение строения кровли скальных массивов

При детальном изучении участков строительства широко применяется площадная сейсмическая съемка с составлением карты граничных скоростей по кровле скального массива или сохранной его части (по подошве зоны выветривания). Этот вид исследований позволяет получить ценную для геологов и проектировщиков информацию о строении верхней части изучаемых массивов, т. е. установить положение контактов между различными комплексами пород, выделить в плане положение зон повышенной трещиноватости и закарстованности участков в известняках и т. п. При этом методика наблюдений на каждом из профилей ничем не отличается от описанной выше. Расстояния между профилями зависят от детальности исследований и предполагаемых размеров элементов, которые должны быть выделены при картировании. Примером подобных исследований может служить карта граничных скоростей по кровле известняков, прикрытых сверху слоем галечников мощностью от 1 до 15 м, полученная на участке проектируемого створа плотины на горной реке (рис. 31). Простирающиеся выделенных полос с равными значениями скоростей совпадает с направлением

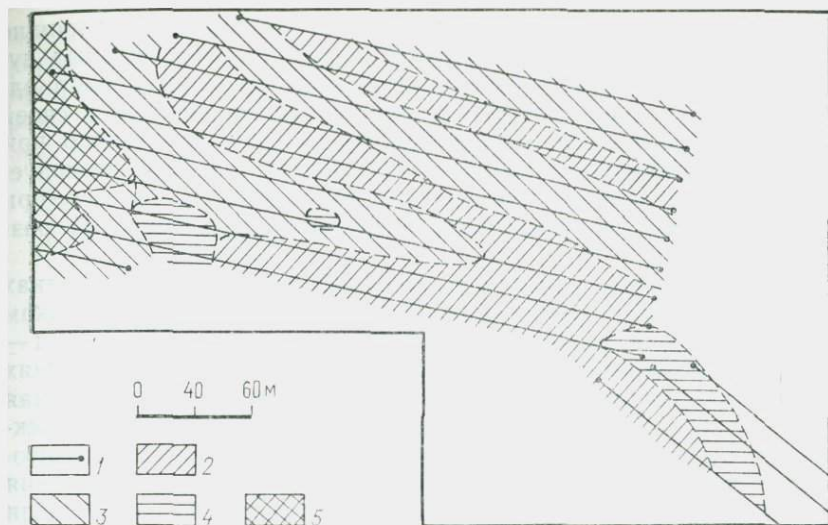


Рис. 31. Схематическая карта скоростей продольных волн v_p по кровле известняков каменноугольного возраста на одном из участков в Средней Азии: 1 — линии сейсмических профилей; 2—5 — участки пород с различными значениями скорости v_p (в км/с) (2 — $v_p > 5$, 3 — $v_p = 3.5-5.0$, 4 — $v_p = 2.5-3.5$, 5 — $v_p < 2.5$)

напластования известняков. Кроме того, по пониженным значениям скоростей удалось выделить участки повышенной трещиноватости, а также закарстованный участок, что было подтверждено впоследствии при строительстве плотины.

Изучение строения целиков пород между горными выработками

При проектировании высоконапорных плотин на горных реках в ходе изучения бортовых примыканий плотины в бортах долины обычно проходится несколько ярусов разведочных штолен, вдоль стволов которых исследуются строение, состояние и свойства пород. Для характеристики блоков породы между штольнями в настоящее время как в СССР, так и за рубежом (например, в Югославии, Японии, Франции) широко применяется сейсмическое просвечивание, позволяющее получить интегральные характеристики свойств массива, оценить изменение состояния и свойств массива с удалением от дневной поверхности, а также выделить и локализовать в пространстве отдельные ослабленные участки внутри изучаемых блоков. При проведении просвечивания сейсмоприемники располагают вдоль стенки одной из штолен, а взрывы производят в другой. Результаты измерений, полученных с помощью многоканальной аппаратуры, изображают в виде векторных диаграмм, или, как их называют в сейсморазведке, индикатрис скоростей.

При наблюдениях с одноканальной аппаратурой хорошие результаты дает методика просвечивания на параллельных лучах, когда источник колебаний и регистрирующий прибор одновременно и с равным шагом перемещаются каждый в своей штольне. Просвечивание по веерному способу эффективно при выделении локальных ослабленных участков внутри исследуемых блоков, а просвечивание на параллельных лучах — при изучении зоны поверхностного выветривания и бортовой разгрузки.

Обязательным видом исследований в горных выработках является также сейсмическое профилирование по стенкам штолен, которое выполняется на всем протяжении штольни — от устья до забоя с шагом приборов 1—2 м. При наблюдениях одинаково пригодна как одноканальная, так и многоканальная аппаратура. Этот вид наблюдений позволяет получить объективную картину изменения скорости на всем протяжении штолен. В дальнейшем данные профилирования и просвечивания используются для построения инженерно-геологической модели створа плотины. Описанный комплекс сейсморазведочных наблюдений применяется и при изучении инженерно-геологических условий в рудниках.

Карстовые пустоты и другие ослабленные прослои массива, характеризующие строение его внутренних частей, можно выделить с применением объемных систем наблюдений, и в частности методики сейсмического просвечивания. Численные методы решения прямых и обратных задач просвечивания позволяют достаточно надежно выделять участки с аномальными значениями геофизических параметров в целиках пород между горными выработками. Сочетание этой информации с результатами профильных геофизических измерений обеспечивает возможность построения сводных объемных инженерно-геологических моделей. Такие модели достаточно полно характеризуют строение исследуемых массивов.

Установление границ между отдельными геолого-генетическими комплексами и типами пород

Для решения этой задачи успешно применяются площадные сейсмические исследования в сочетании с различными видами каротажа: сейсмического, акустического или ультразвукового (УЗК).

Установление границ между отдельными геолого-генетическими комплексами и типами пород основано на зависимости скоростей распространения упругих волн от минерального состава и структурно-текстурных особенностей пород. Породы различных геолого-генетических комплексов, литологических и петрологических типов в неветрелом и нетрещиноватом состоянии различаются значениями скоростей упругих волн и часто своеобразной формой каротажных кривых. Границы

между ними устанавливаются по величинам скоростей и по форме каротажных кривых. Ниже приведены характерные значения скоростей для некоторых типов пород Норильского района.

<i>Породы</i>	<i>Значения скоростей продольных волн, м/с</i>
Габбро-долериты	6200
Гранито-гнейсы	5900
Базальты порфировые	5650
Базальты толеитовые	4900
Переслаивание:	
известняков, доломитов, мергелей	5800
песчаников и алевролитов	4500
алевролитов и аргиллитов	4400
песчаников, алевролитов, аргиллитов и углей	4300

На рис. 32 по результатам акустического каротажа четко прослеживается граница между нижнетриасовыми базальтами и толщей терригенных пород тунгусской серии. Выделенные толщи существенно различаются по уровню абсолютных значений скоростей v_p и форме каротажных кривых. Толща терригенных пород характеризуется более низкими значениями скоростей и большей изрезанностью каротажной кривой, что связано со слоистым строением разреза, обусловленным чередованием песчаников, алевролитов, аргиллитов и углей.

В пределах однородных по составу сохранных нетрещиноватых толщ на основании изменения скоростного разреза можно выделить отдельные разности, отличающиеся структурно-текстурными особенностями. Так, на рис. 32, б по результатам УЗК в толще порфировых базальтов по отчетливому снижению скоростей выделяются базальты с миндалевидной текстурой, причем с увеличением числа миндалин скорости закономерно снижаются.

Прослеживание тектонических нарушений

Одна из важных задач, с которой успешно справляется инженерная сейсмика,— выделение и трассирование по кровле скальных массивов линий и зон тектонических нарушений. Особое значение эта задача приобретает при исследованиях на участках проектируемых высоконапорных плотин. Зоны разломов после заполнения водохранилища могут представлять опасность как пути возможных утечек из водохранилища. Сейсмический метод располагает большими возможностями при выделении и трассировании линий тектонических нарушений, скрытых под чехлом рыхлых образований. В практике работ имеется ряд примеров успешного решения этой задачи. Физическая основа заключается в резком отличии акустических свойств породы в пределах зоны разлома от вмещающих пород,

а также в осложненном рельефе кровли коренных пород вблизи нарушения.

При малой мощности рыхлого чехла (порядка нескольких метров) для выделения зон нарушений пригодна обычная методика продольного профилирования, но лучшие результаты

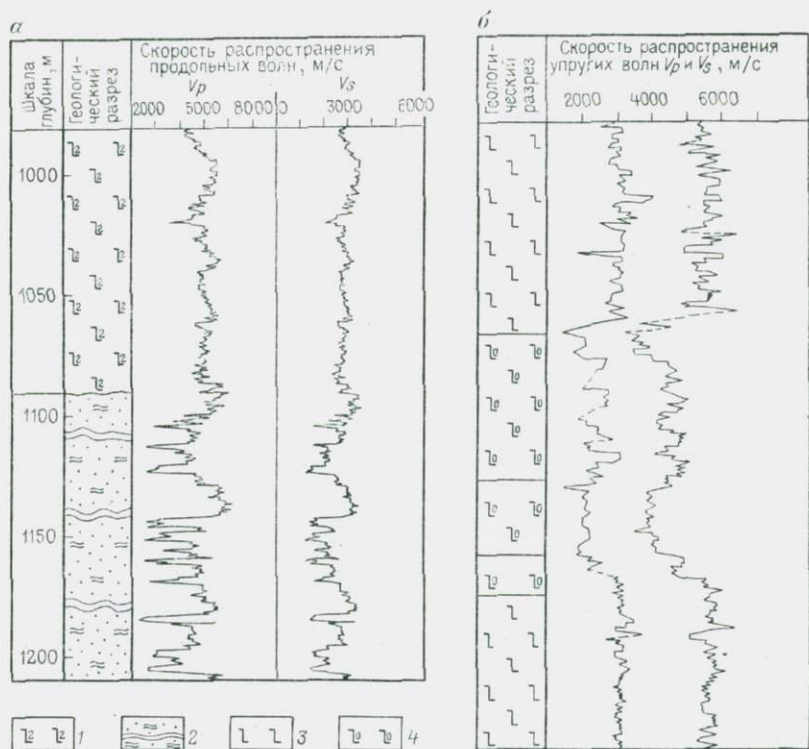


Рис. 32. Расчленение геологического разреза по данным акустического (АК) и ультразвукового (УЗК) каротажей:

а — характер изменения скоростей упругих волн в толщах пород различного состава (по результатам АК); б — то же, в толще порфировых базальтов с массивной и миндалекаменной структурой (по результатам УЗК). 1 — базальты раннетриасового возраста; 2 — толща переслаивания песчаников, алевролитов, аргиллитов, раннекаменноугольного и раннепермского возраста; 3 — базальты с массивной текстурой; 4 — то же, с миндалекаменной текстурой

дает так называемое непродольное профилирование, когда источник колебаний располагается не на профиле или его продолжении, а в стороне — на некотором расстоянии от центра расстановки приборов. Решение задачи возможно только при использовании многоканальной аппаратуры, так как для выделения аномальных участков используются так называемые динамические признаки, т. е. изменение периода, формы и амплитуды преломленной волны над тектоническим нарушением.

При выборе расстояний между соседними сейсмоприемниками в данном случае руководствуются тем, что на зону повышенной трещиноватости, обрамляющую линию разлома, должно приходиться по крайней мере два-три прибора. Профили обычно ориентируют примерно вкрест предполагаемому направлению линий разломов. Подробное описание методики наблюдений при трассировании линий тектонических нарушений можно найти в работах Г. А. Гамбурцева.

Оценка неоднородности строения и блочности массива

Как свидетельствует накопленный опыт, любой скальный массив характеризуется большей или меньшей неоднородностью, обусловленной для изверженных пород особенностями кристаллизации, для осадочных пород — осадконакоплением. Безотносительно к типу породы все массивы оказываются разбитыми несколькими системами трещин, причем интенсивность трещиноватости неодинакова в различных точках массива. Изучить детали строения скальных массивов помогают различные виды геофизических наблюдений в скважинах — электро-, сейсмо- и ультразвукового каротажа.

Сушность любого вида каротажа заключается в получении графика изменения того или иного геофизического параметра (электрического сопротивления, скорости распространения продольных или поперечных волн) вдоль ствола разведочной скважины. График каротажа представляет собой извилистую или ломаную линию, на которой повышенные значения скорости или электрического сопротивления соответствуют участкам прочной монолитной породы, а пониженные — трещиноватым участкам.

В зависимости от размеров каротажного зонда или расстояния между его измерительными элементами меняется так называемая разрешающая способность каротажных исследований, определяющая минимальные размеры неоднородностей, которые можно выделить при наблюдениях. Так, например, в ультразвуковом каротажном зонде системы Гидропроекта расстояние между соседними датчиками равно 20 см, что обеспечивает соответствующую детальность исследований.

С помощью ультразвукового каротажа в слоистых толщах можно выделить чередование отдельных слоев, а в монолитных массивах — участки пород повышенной трещиноватости, отдельные крупные трещины и т. п. Каротажные наблюдения позволяют получить точный график изменения скорости с глубиной безотносительно к тому, как меняется скорость — возрастает или уменьшается. Детальность расчленения разреза по крайней мере на порядок выше, чем по данным сейсморазведки на дневной поверхности.

Составить качественное суждение о неоднородности изучаемого массива можно по любому графику изменения скорости —

по данным наземных сейсмических наблюдений вдоль какого-либо разведочного профиля или по данным каротажных наблюдений вдоль ствола скважины. Чем более изрезан график, чем больше вариации скоростей, тем в общем случае более неоднороден разрез. При наличии достаточного статистического материала для изучаемого типа породы могут быть составлены гистограммы или кумулятивные кривые значений скоростей, позволяющие более объективно оценить неоднородности массива. Чем уже гистограмма или круче кумулятивная кривая, тем однороднее массив [34].

Для количественной оценки неоднородности строения массива применяют разномасштабные геофизические измерения

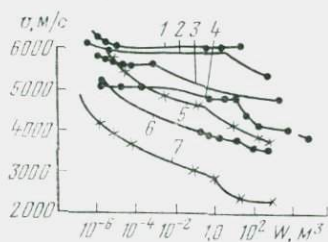


Рис. 33. Изменение средних значений скоростей упругих волн в зависимости от масштаба исследований (по А. И. Савичу):

1 — диабазы; 2 — граниты; 3 — порфировые базальты; 4 — алевролиты; 5 — гнейсы; 6 — известняки; 7 — доломиты

неоднородностей различных уровней и порядков [37]. Графики, приведенные на рис. 33, показывают, что различные массивы имеют свои, четко выраженные характеристики неоднородности и размеры блоков. Знание этих характеристик необходимо для выбора баз измерений и оптимальных частот упругих колебаний при изучении строения и оценке свойств и состояния скальных массивов.

Такие компоненты строения массива, как слоистость, сланцеватость, гнейсовидность, ориентированная трещиноватость и неоднородное напряженное состояние, приводят к существенной анизотропии скальных массивов по тем или иным свойствам. Для изучения и количественной оценки анизотропии скального массива линии геофизических наблюдений (профилирование, просвечивания между скважинами или горными выработками) располагаются под разными углами от 0 до 90° по отношению к элементам анизотропии. Обязательными являются направления, совпадающие с простиранием элементов анизотропии и вкрест его. Для более полной оценки анизотропии применяется радиальная система линий наблюдений —

(сейсмические, акустические, ультразвуковые), которые позволяют изучать один и тот же массив с разной степенью детальности. При оценке степени неоднородности среды и определении преобладающих размеров элементов неоднородности (блочности) строятся «масштабные» кривые, представляющие собой графики изменения средних или модальных значений скоростей в зависимости от базы измерений или объема W исследуемой среды. Установлено, что наклоны графиков $\bar{v} = f(W)$ характеризуют степень неоднородности исследуемых массивов, а точки перегиба на графиках — преобладающие размеры не-

геофизические профили с шагом в 30° . По результатам наблюдений строят индикатрисы скоростей и рассчитывают коэффициент анизотропии по скоростям (или по модулю упругости). Следует иметь в виду, что характер и степень анизотропности разномасштабных элементов неоднородности массива могут существенно различаться между собой. Это обстоятельство требует использования разночастотных модификаций сейсмоакустики для изучения элементов анизотропии разного порядка.

Глава II

ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД И ИХ МАССИВОВ

11.1. ВИЗУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Визуальное изучение строения дисперсных пород и их массивов осуществляется, как правило, в полевых условиях и является самым первым и часто определяющим моментом при расчленении грунтовой толщи, которое выполняется при инженерно-геологической съемке. Визуальные методы используются при описании естественных обнажений (стенки оврагов, берега рек и ручьев), специально заложенных горных выработок (шахты, шурфы, откосы, котлованы, расчистки), а также при документации керна буровых скважин.

При рассмотрении строения пород и их массивов следует учитывать весь комплекс признаков, в том числе их залегание, сложение, структуру и текстуру [38]. Здесь важно различать особенности строения массива и пород, слагающих массив.

Под условиями залегания (по И. В. Попову) понимают форму, размер массива или залежи, соотношение массива с породами, залегающими с ним совместно. Эта группа признаков свидетельствует об интенсивности и направлении геологических процессов, которые вызвали образование пород и их массива.

В инженерно-геологической практике различают породы нарушенного и ненарушенного сложения. Нарушение естественного сложения или строения породы, сформировавшихся в ходе пороодообразования, связано с разрушением структурных связей, которое может быть вызвано механическим, физическим или химическим воздействием. В связи с этим сложение породы выражается не только структурой и текстурой породы, но и ее плотностью, сплошностью, пористостью.

Визуальные методы характеризуют видимые невооруженным глазом структурно-текстурные особенности массивов и пород различных петрографических типов в обнажении или горной выработке, в монолите или в отдельном небольшом образце (см. т. 2, гл. 6). В литературе, посвященной строению пород,

В последние годы визуально различимые структурно-текстурные признаки массива и пород не рассматриваются отдельно, а, как правило, объединены в понятиях макроструктура и макротекстура. Ниже приводятся виды макроструктур, макротекстур и методы их изучения. Однако следует помнить, что в разных случаях эти понятия применимы либо к массивам, либо к породам, слагающим массив.

Виды макроструктур и их характеристика

Макроструктура характеризует размер, форму особенности поверхности отдельностей, размер которых колеблется от долей сантиметра до метра и более. Структурными элементами, визуально различимыми в массивах и породах, могут быть отдельные песчинки, обломки магматических, осадочных и метаморфических пород, комки и блоковые отдельности глинистых пород.

По величине видимых обломков среди дисперсных пород выделяют крупнообломочные и песчаные. В крупнообломочных породах выделяют валунные (каменистые), галечниковые (щебенистые) и гравийные (дресвяные) обломки. По размеру частиц и их содержанию песчаные породы делятся на грубо-, крупно-, средне-, мелко- и тонкозернистые [14].

В крупнообломочных и песчаных породах обломки и видимые частицы имеют самую разнообразную форму. По форме П. И. Фадеев выделил четыре группы структурных элементов: округлые (углы и грани не прослеживаются), угловатые (обломки с углами и ребрами), полукруглые (обломки с признаками первой и второй групп) и обломки со сложной конфигурацией (неровной, часто корродированной — изъеденной поверхностью). И. А. Преображенский, взяв за основу четыре признака формы — изометричность, угловатость, зубчатость и правильность, — выделил 16 форм обломков.

Поверхность песчаных пород визуальнее менее различима, поэтому в полевых условиях она практически не изучается. Характер поверхности крупных обломков и песчаных частиц оказывает влияние на ряд свойств дисперсных пород, и в первую очередь на сопротивление сдвигу.

Глинистые породы в массиве (толще) имеют следующие виды макроструктур (по Г. Г. Ильинской и Ц. М. Райтбурд): I — кубовидная крупнокомковатая, комковатая, мелкокомковатая, пылеватая, крупноореховатая, ореховатая, мелкоореховатая, крупнозернистая, зернистая, мелкозернистая); II — призмовидная (столбчатая, столбчатовидная, крупнопризматическая, призматическая, мелкопризматическая, тонкопризматическая); III — плитовидная (сланцевая, пластинчатая, листовая, грубочешуйчатая, мелкочешуйчатая). Ниже приведена краткая характеристика некоторых из них.

Глибовая макроструктура сложена остроугольными отдель-

ностями неправильной формы. Размер отдельностей до 1 м. Комковатая макроструктура отличается от глыбовой размером макроструктурных отдельностей (до 10 см). Ореховидная макроструктура сложена округлыми отдельностями со сглаженными углами (иногда наблюдается небольшая вытянутость по горизонтали). Размер отдельностей 5—7 см по горизонтали и 4—6 см по вертикали. Слоистая макроструктура представлена прослойками (слоями) мощностью от сантиметров до метров. Столбчатая макроструктура образована отдельностями, резко вытянутыми по вертикали. Ширина отдельностей от 30 см (реже меньше) до 1 м (реже больше). Высота может быть от одного до нескольких метров. Плитчатая макроструктура сложена отдельностями, имеющими размер не больше 10 см в длину, 6 см в ширину и 2 см в высоту.

Сланцеватая макроструктура имеет отдельности, размер которых примерно $4 \times 5 \times 0,5$ см. Листовая макроструктура образована отдельностями толщиной 1—3 мм, длиной и шириной 1—0,5 см, а чешуйчатая — толщиной порядка 1 мм; длина отдельностей может достигать 1 см, ширина — 0,5 см.

В определении слоистой макроструктуры по мощности слоев выделяется несколько подразделений. Например, по этому признаку выделяются породы: очень тонкослоистые (менее 0,2 см), тонкослоистые (0,2—2 см), среднеслоистые (2—5 см), крупнослоистые (5—10 см), массивнослоистые (более 50 см). В глинистых толщах озерно-ледниковых отложений выделены по мощности глинистых и песчано-пылеватых прослоев тонкослоистые, нормальнослоистые и грубослоистые породы.

Виды макротекстур и их характеристика

Макротекстура дисперсных пород характеризуется взаимным расположением структурных элементов в пространстве.

По степени ориентации структурных элементов (некоторые авторы называют их текстурными элементами) макротекстуры делятся на беспорядочные и упорядоченные, или ориентированные и неориентированные.

В генетической классификации текстур глинистых пород по И. В. Попову к группе ориентированных макротекстур отнесены: листовато-слоистая (моренные глины), конкреционно-слоистая (сидеритовые глины), ксенолитовая слоистая (делювий и пролювий) текстуры. К неориентированным — однородная (массивная — у делювия), ксенолитовая (обломочная, беспорядочная — у морен), макропористая (у лёссовидных глин), гнездовая (у делювия, элювия и др.).

Г. Г. Ильинская и Ц. М. Райтбурд в 1968 г. предложили несколько иные виды макротекстур, характеристика которых, основанная на морфоструктурных признаках породы, приведена ниже.

Беспорядочные макротекстуры. 1. Массивная — порода выглядит сплошным однородным массивом, структурные элементы не выделяются. 2. Глыбовая — порода разбита сетью разнонаправленных трещин на бесформенные остроугольные глыбы довольно крупных (до 1 м) размеров, трещины в основном полые, реже с налетом бурых окислов железа или карбонатов, раскрытие трещин от долей до двух миллиметров, реже больше. 3. Комковатая — порода сложена остроугольными структурными элементами разнообразной формы и размеров (от глыбовой отличается величиной структурных элементов). 4. Ореховидная — порода состоит из структурных элементов, имеющих форму ореха; структурные элементы разделены микротрещинами, нередко с налетом бурых окислов железа.

Упорядоченные макротекстуры. 5. Слоистая — порода состоит из отдельных прослоев, имеющих преимущественно пространственную ориентацию. Мощность прослоев может колебаться в широких пределах — от нескольких сантиметров до нескольких метров. На контактах между отдельными слоями часто отмечаются волосяные трещины с гладкими, нередко полированными стенками, иногда с налетом бурых окислов железа, микрокристаллического гилса или карбонатов. 6. Столбчатая — порода и массив состоят из столбчатых структурных элементов, имеющих преимущественно пространственную ориентацию, всегда вертикальную. Отдельные структурные элементы разделены сетью вертикальных трещин, которые в процессе выветривания раскрываются на десятки сантиметров и часто заполняются вторичным мелкокристаллическим кальцитом и гипсом. 7. Плитчатая — порода состоит из плитчатых структурных элементов, имеющих преобладающую пространственную, преимущественно горизонтальную ориентацию. Поверхность отдельных плиток часто полированная. Плитки разделены сетью трещин, имеющих несколько (два-три) направлений пространственной ориентации. 8. Сланцеватая — порода сложена сланцеватыми отдельностями, имеющими преобладающую пространственную ориентацию. 9. Листоватая — порода состоит из листоватых отдельностей. Текстура напоминает плитчатую, однако отличается толщиной структурных элементов. 10. Чешуйчатая — порода представлена совокупностью структурных элементов, имеющих форму чешуек, т. е. очень тонких (порядка 1 мм) пластинок с утонченными торцами, вытянутыми по направлению напластования.

Слоистый вид макротекстуры включает такие типы, как горизонтально-слоистый и косослоистый, которые имеют не только отличительные морфологические признаки, но и являются типичными для совершенно различных генетических групп осадочных дисперсных пород.

Структурные (текстурные) элементы в массивах дисперсных пород со слоистой макротекстурой часто отличаются по

литологическому составу, плотности, водопроницаемости, водостойчивости, что в значительной степени определяет свойства и поведение массива в целом, направление деформаций разрывов и сдвигов в породе, наличие путей фильтрации, анизотропию свойств массива.

Методика визуального изучения строения

Изучение строения пород невооруженным глазом в полевых условиях проводится путем детального описания пород, слагающих массив, измерения и зарисовки соотношения структурных элементов и расчетов структурно-текстурных характеристик.

В инженерной геологии рекомендуется проводить описание геологических разрезов и, в частности, отдельно описывать строение выветрелого слоя и подстилающих невыветрелых пород. При этом методика описания должна включать определение мощности выветрелой и невыветрелой частей разреза, выявление размера, формы и типа структурных элементов, характера контактов между ними, изучение трещиноватости.

Изучение макроструктуры. К визуальным методам изучения макроструктуры дисперсных пород и их массивов нужно в первую очередь отнести визуальные методы оценки крупнообломочных и песчаных пород. Среди них предложенный А. И. Шеко метод определения размеров и размещения грубых и крупных обломков в массиве с помощью накидной сетки и других приспособлений. В основе этого метода лежат геометрические методы Розиваля и Делесса.

При инженерно-геологическом изучении дисперсных пород применяются также метод оценки окатанности мелких валунов и гальки по пятибалльной шкале; полевой метод упрощенного определения гранулометрического состава песков (по Н. В. Коломенскому). По результатам измерений отдельных обломков и их расположения в массиве проводится расчет структурных характеристик как самой породы, так и всего массива.

Рассчитываются следующие характеристики: коэффициент упаковки обломков

$$K_1 = \frac{l_1 - d_1}{d_1}, \quad (11.1)$$

где l_1 — проекция расстояния между центрами обломков одной фракции; d_1 — диаметр обломков, для которых определяется коэффициент упаковки. Если обломки в массиве не соприкасаются друг с другом, то K_1 имеет положительное значение, а если обломки заходят своими краями друг за друга, то отрицательное.

Число обломков определенного размера n_1 , приходящееся на 1 м, определяют по формуле

$$n_1 = \frac{K_{\text{фр}}}{d_1} \sqrt[3]{\frac{a_1}{\Delta_K}}, \quad (11.2)$$

где $K_{\text{фр}}$ — коэффициент, учитывающий форму обломков (для обломков, близких к шару, $K_{\text{фр}}=0,267$, к кубу — $0,305$, к тетраэдру — $0,437$); d_1 — средний диаметр обломков; a_1 — содержание фракции в процентах от массы образца; Δ_K — объемная масса обломков крупнее 2 мм.

Средняя окатанность обломков R_K , выраженная в процентах, рассчитывается по формуле

$$R_K = \frac{(0n_0 + 1n_1 + 2n_2 + 3n_3 + 4n_4) 25}{\Sigma n}, \quad (11.3)$$

где n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 — число обломков с соответствующим баллом окатанности (по шкале А. В. Хабакова); Σn — общее число измеренных обломков.

В массивах, сложенных лёссовыми и глинистыми породами, количественно оцениваются все виды макроструктур, характерные для этих дисперсных пород. При этом необходимо учитывать, что в определенных условиях данные типы пород приобретают высокую связанность и образуют массивы могут приближаться по некоторым свойствам к скальным массивам, для которых принято рассчитывать такие структурные характеристики, как модуль трещиноватости M_T , коэффициент трещинной пустотности, ширину b и длину трещин l .

Изучение макротекстуры. При исследовании макротекстуры рекомендуется проводить описание дисперсных грунтов, так же как и макроструктуры, в два этапа: а) описание изменения макротекстуры выветрелого слоя; б) описание макротекстуры свежего разреза породы. В процессе изучения расчисток определяется мощность выветрелых слоев; при этом детально прослеживаются все изменения: трещиноватость, раскрытие и ориентация трещин в пространстве, структурные элементы, их тип, размер, форма, а также взаимоотношения и контакт между отдельными элементами. Более конкретная методика изучения и описания текстуры следующая: 1) изучение характера и последовательности слоев; 2) ознакомление с внутренней структурой осадка; 3) нанесение данных на карту (изучение в плане); 4) отбор образцов; 5) составление эскизов. Отметим лишь основное содержание этих элементов изучения.

Исследование характера и последовательность слоев включений: 1) выделение серий слоев одинаково параллельных, наклоненных или сходящихся; 2) выявление наличия или отсутствия горизонтально напластованных серий с косыми; 3) определение угла и направления наклона (относительно стран света) серий; 4) установление мощности одной серии и длины выклинивающихся серий; 5) выявление наличия глинистых прослоев и их отношения к косым слоям.

При изучении структуры слоев отмечается: 1) чем определяется слоистость (изменением цвета, т. е. окрашиванием частиц породы или цемента, крупности зерен, минерального состава или комбинацией этих факторов); 2) степень и характер сортировки материала в серии, т. е. постепенность перехода к компонентам иной крупности; 3) пределы структурных различий в серии и в отдельном слое, от кровли до подошвы (например, от валунов до тонкого ила, от крупного песка до мелкого); 4) различие в грубости и характере материала косых и горизонтальных слоев, формы обломков и их расположение по отношению к странам света и другие структурные особенности.

На карту текстуры на этом этапе изучения наносятся: 1) все обнажения с косой слоистостью (отмечается постоянство или эпизодичность этого явления в данном горизонте); 2) мощности всей толщи отложений с косой слоистостью; 3) регистрируемые направления и углы наклона косой слоистости и, наконец, оконтуривается площадь с косой слоистостью одного типа.

Отбор образцов при чередовании косых слоев с горизонтальными производят следующим образом: 1) из горизонтальной серии у самого контакта с нижележащими косыми слоями; 2) из последних у контакта с горизонтальными (рядом с предыдущим); 3) в нижней части косой серии на продолжении тех же слоев (или одного определенного прослойка) у контакта с нижележащей горизонтальной серией.

Составление эскизов. Описание слоистости должно обязательно сопровождаться эскизами, причем признано, что фотоснимки не могут заменить эскизов, так как на фотографиях характерные черты слоистости (цветные полосы и пр.) и масштаб часто скрываются за выступающими деталями рельефа обнажения. На эскизы наносят также места отбора образцов.

Описание текстуры можно проводить и по другой схеме [6]. Однако в этой схеме менее ясно выделяются текстурные и структурные признаки изучаемой породы. Для обработки результатов массовых замеров текстурных признаков рекомендуется строить [6]: 1) сводную колонку, включающую колонку видов слоистости, фаций и литологическую; 2) круговые полярные диаграммы азимутов и углов наклона косых слоев; 3) диаграммы в виде столиков; 4) диаграммы-розы для направлений наклона косых слоев.

Инженерно-геологическое изучение текстуры массива (грунтовой толщи) не должно заключаться лишь в детальном описании фациально-генетических признаков. Для инженерно-геологов важно выделить именно те текстурные признаки, которые необходимы при решении инженерно-геологических задач, таких, например, как составление инженерно-геологической схемы естественного основания сооружения, расчеты осадок

фундаментов и просадочности толщи лёссовых пород и т. д. При решении этих задач обычно используются данные о мощности и числе слоев, последовательности залегания слоев разной мощности и их ориентации.

С этой целью, например, для количественной оценки слоистой макротекстуры массивов дисперсных пород предложено использовать метод суммарной кривой [40]. В данном способе обработки текстурных данных суммарная кривая выражает зави-

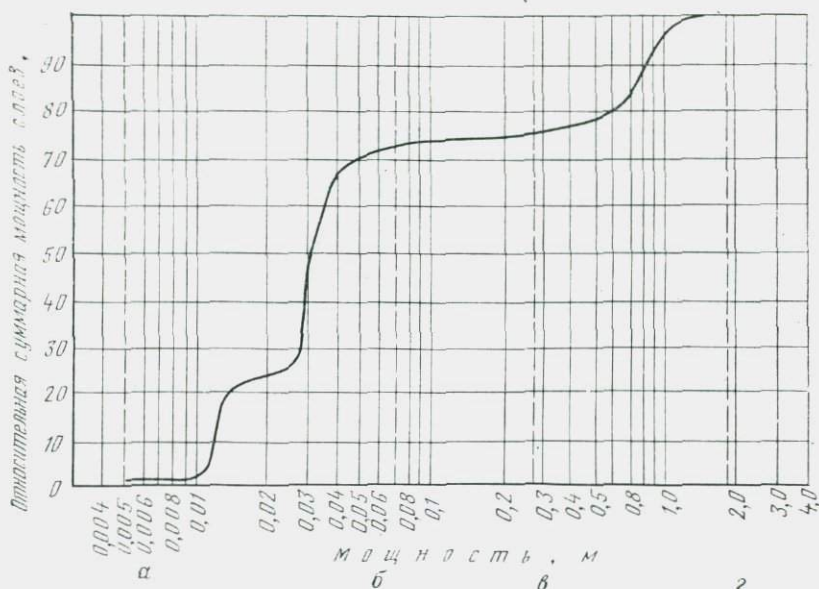


Рис. 34. Суммарная кривая грунтовой толщи ленточных глин:

а — размер области воздействия микропенетromетра; *б* — то же, компрессионного прибора ЦНИИ МПС; *в* — то же, штампа КРУ-600; *г* — то же, бетонного блока фундамента

симость между мощностью слоев (ось абсцисс) и суммарной мощностью слоев в процентах (ось ординат) (рис. 34).

Графическая форма выражения слоистости массивов позволяет совместить и сопоставить большое число кривых для самых разных слоистых массивов (толщ), различающихся по происхождению, содержанию и сочетанию слоев разной мощности, что может быть полезно при изучении условий формирования отдельных генетических типов пород.

Если одновременно с этим нанести на график (восстановление перпендикуляра на оси абсцисс) размер области воздействия, которое оказывается при инженерно-геологическом опробовании на дисперсных породах (конус микропенетromетра, стандартное режущее кольцо, круговой штамп, бетонный блок), то можно, исходя из соотношения масштаба воздействия и мощности выделенных слоев, перейти к оценке неоднородности

массива дисперсных пород до проведения опытных полевых инженерно-геологических работ. Из графика видно, что в случае опробования пород микропенетрометром практически весь массив ленточных глин является неоднородной средой. При опробовании с отбором дисперсных пород режущими кольцами левая часть кривой, включающая прослойки размером меньше диаметра колец, может рассматриваться как отражающая квазиоднородную среду, а правая часть кривой — неоднородную среду.

Подобный метод изучения макротекстур дисперсных пород и их массивов не должен подменять изучение макротекстуры как генетического признака дисперсных пород. Вместе с тем очевидно, что развитие инженерно-геологического подхода к оценке строения дисперсных пород и их массивов и совершенствование инженерно-геологической документации геологических разрезов являются необходимыми условиями оценки всего массива пород.

11.2. ДИСТАНЦИОННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Строение дисперсных пород и их массивов можно изучать следующими дистанционными методами: стереофотограмметрическими, радиолокационными, тепловыми. Наибольшее и притом самостоятельное значение имеют наиболее разработанные стереофотограмметрические методы. Остальные методы со временем представят интерес главным образом при комплексном применении.

По аэроснимкам устанавливают структуру четвертичного покрова, представленного в основном дисперсными породами, а также участки пород этого типа в строении коренных массивов. Возможности фототеодолитной съемки в изучении строения дочетвертичных дисперсных пород гораздо больше, так как ее можно проводить в крупных масштабах.

Дешифрирование строения массивов дисперсных пород по наземным стереофотограмметрическим снимкам

При использовании фототеодолитных снимков массивов дочетвертичных пород можно выявить и инструментально задокументировать характер контактов между породами разного генезиса и состава, их основные структурно-текстурные особенности, фаціальную изменчивость; определить мощности слоев и пачек и условия их залегания; оконтурить участки разного увлажнения. Эти данные помогают точнее выделить в массиве литологические типы пород, их инженерно-геологические виды и разновидности.

На фототеодолитных снимках дешифрируют генетические типы, фации и генерации четвертичных склоновых накоплений; это позволяет судить о их вероятном составе и гранулометрии.

Эти характеристики уточняют при полевом описании типичных точек. Наличие снимков способствует правильному выбору таких точек, помогает экстраполяции по дешифрировочным признакам результатов описания накоплений на другие участки.

Границы осыпных и обвально-осыпных накоплений дешифрируются на фототеодолитных снимках по их положению, характерной форме конусов или шлейфов, наличию промоин и трещин, фотоизображениям более крупного материала по краям, а также по большим углам наклона, чем у пролювиальных конусов. В пределах обвально-осыпных конусов обычно устанавливаются также границы между накоплениями разновозрастных генераций, особенно при дешифрировании с помощью стереоавтографа. Для действующих осыпей характерны светлый, почти белый фототон изображения и отсутствие растительности. Глибовой материал у таких осыпей имеет крапчатое светло-серое фотоизображение. Обвально-осыпные накопления, в разной степени сцементированные, дешифрируются по более темным серым фотоизображениям, характеру растительности, морфологии промоин, крутизне их откосов. Наибольшее диагностическое значение имеют в этом плане морфологические особенности вершин промоин. Решению вопроса помогает дешифрирование относительного возраста накоплений: чем они древнее, тем больше сцементированы.

Наличие осовов или оползней также служит признаком типа накоплений, их прочности, водостойкости и размываемости. Это касается прежде всего тех оползней, у которых поверхность скольжения располагается выше контакта с подстилающими породами. В этом случае последние не оказывают влияния на тип оползней и они имеют полный диагностический статус. Для осовов такое влияние нехарактерно. Они обнаруживаются по характерному дугообразно-полосчатому рисунку фотоизображения их нижних частей, где образуются специфические гряды, и нишам отрыва. Осовы указывают на наличие песчаных отложений и слабосцементированных или увлажненных глибово-суглинисто-щебнистых накоплений.

Съемки малоформатными камерами полезны для документации характерных деталей строения массивов дисперсных пород, количественной оценки этих деталей (макропористости лёссов, ходов землероев в них, ленточного строения озерных глин при определении времени их формирования, типов наслоений в аллювии и т. п.). Такие стереоснимки обладают большей документальностью, чем, например, пленочные монолиты, хотя целиком их и не заменяют.

Съемки малоформатными камерами необходимы при определении гранулометрического состава глибово-щебнистых накоплений и валунно-галечного аллювия (для оценки содержания крупных глыб и валунов), а главное — для документации неоднородности этих отложений в их естественном залегании, ее количественной оценки и определения сублинейных зон

с наименьшей прочностью или наибольшей проницаемостью. Это может потребоваться при оценке устойчивости подрезанных конусов и террас, решении задач о водопритоках и т. п. Чтобы упростить обработку снимков, надо снабдить обнажение или откос перед фотографированием накидной сеткой с квадратными ячейками со стороной 20—50 см.

Наибольшее значение эти методы имеют при изучении крутых недоступных обнажений. При их применении измеряются большие площади обнажений, что способствует получению более точных результатов. Так, например, учет этим способом валунов и глыб размером больше 10 см на площади обнажения в первые десятки квадратных метров помогает достовернее учесть их при определении объемной массы методом засыпки, а также при грохочении обломочных накоплений. Немаловажно и то, что большая часть процесса изучения переносится в камеральные условия.

Размеры глыб и валунов можно определять с помощью стереоавтографа путем сравнения их фотоизображений с визирной маркой прибора, а размеры крупных отдельностей — координатным способом. Измерения должны производиться по строго заданным линиям, с интервалом в половину размера наименьшей измеряемой фракции, используя «разграфку» обнажения, созданную накидной сеткой.

Число глыб разных размеров подсчитывают по их зарисовке на плане или в процессе измерения. В первом случае их размеры указывают на плане цифрами, во втором — в виде ряда цифр по каждой строке. Первый вариант предпочтительнее, так как позволяет оценить неоднородность отложений в пределах поверхности обнажения, а также положение центра ее «тяжести», что может быть небезынтересным прежде всего при строительстве в сейсмически активных районах. В благоприятных случаях, когда неоднородность толщи можно оценить таким способом в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, например на межовражном массиве, такие определения могут быть сделаны с некоторым приближением в объемном варианте. Последнее может потребоваться не только в грубообломочных накоплениях.

Недостаток метода — трудности в установлении петрографического состава глыб и валунов. В значительной мере это можно преодолеть, применяя цветные, а еще лучше — спектрально-анальные снимки. Надо, однако, иметь в виду, что в этом случае на пластинках образуется выраженное центральное пятно. При фототеодолитной съемке легче разметить изображение обнажения вне пределов влияния этого пятна. Промышленность, к сожалению, пока не выпускает цветные фототеодолитные пластинки, поэтому во избежание неравномерного прижима пленки к стеклу цветную или спектрально-анальную аэропленку приклеивают к нему желатиново-глицериновым клеем. Фотографировать надо с нейтральным светофильтром,

так как аэропленка обладает более высокой чувствительностью, а у фототеодолитов нет затворов. Цветное фотографирование предназначается только для целей дешифрирования, так как по разрешающей способности оно уступает фототеодолитной съемке в черно-белом варианте. Поэтому для измерений необходима дублирующая черно-белая съемка.

Более практично оценку петрографической принадлежности глыб и валунов и их разделение по этому признаку делать в поле по доступной части обнажения, определяя одновременно признаки их дешифрирования на снимках, а затем использовать эти данные для характеристики остальной части объекта.

Такого рода стереофотограмметрические оценки требуются прежде всего при разработке месторождений строительных материалов, в том числе при количественной характеристике блочности взорванных массивов. Решение подобной задачи иногда возможно и при крупномасштабной аэрофотосъемке, в том числе с вертолета. Необходимость в этом возникла, например, в связи с решением проблемы Сарезского озера (при определении макрогранулометрии Усойского оползневого перекрытия объемом около 2 км³, которую более точно надо оценить по трассе возможного эволюционного перелива).

Перспективы применения дистанционных методов

Сделанный обзор основных фотографических дистанционных методов и их практического использования указывает на возможность значительного расширения области их применения при изучении массивов пород. Необходимы разработка новых и совершенствование применяемых дистанционных методов.

Дальнейшее совершенствование и развитие методики применения стереофотограмметрических методов при инженерно-геологическом изучении горных пород должно основываться на использовании новых методов стереофотограмметрической обработки снимков, прежде всего аналитических, ориентированных на работу с ЭВМ. Необходимы: значительное усовершенствование приемов стереофотограмметрической обработки снимков, полученных с вертолета при горизонтальном и наклонном положении оптической оси фотокамеры; создание стереоскопических фототелевизионных буроскопов; разработка многозонального фотографирования массивов пород с ближних дистанций и приемов спектрометрирования полученных при этом снимков. Спектральные образцы массивов в узких зонах спектра будут иметь огромное диагностическое значение для оценки состава, свойств и состояния пород любого типа. Этому будут служить и банки спектрометрических характеристик пород.

К фотографическим дистанционным методам относятся также научная киносъемка и голография. Киносъемка пред-

ставляет интерес при исследовании динамики разрушения массивов и изучении процессов размываемости пород, тексотропии и т. д. Если при обычном черно-белом фотографировании фиксируется лишь интенсивность исходящих от объекта световых волн, то голографические снимки отображают их фазу, амплитуду и спектральный состав, что, во-первых, обеспечивает получение цветных объемных изображений, а во-вторых, имеет диагностическое значение в рассматриваемом здесь аспекте. Реализация этих возможностей пока сложна из-за недостаточной разработанности методов голографии и необходимости создания сред, в которых могли бы фиксироваться изображения с этими и некоторыми другими характеристиками.

Дистанционные методы включают также нефотографические виды съемок: радиолокационную, тепловую, лазерную, микроволновую, спектрометрическую. В настоящее время теория и методика этих съемок весьма интенсивно разрабатываются в связи с аэрокосмическими исследованиями. Они сопровождаются подспутниковыми наблюдениями, программа которых включает аналогичные съемки с разных, в том числе и близких дистанций. Все перечисленное, а также появляющаяся практическая потребность в новых съемках с близких дистанций служат объективной предпосылкой для развития этих методов и использования их в инженерной геологии.

При инженерно-геологических исследованиях наибольшее значение, видимо, будут иметь радиолокационная съемка массивов и лазерное опробование пород. Это обусловлено следующим. В отличие от тепловой радиолокационная съемка независима от условий погоды и изменений теплового поля и, кроме того, характеризует породы на некоторую глубину, отображая прежде всего их плотность и степень увлажнения. Лазерное воздействие на породы сопровождается геохимическими эффектами, вследствие чего возрастает интенсивность излучения и индивидуализируется его спектр, что служит более надежным диагностическим признаком. Ясно, что с малых отстояний легче и вызвать, и зафиксировать подобные эффекты. Нельзя, однако, думать, что эти методы могут полностью заменить в инженерной геологии традиционные фотометоды. Следует ориентироваться на их сочетание.

11.3. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ПЕНЕТРАЦИОННО-КАРОТАЖНЫЕ МЕТОДЫ

Изучение строения дисперсных пород и их массивов

Особенностями геологических разрезов, сложенных дисперсными породами, является относительно слабая дифференциация их по скоростям распространения упругих волн, а в случае слоистости разреза — часто горизонтальное или близкое к нему положение слоев в пространстве (в равнинных районах).

Определяющее влияние на численные значения скоростей оказывают давление вышележащей толщи пород и структурное упрочнение пород с глубиной, преобладающее обычно над влиянием литологии. Так, по данным А. Л. Левшина и Н. Н. Горяинова [25], в сухих каракумских песках увеличение скорости в глубину происходит по закону, выражаемому формулой $v = v_0 z^{0,22}$ (где v_0 — значение скорости вблизи дневной поверхности, z — глубина). Непосредственно вблизи дневной поверхности, как показали измерения в четвертичных песках Новгородской области, скорость v_0 может составлять всего 140—160 м/с, быстро возрастающая в глубину. Представление о диапазоне изменения скоростей в различных типах дисперсных грунтов дает табл. 11, в которой обобщены данные, приводимые различными авторами.

Т а б л и ц а 11

Скорости распространения упругих волн в массивах дисперсных пород (в интервале глубин 0—15 м)

Породы	v_p , м с	v_s , м с
Валунно-галечные отложения	500—1000	300—600
	2000—2800	300—600
Галечники	400—800	250—500
	1800—2400	250—500
Пески	140—500	90—300
	1600—1900	90—300
Супеси	250—550	120—280
	1450—1800	120—280
Суглинки	250—600	90—250
	1500—1900	90—250
Глины:		
	250—650	100—200
	покровных отложений	1800—2000
коренные	2000—2400	200—500
	2000—2800	200—500

П р и м е ч а н и е. В числителе даны значения для зоны аэрации, в знаменателе — ниже уровня воды.

Влияние влажности на скорость распространения упругих волн неодинаково в различных типах грунтов. Прежде всего следует иметь в виду, что на скорости поперечных волн во всех типах грунтов ни влажность, ни водонасыщенность не влияют (в пределах точности наблюдений). В несвязных дисперсных грунтах, песках и гравийно-галечно-валунных отложениях влажность также практически не влияет на значения скорости продольных волн, но при достижении полного водонасыщения ско-

рость резко возрастает, что является благоприятным фактором для прослеживания в названных типах грунтов зеркала грунтовых вод, которые в соответствии с принятой в сейсморазведке терминологией представляет собой сильную преломляющую границу, т. е. границу, для которой выполняется соотношение $v_2/v_1 > 1,33$. Наиболее сложное влияние влажности сказывается на скоростях продольных волн в глинистых грунтах. В соответствии с публикациями, по данным одних авторов, увеличение влажности приводит к увеличению скоростей, по данным других — к уменьшению. Причиной этому служат два обстоятельства: способность глин к набуханию, т. е. к изменению плотности скелета при увлажнении, и особые свойства связанной воды, часто присутствующей в глинах в довольно значительных количествах. Как известно, связанная вода по своим свойствам близка к твердому телу, в частности, и скорость распространения упругих волн, и показатели плотности связанной воды значительно выше, чем у воды в обычном состоянии. Поэтому процентное увеличение содержания связанной воды в глине приводит к возрастанию скорости продольных волн (при неизменной плотности скелета). Уменьшение плотности скелета при разуплотнении глин, наоборот, имеет своим следствием снижение скорости продольных волн. Этим и объясняется разноречивость в данных различных исследований. Если измерение скорости в зависимости от увлажнения производится без учета разуплотнения, наблюдается снижение скорости при росте влажности, если же эксперимент ставится так, что исключает возможность разуплотнения, то росту влажности вплоть до достижения полной молекулярной влагоемкости соответствует возрастание скорости. Иначе проявляется зависимость скорости продольных волн от влажности в лёссах. Вследствие того, что прочность структурных связей имеет определяющее влияние на скорость, в начальный период увлажнения наблюдается значительное снижение скорости от 1000—1300 до 500—700 м/с вплоть до влажности 18—20 %, после чего скорость опять начинает возрастать (уже за счет заполнения водой капиллярных каналов). Следует отметить, что в сухих глинах при их значительном увлажнении скорость может вначале уменьшаться за счет разрушения жестких структурных связей, а затем повышаться при увеличении количества связанной воды. Отмеченные особенности изменения скорости при увлажнении глинистых и лёссовых грунтов следует иметь в виду при интерпретации данных наблюдений.

Водонасыщенные дисперсные грунты, находящиеся в мерзлом состоянии, характеризуются очень высокими скоростями распространения продольных волн, близкими к таковым в массивах скальных грунтов (см. табл. 11). У влажных грунтов, находящихся в мерзлом состоянии, скорости также выше при положительных температурах, причем скорость тем выше, чем более льдонасыщен грунт. В дисперсных несвязных грунтах

понижение отрицательной температуры практически не влияет на скорость упругих волн. В то же время в глинистых грунтах при понижении температуры до -25°C наблюдается непрерывный рост скорости, что опять-таки объясняется особыми свойствами связанной воды и переходом ее в мерзлое состояние при различных в зависимости от жесткости связи молекул воды с глинистыми частицами отрицательных температурах.

Все изложенное свидетельствует о том, что если литологическое расчленение дисперсных грунтов в зоне аэрации представляет собой достаточно сложную задачу, то для части массивов, находящейся ниже уровня грунтовых вод, сложности намного возрастают, а для мерзлых массивов задача становится практически неразрешимой.

Ниже приведено рассмотрение возможностей сейсмического метода при решении отдельных типичных задач, связанных с изучением строения массивов дисперсных грунтов.

Определение мощности рыхлого чехла, прикрывающего массив скальных пород, ни принципиально, ни методически не отличается от рассмотренной в разд. 10.3.

Прослеживание зеркала грунтовых вод в дисперсных несвязных грунтах представляет собой легко разрешимую задачу, так как эта граница с сейсмической точки зрения является сильной, а преломленная волна, связанная с зеркалом грунтовых вод, имеет четко выраженные признаки, позволяющие отличить ее от преломленных волн, связанных с литологическими границами, разделяющими различные комплексы дисперсных грунтов, или от волны, распространяющейся вдоль кровли скального массива. Методика наблюдений — продольное профилирование с получением встречных и нагоняющих годографов. Расстояние между пунктами удара (ПУ) или пунктами взрыва (ПВ) и шаг сейсмоприемников зависят от масштаба исследования зеркала грунтовых вод.

Прослеживание отдельных границ раздела внутри массива дисперсных грунтов для сейсморазведки представляет собой достаточно сложную задачу. Легче всего проследить границу между песками и подстилающими их глинами, так как при прочих равных условиях глины при одинаковой глубине залегания обычно отличаются более высокими скоростями распространения упругих волн, чем пески. По этой же причине выделить с помощью сейсмического метода контакт между глинами и подстилающими их песками обычно невозможно вследствие так называемой «инверсии скоростей». Бесспорными преимуществами при расчленении песчаных и глинистых отложений при любом их соотношении в пространстве располагает метод электроразведки на постоянном токе в модификации метода вертикальных электрических зондирований. Поэтому если есть возможность выбора, то при расчленении массивов дисперсных грунтов следует отдавать предпочтение электроразведке, так как этот метод дешевле, проще в организации и исполнении и

обладает в данном случае более благоприятными физическими предпосылками.

Изучение строения оползневых участков в песчано-глинистых отложениях при небольшой мощности оползневых тел можно вести как сейсмическими, так и электрическими методами. Как правило, оползший грунт характеризуется значительно меньшими значениями скоростей распространения упругих волн, чем грунт ненарушенной структуры, что позволяет легко отделить оползшую часть массива от пород в коренном залегании. Если в распоряжении исследователя имеется портативная переносная сейсмическая аппаратура, а для работы достаточно мощности ударного источника колебаний, то изучение оползневого участка может быть произведено легко и быстро. Следует иметь в виду, что сейсмический метод менее требователен к рельефу дневной поверхности, т. е. принципиально безразлично, находится изучаемый участок на горизонтальной поверхности или на горном склоне. Последнее обстоятельство объясняет значительно более частое использование сейсмического метода при изучении оползневых участков по сравнению с электроразведкой, где в методе вертикального электроразведывания (ВЭЗ) требуются значительные участки плоской поверхности для разнесения питающих электродов на нужные расстояния. Сейсмический метод дает возможность не только определить общую мощность оползневого тела, но и расчленить его на отдельные горизонты, соответствующие в ряде случаев, как установлено практикой, различным генерациям оползневых подвижек.

Выделение и прослеживание древних переуглублений речных долин для сейсмического метода представляет собой сложную, но разрешимую задачу. В практике известны случаи выделения в толще древних аллювиальных отложений погребенных русел рек, выполненных более поздними аллювиальными отложениями. Для решения задачи необходимо располагать многоканальной сейсмической аппаратурой и взрывным способом возбуждения упругих колебаний. Методикой наблюдений предусмотрено получение протяженных систем встречных и нагоняющих годографов при многократном перекрытии каждого взрывного интервала.

Как установлено, вдоль стенок свежих дорожных откосов, карьеров и прочих искусственных выемок в глинистых породах немедленно образуется зона разуплотнения, обязанная своим происхождением разгрузке от естественных напряжений, действовавших в массиве до создания свободной поверхности, и растрескиванию глины при ее подсыхании на открытом воздухе. Разуплотнение глины приводит к немедленному и существенному уменьшению в ней скоростей распространения упругих волн. Так, в стенке дорожной выемки, пройденной в коренных миоценовых глинах, уже на вторые сутки после ее проходки скорость в зоне мощностью около 2 м падала до значений 400—

500 м/с по сравнению со значениями 2000—2200 м/с в неизменной части массива. Методика решения этой задачи, как и определение зоны поверхностного выветривания массивов глин, принципиально не отличаются от описанной ниже в разд. 13.4.

Получить точное представление о строении верхней части разреза при любом законе изменения скорости в глубину можно с помощью сейсмокаротажа, выполняемого со специальным прижимным зондом и любой одноканальной сейсмоустановкой, обеспечивающей необходимую точность отсчета времени. Такой каротаж обычно производится в сухих скважинах глубиной 20—10 м. Упругие колебания возбуждаются ударами молота по металлической подставке. Детальность расчленения зависит от расстояния между соседними положениями зонда, которое может быть доведено до 0,25 м. Особенно ценную информацию такой каротаж дает при наличии в разрезе пластов с пониженной скоростью или при частом чередовании маломощных пластов.

Приведенные примеры свидетельствуют о широких возможностях сейсмического метода при расчленении массивов, сложенных дисперсными грунтами. Включение сейсморазведки в общий комплекс исследований, как правило, намного повышает их информативность при одновременном снижении затрат времени на выполнение работ.

Зондирование

Сущность метода зондирования заключается во внедрении (забивкой или вдавливанием) в массив горных пород специальных зондов и регистрации сопротивления породы этому внедрению. В том случае, когда зонд забивают, речь идет о динамическом зондировании, когда вдавливают — о статическом.

В Советском Союзе с его многообразием геолого-географических условий полевые методы исследования строения рыхлых отложений, и в особенности зондирование и пенетрационный каротаж, применяются довольно широко. В практике инженерно-геологических изысканий используются и динамическое, и статическое зондирование.

Не останавливаясь на легких переносных приспособлениях для динамического зондирования, применяемых для исследования грунтов по глубине до 5 м, рассмотрим установки, смонтированные на одноосном прицепе или автомашине и предназначенные для исследования пород до глубины 30 м. Основными среди них являются установки УБП-15, УБП-15М (конструкции Гидропроекта). Их основные технические данные следующие: двигатель УД-2, УД-6; вес ударника $P_{уд} = 600$ Н; высота подъема ударника $H = 0,8$ м; диаметр штанг 42 мм, наконечника — 74 мм; угол раскрытия конуса $\alpha = 60^\circ$. Калибрующая часть на наконечнике отсутствует. Масса установки 1050 кг.

Аналогичные показатели имеет автоматизированная установка динамического зондирования АДЗ-1С-15м (масса 450 кг). Установка АДЗ-2т-25м имеет те же наконечник и штанги, а вес молота значительно больше (1200 Н), высота подъема молота 100 см.

Кроме этих установок для динамического зондирования применяется навесное оборудование: навесной автоматический пенетрометр НАП-10 к установке Булиз-15 и приставка к УГБ-50 М. Все технические данные приставок соответствуют оборудованию для динамического зондирования установки УБП-15М. За рубежом, как правило, используются копровые установки статического зондирования.

Среди отечественных установок статического зондирования следует отметить следующие: С-979, УЗК-3, СН59, УСЗК-3, С-832. Они отличаются друг от друга по приводу, но практически имеют одни и те же диаметры зондов (35,6 мм) и одинаковое усилие вдавливания.

В итоге установки позволяют определять удельное сопротивление наконечнику зонда q_z , удельное трение f_z или общее сопротивление зондированию. В 1974 г. был выпущен ГОСТ 20069—74 «Грунты. Метод полевого испытания статическим зондированием», в котором регламентированы размеры и формы зондов, приемы обработки.

В связи с интенсивным освоением шельфа необходимо кратко остановиться на приемах зондирования в морских условиях при исследовании донных отложений.

Для исследования донных отложений используются практически все виды зондирования. Однако если на суше больший объем приходится на динамическое зондирование, то при исследовании донных отложений шельфа, как правило, применяются статическое зондирование и стандартные пенетрационные испытания (*SPT*).

Использование метода *SPT* определено техническими условиями и стандартами *ASTMD 1586—63T*. При этом применяется стандартный по форме и размерам грунтонос (общая длина 813 мм, длина внутренней камеры 635 мм, внутренний диаметр 35 мм, внешний диаметр 51 мм, масса ударника 63,5 кг, высота подъема молота 76,2 см). Результат испытаний выражается в виде числа N ударов, необходимых для погружения пробоотборника на глубину 30,48 см (1 фут).

Что касается установок статического зондирования, используемых для изучения донных отложений шельфа, то их можно ориентировочно разделить на три группы. К первой группе относятся установки массой 15—20 т, опускаемые на дно вместе со смонтированным на них гидромеханическим оборудованием, зондом и колонной штанг, поддерживаемой поплавком. Зонд вдавливается в грунт до глубины 30 м при глубине воды 100—200 м. Некоторые установки при работе на мелководье обслуживаются подводным оператором (водолаз, аквалангист).

Ко второй группе относятся тяжелые установки массой до 40 т, которые позволяют проходить скважину и выполнять в ней исследования с помощью специальных зондов. Бурение ведется с обсадкой трубами, которые одновременно используются для вдавливания в забой зондов. Установки связаны с судном-носителем тросами и кабелями, и поэтому их динамическая стабилизация не нужна.

Входящие в состав третьей группы установки позволяют сочетать бурение и зондирование. В этом случае поинтервальное бурение ведется непосредственно с судна. На поверхности дна находится донная направляющая плита. Специальный зонд для статического зондирования опускается в буровую трубу до забоя на кабель-тросе, закрепляется в ней и затем вдавливается в забой с помощью той же трубы или гидроцилиндра. После этого зонд извлекают и продолжают бурение. Вся регистрирующая аппаратура находится на судне-носителе.

За рубежом, как правило, регистрируют два показателя q_z и f_z . Отечественная подводная пенетрационно-каротажная установка ПСПК позволяет кроме названных показателей одновременно непрерывно по глубине определять естественный гаммафон, рассеянное грунтом излучение гамма-источника (ГГК) и нейтронов. Ниже приведены приемы интерпретации результатов зондирования.

Аппаратура, используемая для измерения сил, действующих на наконечник зонда и цилиндр трения, а также для передачи информации от зонда к регистрирующей аппаратуре, находящейся на установке, становится более сложной, но зато более эффективной в части быстроты действия, чувствительности и надежности.

Не редки случаи, когда получаемая информация тут же обрабатывается на микроЭВМ или выдается на носителях, готовых к использованию для машинной обработки.

Интерпретация результатов зондирования. Зондирование является разновидностью механического каротажа, в процессе которого измеряется сопротивление грунта внедрению зонда, а не скорость проходки при бурении. Сам процесс зондирования (взаимодействия зонда с породой) очень сложен и до настоящего времени нет общепризнанной теории, описывающей его аналитически.

Тем не менее накопленный в этой области опыт проведения экспериментальных работ позволяет в определенной степени описывать зондирование, выявлять факторы, существенно влияющие на его результаты, а также связывать результаты зондирования с показателями состава, состояния и свойств пород.

Общая картина изменений, происходящих в породе при вдавливании в нее наконечника зонда такова: порода, выдавливаемая из-под наконечника, оказывает давление на грунт, находящийся в непосредственной близости от стенок зонда, отодвигает

его и увлекает вниз. Выжатая порода окружает боковую поверхность зонда тонкой рубашкой (около 5 мм при диаметре зонда 60 мм). Следующая за ней зона преимущественно вертикальных перемещений частиц породы—это по сути зона сдвига. Затем располагается третья, наиболее объемная зона, в которой преобладают горизонтальные перемещения частиц породы, хотя происходит и смещение вниз по вертикали. Ее можно считать зоной сжатия породы.

Что касается зон разуплотнения, полученных в некоторых случаях вместо зон сжатия, то их существование объясняется состоянием уплотнения породы по отношению к критической пористости. Дальше, очевидно, идет зона упругих деформаций. В процессе введения зонда наблюдались не только эти изменения. В частности, происходило вращение частиц породы вначале против, а затем по часовой стрелке (после прохождения наконечника). Таким образом, картина, наблюдаемая при вдавливании зонда, свидетельствует о том, что процессы сдвига и сжатия породы тесно связаны и протекают одновременно. При этом в породах разной плотности картины менялись. В рыхлых породах зонд как бы проминает породу и ядро уплотнения находится впереди наконечника. В плотных породах уплотнения почти не наблюдается: наконечник режет породу, раздвигая ее в стороны. В глинистых породах наблюдаются проявления порового давления, выражающиеся в возникновении фронта сферической формы, движущегося перед наконечником.

Следует отметить, что в плотных породах зона влияния зонда гораздо больше, чем в рыхлых. Отсюда следует, что объем исследуемой зондированием породы изменяется по глубине в зависимости от ее плотности.

Небезынтересно отметить влияние формы и размеров наконечников зонда на результаты испытаний. Вопрос исследовался многими авторами, публиковавшими свои материалы. Хотя общего мнения не имеется, большинство исследователей считают, что увеличение диаметра зонда до 100 мм ведет к некоторому снижению величины q_3 . При этом в более плотных породах оно проявляется более отчетливо. Угол заострения практически не влияет на удельное сопротивление q_3 , зато оказывает значительное влияние на удельное трение. Чем больше его заострение, тем выше трение породы по боковой поверхности.

Результаты динамического и статического зондирования могут использоваться самостоятельно для решения целого ряда инженерно-геологических задач: оценки пространственной изменчивости пород; определения положения кровли коренных пород; выявления пустот в породах на оползневых склонах, карстовых процессов, старичных отложений в поймах рек, погребенных почв; установления мощности торфяных отложений и др.

В соответствии с ГОСТами результаты динамического зондирования выражаются в виде условного динамического сопротив-

ления грунта (в МПа)

$$p_d = AK\Phi \frac{n}{h},$$

где A — удельная энергия зондирования, определяемая в зависимости от типа установки (для основной установки $A=1120$ Н/см); K — коэффициент, учитывающий потерю энергии при ударе молота о наковальню и на упругие деформации штанг (для основной установки в интервале $0,5-1,5$ м $K=0,62$; $1,5-4,0$ м $K=0,56$; $4,0-8,0$ м $K=0,48$; $8,0-12,0$ м $K=0,42$; $12,0-16,0$ м $K=0,37$; $16,0-20,0$ м $K=0,34$); Φ — коэффициент, учитывающий потери энергии на трение штанг о грунт (при крутящем моменте 5 кН·см $\Phi=1$; при $5-15$ кН·см Φ определяется опытным путем); n — число ударов молота в залеге; h — глубина погружения зонда за залог.

Результаты зондирования представляются в виде диаграммы изменения p_d по глубине зондирования. В связи с тем, что p_d является комплексным показателем, на который влияют состав, состояние и свойства пород, различные исследователи связывают его с плотностью сложения и степенью водонасыщения песков, углом внутреннего трения, природным давлением, сцеплением упрочнения и другими показателями. Ниже приведены некоторые из этих зависимостей.

В Болгарии связь между показателями динамического зондирования N_{10} (число ударов, необходимое для погружения зонда на 10 см) и модулем деформации, определенным с помощью штампа площадью 5000 см² E_0 и в одомере E , выражается соотношениями, приведенными ниже.

Порода	E_0	E
Песок:		
гравелистый	$2N_{10} + 2$	$8N_{10} - 9$
среднезернистый	$2N_{10} - 12$	$6,5N_{10} + 3,5$
глинистый	$17N_{10} - 80$	$6,7N_{10} - 24$
Суглинок	$11N_{10} - 88$	$4,3N_{10} - 27$
Глина	$9,5N_{10} - 50$	$4N_{10} - 11$

В других странах используются и такие связи: для мелких и средних песков $E=537(N+15)$; для мелких глинистых песков $E=358(N+5)$.

Довольно важен вопрос о связи между показателями динамического и статического зондирования. По мнению большинства исследователей, связь между N и q_3 пропорциональная, а величина коэффициента связи зависит от вида породы. Для уравнения $q_3 = nN_{10}$, приводятся следующие значения коэффициента n : глины 2 ; глинистый пылеватый песок $2,5$; пылеватый песок $4,0$; песок $6,5$; гравелистый песок $10,0$.

Динамическое зондирование является надежным и простым методом для общей оценки геологического строения изучаемого объекта. Однако следует иметь в виду, что этот метод из-за

отсутствия первичных преобразователей на забое пригоден только для приблизительной оценки показателей физико-механических свойств исследуемых пород.

Статическое зондирование. Результаты статического зондирования используются для выделения инженерно-геологических элементов, оценки возможности забивки и глубины погружения свай, определения данных для расчета свайных фундаментов, приближенной оценки физико-механических характеристик, выяснения степени уплотнения и упрочнения грунтов во времени, выбора точек (в плане и по глубине) для отбора проб и исследования пород другими полевыми методами, а также для изучения донных отложений.

Результаты статического зондирования обычно выражаются в виде удельного сопротивления грунта наконечнику зонда q_3 , удельного трения f_3 , сопротивления грунта по боковой поверхности зонда Q_3 . Диаграммы статического зондирования, как правило, строятся в виде графиков изменения q_3 и f_3 по глубине.

Ю. Г. Трофименков рекомендует использовать результаты такого испытания для оценки плотности песков, определения консистенции глинистых пород (при $q_3 > 5,0$ МПа — твердая; $q_3 = 3,0—5,0$ — полутвердая; $q_3 = 1,0—3,0$ — тугопластичная; $q_3 < 1,0$ — мягкопластичная) и угла внутреннего трения (по специальным номограммам при давлении 0,3 МПа $\tau = 0,0021 q_3 + 0,102$ МПа).

Нормативные значения модуля деформации E^H следующие: для песков $E^H = 3q_3$, для глин $E^H = 7q_3$. Значения сопротивления забивной висячей сваи определяются по нормативным документам.

Довольно интересен вопрос определения вида (глинистости) породы по результатам статического зондирования. Отношение показателей f_3/q_3 позволяет расчленять разрез на пески, супеси, суглинки и глины.

Анализ фактического материала, накопленного во ВСЕГИН-ГЕО, позволил сопоставить данные, полученные пенетрационно-коротажными станциями и Бегеманом (табл. 12).

Этот показатель довольно широко используется и в других странах. Так, в Италии $f_3/q_3 > 0,08$ характеризует торф и органические глины, в Великобритании $f_3/q_3 < 0,01$ — гравий.

Т а б л и ц а 12

Порода	Отношение f_3/q_3 по данным	
	Х. Бегемана	ВСЕГИНГЕО
Пески	$< 0,02$	0,008—0,021
Супеси	0,02—0,04	0,021—0,035
Суглинки	0,03—0,05	0,035—0,045
Глины	$> 0,05$	0,045—0,20

Сопротивление пород C_u при недренированном сдвиге может быть определено по формуле $C_u = q_3/n$ (где n — показатель изменчивости, колеблющийся в пределах от 12 до 37; $n=12$ при $q_3 < 1,5$ МПа, $n=37$ при $q_3 = 1,5-5,0$ МПа).

Следует также сказать несколько слов о специфике статического зондирования донных отложений шельфа. Геологические условия бассейнов различных морей (Черного, морей Северного и Восточного бассейнов) в значительной степени отличаются друг от друга. Характерной особенностью южных морей является наличие мощного слоя (до 30 м) ила, удельное сопротивление которого составляет от 0,0 до 1,5 МПа, а трение — от 0,0 до 0,0025 МПа. Естественно, что в таких условиях первичные преобразователи должны обладать очень высокой чувствительностью. В то же время при работе на глубинах до 200 м (по воде) на зонд влияет гидростатическое давление, достигающее 2,0 МПа. При этом возникает задача разграничить давления, которая может быть решена двумя путями. В первом случае требуется специальный первичный преобразователь, позволяющий измерять гидростатическое давление и вычитать его из общего давления. Вторым вариантом может явиться специальный зонд с разгруженной внешней оболочкой, на которую крепятся тензорезисторы. В этом случае возможность измерения сопротивления донных отложений (по глубине воды) возрастает во много раз.

Следует также отметить, что методика интерпретации результатов статического зондирования требует дальнейшего совершенствования. Вопросы переуплотнения глинистых пород за счет капиллярного давления и расчленения рыхлых песков, слабых глин и торфа при одном и том же значении q_3 по удельному трению ждут своего решения.

Коэффициент трения несет много еще не познанной информации. В конечном итоге он определяется упругими свойствами породы, ее плотностью, формой и размерами частиц грунта. Пески с высокой степенью плотности могут значительно отличаться друг от друга по значению q_3 . В этом случае важную роль приобретает прочность зерен. Известно, что зерна кварцевых песков гораздо прочнее зерен известковых песков, а глауконит несколько тверже, чем графит. Важную роль также имеет форма зерен. При одной и той же плотности морские пески отличаются меньшей величиной q_3 , чем делювиальные. Естественное напряженное состояние породы, в значительной степени сказывающееся на результатах зондирования, должно учитываться при исследовании.

11.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

Методы определения гранулометрического состава дисперсных грунтов зависят от вида грунта и делятся соответственно на три группы: 1) методы определения гранулометрического

состава крупнообломочных грунтов; 2) методы определения гранулометрического состава песчаных грунтов; 3) методы определения гранулометрического состава глинистых грунтов.

Полевой метод определения гранулометрического состава песчаных грунтов совпадает с лабораторным (ситовый метод) и описан в соответствующем разделе лабораторных методов определения гранулометрического состава дисперсных грунтов (т. 2, разд. 6.3). Поэтому ниже будут описаны только методы первой и второй групп.

Определение гранулометрического состава крупнообломочных грунтов

Теоретические и методические основы изучения гранулометрического состава крупнообломочных грунтов разработаны А. И. Шеко и Е. А. Толстых.

Определение гранулометрического состава крупнообломочных грунтов является сложной и трудоемкой процедурой. Особое внимание при этом следует уделять выявлению содержания крупнообломочного компонента, поскольку он является, с одной стороны, расчетным параметром, применяемым в некоторых случаях при определении физических свойств крупнообломочных грунтов, а с другой — основным классификационным признаком крупнообломочных грунтов. Так, А. И. Шеко по содержанию крупнообломочного компонента вычислял плотность и влажность грунтов в целом с учетом одноименных показателей свойств отдельных компонентов, а также разработал гранулометрическую классификацию крупнообломочных грунтов.

Введение ряда дополнительных признаков позволяет предложить классификацию крупнообломочных грунтов, основанную на общей инженерно-геологической классификации грунтов и двух-четырёхкратном выделении качественно различных элементов (табл. 13).

Содержание крупнообломочного компонента может выражаться в трех видах: по массе в сухом виде Q , по объему Q_V и массе при естественной влажности Q_w . В настоящее время известно два способа определения содержания крупнообломочного компонента: по полному гранулометрическому анализу и путем вычисления по методу систем расчетных связей.

Расчетный способ. Возможность определения содержания крупнообломочного компонента путем вычисления вытекает из обобщенного уравнения

$$X = x^i + Q'(x^c - x^i),$$

откуда $Q' = X - x^i / (x^c - x^i)$,

где X , x^i , x^c — одноименные свойства грунта соответственно в массиве, мелкозема и крупнообломочного компонента в образце (например, плотность или влажность); $Q' = Q$ — содержание крупнообломочного компонента (выраженное в единицах

массы) в сухом грунте при использовании в уравнении весовой влажности; $Q' = Q_V$ — содержание крупнообломочного компонента (выраженное в единицах объема) при использовании в уравнении плотности или объемной влажности.

Следует отметить, что все составляющие данного уравнения равнозначны. Классифицируя их на экспериментальные и вычисляемые, определим, что при трех известных параметрах любой четвертый может быть определен расчетом.

Таблица 13

**Инженерно-геологическая классификация
крупнообломочных пород (по Е. А. Толстых)**

Породы (без жестких связей)	Типы пород (по содержанию крупнообломочного компонента)	Содержание (в долях единицы)		Название породы
		крупнообломочного компонента (по преобладающей группе фракций), например, щебня	мелкозема, например, супеси	
Связные	I	0,10—0,35	0,90—0,65	Щебнистая супесь
	II	0,35—0,65	0,65—0,35	Щебнисто-супесчаная порода
Несвязные	III	0,65—0,90	0,35—0,10	Супесчаный щебень
	IV	>0,90	<0,10	Щебень с супесью

Примечания: 1. Если мелкозем представлен песком, породы относятся к классу несвязных.

2. Классификация групп фракций крупнообломочного компонента и их размер (в мм): глыбы более 800 и камни (валуны) 800—200 (в целом грубые); щебень (галька) 200—20 и дресва (гравий) 20—2 (в целом крупные).

3. Классификация мелкозема по числу пластичности для частиц менее 2 мм: песок 0 и супесь 0,01—0,06 (в целом песчаные); суглинок 0,07—0,17 и глина более 0,17 (в целом глинистые).

4. В качестве примера крупнообломочного компонента в таблице использован щебень, а мелкозема — супесь. На практике могут применяться любые группы фракций из классификаций в примечаниях 2 и 3.

5. Специфические свойства крупнообломочных пород проявляются при содержании крупнообломочного компонента более 0,1. Выделенные типы пород характеризуют весь диапазон изменений их свойств — скачкообразных при переходе от одного типа к другому и постепенных в пределах каждого типа.

Строя соответствующие системы расчетных связей и получая на их основании так называемые рациональные схемы опробования крупнообломочных грунтов, можно наиболее целесообразно и экономично определять комплекс их физических свойств в любых условиях. Применение содержания крупнообломочного компонента в вычислениях физических свойств обуславливает необходимость установления допустимой точности его определения $\pm 0,02$.

Полный гранулометрический анализ. При полном гранулометрическом анализе крупнообломочных грунтов

мы считаем целесообразным применение низшей таксономической единицы только на уровне групп фракций. Для практических целей более дробное деление в подавляющем большинстве случаев не нужно.

Теоретическая минимальная проба V_{min}^T крупнообломочных грунтов для определения гранулометрического состава вычисляется исходя из пространственного размещения наиболее грубой фракции и составляет: $V_{min}^T = 0,236 l_{ц}^3$ (где $l_{ц}$ — расстояние между центрами частиц наиболее крупной фракции). Практическую минимальную пробу V_{min}^n целесообразно принять на порядок больше и считать ее равной двум кубам со стороны $l_{ц}$, т. е. $V_{min}^n = 2l_{ц}^3$.

Общая технологическая схема определения гранулометрического состава крупнообломочных грунтов приведена в табл. 14. В наиболее общем случае она применима полностью, а при отсутствии тех или иных групп фракций — по соответствующим частям.

В соответствии с этой схемой определение крупнообломочных частиц размером более 200 мм ведется фотометодом, а размером 20—200 мм с помощью грохочения. Для определения содержания частиц диаметром менее 200 мм применяется ситовой анализ, а тонкодисперсного мелкозема — дополнительно пипетка или ареометрический метод.

Сущность фотометода состоит в измерении площади грубых обломков относительно площади изучаемого вертикального обнажения или стенки горной выработки. При этом считается, что содержание обломков по площади соответствует их объемному содержанию. В работе следует руководствоваться следующими положениями: 1) практическая минимальная проба (площадь измерения) должна содержать не менее 10 обломков наиболее крупной фракции; 2) фотографирование производится с масштабной накидной сеткой размером 200×200 мм с ячейками 100×100 мм; 3) содержание грубых фракций по объему вычисляется как отношение их площади на снимке к площади измеряемого обнажения на снимке; 4) необходимые площади на фотоснимках измеряются планиметром, взвешиванием вырезанных частей на аналитических весах или подсчетом по клеткам накидной сетки, которая может быть увеличена прямо на снимке путем расчерчивания; 5) подсчет необходимых площадей может производиться непосредственно с помощью масштабной накидной сетки; 6) размер обломков определяется по их среднему, а не максимальному или минимальному диаметру.

Грохочение проводят на крупных ситах с диаметром отверстий 100 (80), 60, 40 и 20 мм. При этом необходимо руководствоваться следующими положениями: 1) для определения практической минимальной пробы V_{min}^n делается три — пять замеров расстояния между центрами частиц наиболее крупной фракции $l_{ц}$ в обнажении, стенке горной выработки или керне

Общая технологическая схема гранулометрического анализа крупнообломочных грунтов

Способ измерения	Характер измерения	Размер обломков, мм	Размер обломков групп фракций, мм	Группы фракций	Размер обломков компонентов, мм	Компонент
Фотометод	По объему	>200	>800	Глыбы	>2	Крупнообломочный
			800—200	Камни (валуны)		
Грохочение	По массе при естественной влажности	200—20	200—20	Щебень (галька)		
Ситовой анализ	По массе в сухом виде	20—0,1	20—2	Дресва (гравий)		
			2—0,05	Песок	<2	Мелкозем
Микроагрегатный анализ (пипетка или ареометр)	По массе в сухом виде	<0,1	0,05—0,001	Пыль		
			<0,001	Глина		
			<0,0001	Коллоиды		

скважин, а затем вычисляются $I_{ц}$ и $V_{\min}^n = 2I_{ц}^3$; V_{\min}^n можно также определять исходя из предположения, что в пробе должно быть не менее 10 обломков наиболее крупной фракции; 2) обычно размер и массу определяют для каждого обломка в интервале 200—100 (80) мм; 3) на грохоты загружают разовые навески массой не более 20 кг; 4) навески на грохотах взвешивают ручным безменом; 5) в процессе грохочения грубые частицы очищаются от налипшего мелкозема; 6) из частиц размером менее 20 мм берется технологическая проба на определение влажности мелкозема W^l , поскольку она может отличаться от естественной; 7) из частиц размером более 20 мм берется проба на определение влажности W^c и плотности ρ^c крупнообломочного компонента; 8) вся масса частиц размером менее 20 мм перемешивается, и из нее берется проба массой 1,5—2 кг

(один мешочек) для лабораторного ситового и микроагрегатного (гранулометрического) анализов.

Полученные результаты измерений гранулометрического состава разнородны (см. табл. 14) и путем вычислений должны быть объединены в единую систему. При расчетах надо иметь в виду, что обычно для практических целей определение гранулометрического состава крупнообломочных пород достаточно на уровне групп фракций. Ниже приводится порядок вычисления содержания групп фракций по массе в сухом виде.

Первый этап — вычисление содержания частиц размером менее 200 мм. На этом этапе обработка данных заканчивается, если в породе нет обломков крупнее 200 мм.

Дано: q_d — содержание групп фракций в сухом виде для частиц размером менее 20 мм (лабораторные измерения); q_w^{200-20} — содержание частиц размером 200—20 мм и $q_w^{<20}$ — содержание частиц размером менее 20 мм при естественной влажности для всех частиц с диаметром меньше 200 мм; w^c — естественная влажность крупнообломочного компонента, которая определяется термостатно-весовым способом на каждом из трех — пяти обломков массой 100—300 г; w^f — естественная влажность мелкозема (или технологическая влажность мелкозема), т. е. частиц диаметром меньше 2 мм, которая определяется термостатно-весовым способом на образцах массой 100—300 г с исключением влияния частиц крупнее 2 мм по формуле

$$W^f = (W^n M_d^n - W^c m_d^c) / (M_d^n - m_d^c),$$

где W^n — влажность лабораторного образца; M_d^n — масса лабораторного образца в сухом виде; m_d^c — масса частиц размером больше 2 мм в сухом виде, содержащихся в образце, определяемая после промывки образца на сите с диаметром ячеек 2 мм и высушивания остатков.

Предварительно вычисляются следующие показатели: $W^{<20}$ — влажность всех частиц с размером меньше 20 мм

$$W^{<20} = W^c q^{20-2} + W^f q^{<2};$$

$M^{<200}$ — масса сухой породы для частиц с размером меньше 200 мм

$$M^{<200} = q_w^{200-20} / (1 + w^c) + q_w^{<20} / (1 + w^{<20});$$

$q^{<20}$ — содержание частиц с размером меньше 20 мм в сухом виде

$$q^{<20} = q_w^{<20} / M^{<200} (1 + W^{<20}).$$

Искомые величины содержания групп фракций в сухом виде составят: щебень (галька) $q^{200-20} = q_w^{200-20} / M^{<200} (1 + W^c)$; дресва (гравий) $q^{20-2} = q^{<20} q_n^{20-2}$; песок $q^{2-0.05} = q^{<20} q_n^{2-0.05}$; пыль $q^{0.05-0.001} = q^{<20} q_n^{0.05-0.001}$; глина $q^{<0.001} = q^{<20} q_n^{<0.001}$.

Второй этап — вычисление содержания групп фракций в сухом виде, включая обломки с размером больше 200 мм, т. е. в наиболее общем виде.

Дано: содержания групп фракций в сухом виде, вычисленные на первом этапе; $q_V^{>800}$, $q_V^{800-200}$ и $q_V^{<200}$ — содержание по объему обломков соответственно с размером больше 800, 800—200 и меньше 200 мм (по фотометоду); ρ^c и W^c — соответственно плотность и влажность крупнообломочного компонента, которые определяются последовательно парафинированием по ГОСТ 5182—78 и термостатно-весовым способом на каждом из трех—пяти обломков массой по 100—300 г; ρ и W_o — соответственно плотность и объемная влажность породы в массиве для частиц размером менее 200 мм (обычно определяются радиоизотопными измерениями).

Предварительно вычисляются:

$$M = (q_V^{>200} \rho^c / 1 + \omega^c) + q_V^{<200} (P - W_o),$$

где M — масса сухой породы;

$$q^{>200} = q_V^{>200} \rho^c / (1 + \omega^c) M,$$

где $q^{>200}$ — содержание обломков с размером более 200 мм по массе в сухом виде;

$$q^{<200} = q_V^{<200} (P - W_o) / M,$$

где $q^{<200}$ — содержание обломков с размером менее 200 мм по массе в сухом виде.

Искомые величины содержания групп фракций в сухом виде составляют: глыбы $q_{bl} = q^{>200} q_V^{>800} / q_V^{>200}$; камни (валуны) $q_{st} = q^{>200} q^{800-200} / q_V^{>200}$; щебень (галька) $q_{rd} = q^{<200} q^{200-20}$; дрова (гравий) $q_{gr} = q^{<200} q^{20-2}$; песок $q_{sd} = q^{<200} q^{2-0,05}$; пыль $q_{sr} = q^{<200} q^{0,05-0,001}$; глина $q_{cl} = q^{<200} q^{<0,001}$. Объективно существуют и наиболее мелкие коллоидные фракции, но в данном случае не предусматривается их выделение.

Содержание крупнообломочного компонента в сухом виде определяется как сумма $Q = q_{bl} + q_{st} + q_{rd} + q_{gr}$, содержание его по массе при естественной влажности вычисляется по формуле

$$Q_w = Q(1 + W^c) / [Q(1 + W^c) + (1 - Q)(1 + W^f)],$$

а содержание по объему рассчитывается по формуле

$$Q_V = Q \rho^f (1 + W^c) / [Q \rho^f (1 + W^c) + \rho^c (1 - Q)(1 + W^f)],$$

где ρ^f — плотность мелкозема (частиц размером меньше 2 мм), которая определяется парафинированием по ГОСТ 5182—78 на трех—пяти образцах ненарушенной структуры массой 100—300 г каждый с исключением влияния частиц крупнее 2 мм по формуле

$$\rho^f = [M^a - m_d^c (1 + W^c)] \rho^c / [V^a \rho^c - m_d^c (1 + W^c)],$$

где $M^л$ — масса лабораторного образца при естественной влажности; $V^л$ — объем лабораторного образца в ненарушенном состоянии.

Определение гранулометрического состава глинистых пород

Глинистые грунты являются сложными природными образованиями. Определение гранулометрического состава таких грунтов из-за наличия в них глинистых частиц, размер которых менее 0,001 мм, достаточно сложно, особенно в полевых условиях. Известно три основных метода изучения гранулометрического состава глинистых грунтов в полевых условиях: а) визуальный; б) Филатова и Рутковского; в) Сабанина.

Визуальный метод. Наиболее простым методом определения гранулометрического состава глинистых грунтов в полевых условиях является визуальный. М. М. Филатовым в 1936 г. были разработаны признаки для визуального определения гранулометрического вида грунтов. В сокращенном виде эти признаки для глин, суглинков и супесей можно сформулировать следующим образом.

1. Глины — очень трудно растираются в порошок, легко дают прочный длинный шнур диаметром менее 1 мм и легко скатываются в шарик.

2. Суглинки — при растирании на ладони не дают ощущения однородного порошка и при скатывании не образуют длинного шнура — шнур при сгибании образует трещины. Суглинки скатываются в шарик.

3. Супеси — при растирании на ладони дают ощущение неоднородного порошка, в котором ясно чувствуется присутствие песка; скатываются в шнур. Скатанный шарик покрывается трещинами и осыпается.

Очевидно, что визуальный метод позволяет получить лишь приближенное представление о гранулометрическом составе грунтов, кроме того, он достаточно субъективен.

Простейший метод, позволяющий характеризовать дисперсность глинистых грунтов в полевых условиях с помощью несложного оборудования, был предложен в 1894 г. А. Н. Сабаниным. Сущность его сводится к отмучиванию пробы грунта в стаканчике высотой 8 см. Метод позволял определить содержание в грунте частиц с диаметром менее 0,01 мм (физическая глина).

Метод Филатова. М. М. Филатовым был предложен способ определения гранулометрического состава глинистых грунтов посредством отмучивания «физической глины» в воронке и определения «числа набухания» грунта в воде также в специальной воронке. По этим двум показателям с помощью специально разработанной таблицы определяют гранулометрические виды грунта.

Метод Рутковского. В настоящее время в практике инженерно-геологических изысканий получил распространение метод Рутковского. В основу его [47] положены: 1) способность глинистых фракций набухать в воде и 2) зависимость скорости оседания частиц в воде от их размера.

Между объемом анализируемого грунта и величиной набухания существует следующая эмпирическая зависимость: $X = 22,7 K_V$ (где X — содержание глинистых частиц; K_V — прирост объема на 1 см³ первоначально взятого объема грунта). Метод Рутковского позволяет выделить три основные фракции: глинистую, песчаную и пылеватую. Несмотря на простоту и возможность достаточно быстро производить анализ гранулометрического состава, этому методу свойственны существенные недостатки: 1) допущение прямой пропорциональной зависимости между величиной набухания и содержанием глинистых частиц в грунте, поскольку величина набухания является функцией как гранулометрического состава, так и минерального состава и состава обменных катионов; 2) неточность отсчетов вследствие применения мензурки с грубой градуировкой.

Полевой анализ по Рутковскому состоит из двух частей: определения содержания глинистых частиц (диаметром менее 0,005 мм) и определения содержания песчаных частиц (размером 1—0,05 мм).

1. Для определения содержания частиц размером меньше 0,05 мм отобранную методом квартования пробу воздушно-сухого грунта, просеянную через сито с отверстиями 0,5 мм, помещают в мензурку емкостью 100 см³ в таком количестве, чтобы после уплотнения в мензурке получился постоянный объем грунта $V = 5$ см³.

2. После добавления 50—60 см³ воды и размешивания грунта до исчезновения мазков на стенках мензурки к полученной суспензии добавляют 2,5—3 см³ раствора хлористого кальция (концентрация 5,5 г CaCl₂ на 100 см³ воды). После этого мензурку доливают водой до отметки 100 см³ и полученную суспензию отстаивают в течение 24—48 ч.

3. По окончании отстаивания определяют объем набухшего грунта и вычисляют прирост объема на 1 см³ от первоначального объема K_V по формуле $K_V = (V_1 - V_0) / V_0$ (где V_0 — объем набухшего грунта, V_1 — начальный объем грунта).

4. Содержание в грунте глинистых частиц (в процентах к массе взятой навески) определяют по специальной таблице, показывающей эмпирически установленную зависимость набухания грунта от содержания в нем глинистых частиц.

Определение содержания песчаных частиц проводится в следующей последовательности.

1. Воздушно-сухой грунт объемом 10 см³ отмучивают в 100 см³ воды, перемешивают стеклянной палочкой с резиновым наконечником и сливают по 70—75 см³ через каждые 90 с вплоть до полного осветления жидкости.

2. После этого производят отмучивание в 30 см³ воды и сливают через каждые 30 с также до полного осветления.

3. Мензурку доливают водой до отметки 100 см³ и, дав отстояться, определяют объем осевшего на дно песка. Считая, что каждый 1 см³ осевших частиц отвечает 10 весовым долям в процентах грунта, вычисляют количество песка, умножая объем осадка на 10.

Содержание в грунте пылеватых частиц определяют, вычитая из 100 % содержание глинистых и песчаных частиц.

Метод Сабанина. В 1980 г. С. Д. Филимоновым была усовершенствована методика Сабанина, основанная на определении содержания частиц с помощью прямого метода (в отличие от определения по величине набухания) по скорости оседания в воде «физической глины» (размер частиц менее 0,01 мм) и «физического песка» (размер частиц более 0,01 мм). Как показали исследования, между содержанием «физической глины» и количеством глинистых частиц (размер частиц менее 0,001 мм) существует достаточно тесная коррелятивная зависимость — коэффициент корреляций $r=0,71$. Это говорит о том, что, проводя разделение глинистых грунтов на петрографические типы и виды по величине содержания «физической глины», мы тем самым учитываем содержание глинистых частиц, определяющих влияние гранулометрического состава на инженерно-геологические свойства глинистых грунтов.

Для проведения анализа по усовершенствованной методике Сабанина применяют стакан диаметром 6 и высотой 17 см (рис. 35). На высоте 3 см от дна в стакане имеется тубус с отверстием. Уровень, на котором находится отверстие трубки, является нулевым. Над нулевым уровнем отмечают высоту +2 см. Применение стакана такой конструкции позволяет избежать засасывания при сливе частиц крупнее 0,01 мм, так как сфера действия сливной трубки лежит выше нулевого уровня.

Определение содержания «физической глины» проводится в следующем порядке.

1. Отобранную методом квартования пробу воздушно-сухого грунта, просеянную через сито с диаметром ячеек 0,5 мм, помещают в мерный цилиндр емкостью 100 см³ в количестве 10 см³ (после уплотнения резиновым пестиком).

2. Полученный объем грунта переносят в фарфоровую ступку и растирают с добавлением 4 %-ного пиррофосфорнокислого натрия.

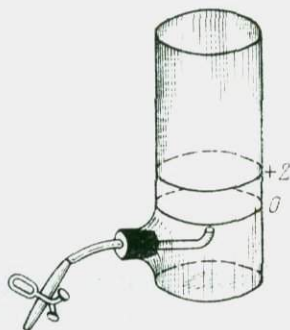


Рис. 35. Стакан для гранулометрического анализа по методу Сабанина

3. После диспергации грунт переносят в прибор Сабанина и доливают дистиллированной (или кипяченой) водой до отметки +2.

4. Взмученную с помощью мешалки суспензию грунта отстаивают в течение 100 с, после чего сливают суспензию до нулевой отметки.

5. Суспензию взбалтывают и сливают до тех пор, пока вода в интервале 0—2 не станет практически прозрачной. Опыт показывает, что это происходит приблизительно после 10 циклов для суглинков и 20 — для глин.

6. После окончания процесса отмучивания оставшийся грунт из стакана Сабанина переносят в мерный цилиндр и измеряют объем грунта. Полученный объем грунта по отношению к первоначальному даст процентное содержание частиц размером более 0,01 мм («физический песок»).

Усовершенствованная методика Сабанина позволяет определять петрографический тип исследуемого грунта с помощью классификации Качинского.

Глава 12

СОЧЕТАНИЕ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СТРОЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ МАССИВОВ

12.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время одной из первостепенных задач является создание комплексов методов, которые обеспечивали бы получение объективной, стандартной и максимально полной информации, пригодной для многоразового использования и достаточной для прогнозирования и проектирования различных объектов, расположенных в разных геолого-географических условиях.

Под понятием «объективная информация» подразумеваются данные, получаемые и обрабатываемые преимущественно с помощью стандартных технических средств для построения прогноза по специальным, обоснованным и проверенным на практике программам с заранее заданной чувствительностью метода к тем или иным нормированным показателям состава, строения и свойств пород. В данном случае ставится вопрос о промышленных методах получения информации, являющейся продукцией инженерно-геологических и гидрогеологических исследований.

Существует несколько вариантов решения этой задачи. В подавляющем большинстве случаев сочетание осуществляется путем объединения в один технологический цикл исследований, выполняемых последовательно или одновременно различными методами и техническими средствами, дополняющими друг друга. Для подбора методов и технических средств за основные

критерии принимают экспрессность, информативность и целевое назначение.

Как правило, рекомендуется такая последовательность: площадные геофизические методы, статическое и динамическое зондирование; проходка опорных скважин с одновременным описанием пород и последующим каротажем; проходка специальных горных выработок и испытание пород в них прессиометрами, вращательным срезом, штампами и т. д. Такая очередность необходима для того, чтобы исключить возможность изменения напряженного состояния и разрушения структуры грунтов предыдущими испытаниями. Соответствующим образом устанавливается и расстояние между точками испытаний грунтов разными методами.

В связи с некоторыми недостатками лабораторных методов, особенно проявляющимися при исследованиях водонасыщенных песчаных грунтов и илов, все большее значение приобретают полевые методы исследования грунтов (испытания пробными нагружениями на штампы, динамическим и статическим зондированием, вращательным срезом, ядерными методами).

12.2. СОЧЕТАНИЕ МЕТОДОВ НА БАЗЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Ниже приведен пример применения методов динамического и статического зондирования в комплексе с пробными нагружениями песков штампами.

Особенностью выбранного опытного участка являлось развитие в его пределах всех фаций аллювия: пойменного (суглинки, супеси, мелкие и пылеватые пески), старичного (маловлажные и очень влажные пылеватые пески, супеси и мягкопластичные суглинки и глины), руслового (мелкие водонасыщенные пески). Основным объектом изучения явились мелкие пески. Для динамического зондирования применялась установка УБП-15, укомплектованная стандартным зондировочным оборудованием.

Зондирование производилось с поверхности участка до глубины 10 м без разбуривания скважин. Условным показателем служило число ударов молота, необходимое для погружения зонда на 10 см (с соответствующими поправками). Для статического зондирования использовалась установка конструкции Гидропроекта (максимальное усилие 100 Н, диаметр наконечника зонда 35,7 мм, диаметр штанг 33,5 мм).

Аппаратура для регистрации q_z состояла из струнного динамометра, вмонтированного в нижнюю часть зонда, и центральной стадии ЦС-2. Испытания песков пробными нагружениями штампов выполнялись по стандартной методике в шурфах сечением $1,5 \times 1,5$ м, на глубинах до 3,0 м и при максимальном давлении на штамп 0,7 МПа.

Первоначально по всей площади изучаемого участка было проведено массовое испытание грунтов динамическим зондиро-

ванием. Глубина исследований грунтов достигала 20 м, а общий объем зондирования превысил 1500 м. Полученные данные позволили построить зондировочные профили, на которых оказалось возможным выделить горизонты, отличающиеся плотностью и прочностью. По ним были выбраны ключевые пункты для проведения контрольного статического зондирования, результаты которого в основном подтвердили правильность данных динамического зондирования и уточнили их.

Сопоставление результатов динамического и статического зондирования с данными бурения позволило детализировать разрез в пределах выделенных литологических разностей с точки зрения различия их физико-механических свойств.

По данным зондирования было установлено, что в пределах изучаемого участка пылеватые пески, слагающие верхнюю часть разреза, отличаются неоднородной плотностью — прочностью ($N=1\div 7$), а подстилающие их мелкие пески более прочны ($N=8$).

Такое расчленение грунтов по данным зондирования не только явилось основой для общей инженерно-геологической оценки строения участка, но и позволило выбрать наиболее характерные пункты для проходки шурфов и испытания песков нагружениями штампов. Целью проведения этих испытаний являлось не только определение характеристик плотности и сжимаемости, но и установление соответствующих градуировочных зависимостей для всего участка в целом.

Таким образом, результаты проведенного в значительном объеме динамического зондирования, подтвержденные данными ограниченного числа испытаний грунтов статическим зондированием и бурением, позволили четко разделить грунты изучаемого участка по строению и физико-механическим свойствам и обоснованно выбрать контрольные пункты для проведения опытно-градуировочных работ (проходка шурфов с отбором проб с ненарушенной структурой, испытание песков штампами). Это дало возможность определить плотность и сжимаемость песков в опытных пунктах и оценить те же свойства в пределах всего участка.

Подобный комплекс исследований для оценки влажности и плотности пород на ключевых участках часто дополняется ядерными методами.

12.3. СОЧЕТАНИЕ МЕТОДОВ НА ОДНОЙ БАЗЕ — СПОСОБЕ ПРОХОДКИ

На сегодняшний день пенетрационный каротаж (ПК) представляет собой наиболее прогрессивный способ получения комплексной информации о составе, состоянии и свойствах пород. Сущность ПК заключается в исследовании свойств пород при внедрении в нее пенетрационно-каротажного зонда, конструктивно объединяющего ряд первичных преобразователей непре-

ровного действия с регистрацией информации в аналоговой или дискретной форме.

В результате полевых испытаний горных пород определяют:

- 1) удельное сопротивление породы наконечнику зонда R ;
- 2) удельное трение породы по боковой поверхности зонда T ;
- 3) объемную влажность породы нейтрон-нейтронным каротажем (ННК) $W_{об}$;
- 4) плотность породы гамма-гамма-каротажем (ГГК) γ ;
- 5) естественную гамма-активность породы гамма-каротажем (ГК) I_{γ} ;
- 6) однородность горных пород исходя из значений R , T и γ ;
- 7) вид пород по отношению R/T и значениям I_{γ} , а также количественно оценивают механические, фильтрационные, просадочные и физические характеристики пород.

Пенетрационный каротаж позволяет получать в процессе проходки непрерывную по глубине запись значений перечисленных показателей (рис. 36). Базовым способом проходки является статическое зондирование. Измерение количественных значений показателей производится с помощью аппаратуры, расположенной в наконечнике зонда (на забое); запись показателей осуществляется с помощью наземной аппаратуры.

В настоящее время используются наземные и подводные станции. Первые нашли широкое применение при проведении геологических съемок и изыскательских работ, связанных с обоснованием проектов под мелиоративное, гидротехническое промышленное и другие виды строительства. Многолетний опыт эксплуатации станций показал, что их можно применять в различных природно-климатических условиях.

Оборудование и аппаратура. Пенетрационно-каротажные станции (СПК) состоят из следующих основных узлов и агрегатов: измерительной системы ПК (зонд, канал связи, бортовая измерительная и регистрирующая аппаратура); силовой и вспомогательного оборудования; транспортной базы.

Измерительная система ПК должна обеспечивать выработку комплексной измерительной информации о свойствах пород первичными преобразователями непосредственно на забое и передачу ее для регистрации в аналоговой или дискретной формах записи. При аналоговой форме записи она должна обеспечивать прием и непрерывную регистрацию сигналов, поступающих от первичных преобразователей зонда, при вертикальном масштабе записи диаграмм 1:50 или 1:100 (масштаб глубин). Конструкция зонда объединяет первичные преобразователи удельного сопротивления наконечнику, удельного трения по боковой поверхности, гамма-гамма-каротажа, гамма-каротажа и нейтрон-нейтронного каротажа. Допускается введение в зонд дополнительных измерительных преобразователей, а также использование дополнительных специальных зондов, повышающих чувствительность и информативность метода. Зонды СПК представляют собой цилиндр с коническим наконечником (угол при вершине 60°). Площадь его поперечного сечения должна быть не менее 10 см^2 , а боковой поверх-

ности воспринимающего элемента первичного преобразователя бокового трения (муфта трения) — не менее 350 см². Канал связи предназначен для обеспечения надежной передачи информации, поступающей от преобразователей зонда к бортовой регистрирующей аппаратуре.

Измерительная цепь ГГК (ГОСТ 23061—78) включает первичный измерительный преобразователь для регистрации гамма-

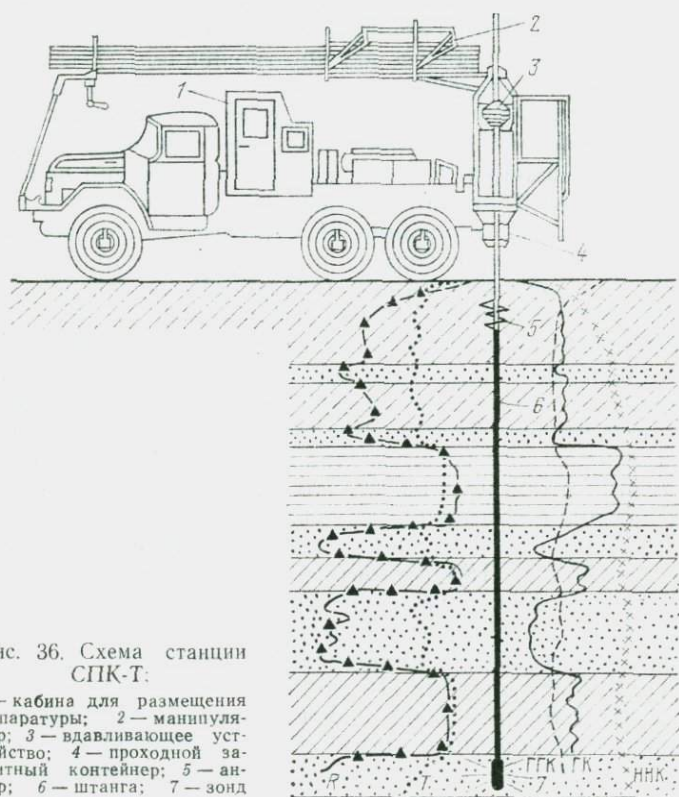


Рис. 36. Схема станции СПК-Т:

1 — кабина для размещения аппаратуры; 2 — манипулятор; 3 — вдавливающее устройство; 4 — проходной защитный контейнер; 5 — анкер; 6 — штанга; 7 — зонд

квантов (скорости счета гамма-квантов до 100 частиц в секунду с относительной погрешностью не более 5 %).

Измерительная цепь ННК соответствует требованиям ГОСТ 19611—74 и ГОСТ 24181—80. Аппаратура предназначена для работы при температуре окружающей среды от —10 до 40 °С и относительной влажности до 90 % (при температуре 30 °С).

Класс точности самопишущих приборов для аналоговой записи 1,5. Относительная погрешность при измерении R и T не более 5 %. Способ погружения зонда в породу предусматривает непосредственный контакт породы с цилиндрической частью зонда, в которой расположены первичные преобразова-

тели каналов трения по боковой поверхности и ГГК, ННК. Силовое и вспомогательное оборудование пенетрационных станций обеспечивает внедрение (извлечение) зонда в породу.

Подготовка к испытанию. Станцию устанавливают на горизонтальной площадке (подводную станцию выравнивают с помощью дистанционной системы управления). Подготовка СПК к проведению испытаний, их полная текущая проверка и контроль стабильности работы измерительной системы ПК выполняются в соответствии с требованиями инструкций по эксплуатации. Градуировка измерительной системы ПК производится по каждой измерительной цепи отдельно: цепи, измеряющие R , T и I_p , градуируются согласно инструкциям по эксплуатации аппаратуры; измерительные цепи ГГК и ННК — по ГОСТ 23061—78 и ГОСТ 24181—80. Точки ПК выносят на местность геодезическими методами. Степень износа зонда оценивают через каждые 500 м пенетрационного каротажа. Уменьшение диаметра основания наконечника и муфты трения не должно превышать 0,5 мм.

Проведение испытания. Внедрение зонда СПК производят в соответствии с инструкцией по эксплуатации. Скорость внедрения устанавливается в пределах $1,0 \pm 0,3$ м/мин. Регистрацию показателей испытаний производят непрерывно или дискретно в виде, удобном для автоматической обработки. На каждом носителе информации (при аналоговой форме — диаграммной ленте) фиксируют: положение точки испытания, номер, дату проведения ПК, устье, забой скважины и регистрируемые показатели. Все переключения диапазонов измерений отмечают на носителе информации. Испытание прекращают после достижения зондом заданной глубины или хотя бы одного из предельно допустимых условий эксплуатации станции. После окончания испытания устье скважины тампонируют породой.

Обработка результатов. Обработку и интерпретацию результатов испытаний, представленных на носителях информации в аналоговой или дискретной форме, проводят с помощью ЭВМ. Результаты ПК оформляют в виде графиков или таблиц с переводом измерительной информации с помощью градуировочных зависимостей в значения показателей свойств пород. По графикам и таблицам определяют свойства испытываемых пород в любой точке пенетрационного каротажа.

Интерпретация результатов пенетрационного каротажа. Для оценки модуля деформации грунтов используется зависимость вида

$$E = \alpha R, \quad (12.1)$$

где α — коэффициент, зависящий от вида пород. Для наконечника СПК-Т значения α следует принимать: для песков — 3; супесей — 3,6; суглинков — 5,5; глин — 7,0.

Для определения вида пород по данным СПК-Т могут быть использованы зависимости, представленные ниже.

Породы	T/R	ГК, 10^{-14} А/кг
Пески	0,008—0,021	<32,4
Супесь	0,021—0,035	32,4—50,4
Суглинки	0,035—0,045	50,4—79,2
Глины	0,045—0,20	>79,2

Что касается интерпретации результатов ГГК, ННК и ГК, то после соответствующей градуировки они позволяют получать значения плотности ρ , объемной влажности $W_{об}$, а по ГК оценивается и вид пород. Погрешность первых двух методов равна соответственно $\Delta\rho = \pm 0,03$ т/м³, $\Delta W_{об} = \pm 0,02$ (при $W_{об} < 0,3$) и $+0,05$ (при $W_{об} > 0,3$).

По полученным с помощью пенетрационного каротажа данным можно определить целый ряд расчетных показателей, в частности, $\rho_a = \rho - W_{об}$ при известной влажности $W = W_{об}/(\rho - W_{об})$. В случае, когда известна плотность твердой части пород, можно, используя данные пенетрационного каротажа, определять пористость n , коэффициент пористости e , коэффициент водонасыщения K_w и полную влагоемкость W_0 :

$$\text{выше УГВ } n = 1 - \frac{(\rho - W_{об})}{\rho_S}; \quad K_w = \frac{W_{об}\rho_S}{1(\rho_S - \rho + W_{об})}; \quad (12.2)$$

$$e = \frac{\rho_S - \rho + W_{об}}{\rho - W_{об}}; \quad W = \frac{1}{\rho - W_{об}} - \frac{1}{\rho_S}; \quad (12.3)$$

$$\text{ниже УГВ} \quad n = W_{об}; \quad (12.4)$$

$$e = \frac{W_{об}}{1 - W_{об}}. \quad (12.5)$$

Комбинированный способ интерпретации результатов пенетрационного каротажа предполагает совместное использование всех приемов интерпретации. Он основан прежде всего на том, что практически все свойства пород зависят от их состава и состояния, т. е. вида породы, пористости и влажности. Вид породы может быть определен по показателям I_p и T/R , а пористость — расчетным путем.

Определив по результатам ПК вид породы и коэффициент пористости по таблицам СНиП II-15—74, можно оценить механические характеристики пород E , c , φ .

Просадочность лёссовых пород можно определить по ряду критериев, к которым относятся объемная масса, пористость, естественная влажность и степень водонасыщения. Используя результаты пенетрационного каротажа и эти зависимости, можно получить прогноз просадочности пород на исследуемой территории.

Данные такого каротажа позволяют оценить водопроницаемость исследуемых пород.

Одной из характеристик водопроницаемости горных пород служит коэффициент фильтрации k_{ϕ} . Его можно оценить непосредственно опытным путем или по показателям, характеризующим состав и состояние породы. Последние определяются с помощью пенетрационного каротажа с достаточной точностью. Методы оценки k_{ϕ} по показателям состава и состояния делятся на несколько групп. К одной из них относятся методы, базирующиеся на оценке k_{ϕ} исходя из петрографического вида породы (табл. 15 и 16). Из приведенных в таблицах данных

Таблица 15

Значения k_{ϕ} в зависимости от вида пород

Порода	k_{ϕ} , м/сут	
	по В. Д. Ломгадзе	по Н. Н. Маслову, М. Ф. Котову
Гравий, галька с песчаным заполнителем	100—30	≥ 50
Песок:		
крупный	50—30	50
средней крупности	30—10	50
мелкий	10—2	5
глинистый (тонкозернистый)	2—0,1	—
Супесь	2—0,1	0,5
Суглинок	0,1—0,001	$5 \cdot 10^{-3}$
Глина	0,001	10^{-5}

Таблица 16

Зависимость k_{ϕ} от T/R

Порода	T/R	k_{ϕ} , м/сут
Песок	0,008—0,021	50—5
Супесь	0,021—0,035	2—0,1
Суглинок	0,035—0,045	0,1—0,001
Глина	0,045—0,200	$< 0,001$

следует, что крайние значения k_{ϕ} для отдельных типов пород, определенные различными авторами, сопоставимы. В то же время градация k_{ϕ} в зависимости от пористости пород отсутствует, хотя во всех эмпирических формулах, используемых для определения k_{ϕ} по гранулометрическому составу, значение пористости фигурирует. В связи с этим можно предположить, что пористость пород входит в значения k_{ϕ} в скрытой форме. Разброс значений k_{ϕ} для каждой разновидности пород, очевидно, объясняется изменением значений пористости и генезиса пород. При условии четкого выделения по данным T/R и ГҚ видов пород можно приближенно, но с большой детальностью по разрезу оценить k_{ϕ} .

**МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ
ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ МАССИВОВ**

Глава 13

**МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
И ИХ МАССИВОВ**

13.1. ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Измерение природных напряжений в массиве пород

Для определения действующих в массиве горных пород напряжений применяются деформационные, геофизические и геологические методы, а также метод гидроразрыва [18].

Деформационные методы. К деформационным методам измерения напряжений относятся методы разгрузки и восстановления.

Методы разгрузки основаны на измерении упругих деформаций некоторого элемента массива пород при разгрузке от действовавших в нем напряжений и упругом восстановлении им первоначальной формы и размеров. По измеренным деформациям, зная модуль упругости и коэффициент поперечной деформации пород и используя математический аппарат теории упругости, вычисляют действующие напряжения. Теоретической базой метода служит теорема о разгрузке, согласно которой для любого сложного напряженного состояния зависимости между деформациями упругого восстановления при разгрузке и действовавшими в элементе среды напряжениями подчиняются теории упругости.

Методы разгрузки можно разделить на: 1) измерение торцевых деформаций; 2) измерение деформаций кольцевого цилиндра, образованного соосными скважинами; 3) измерение деформаций пород, вызванной проходкой скважины. Методы последней группы практически не применяются. В СССР наибольшее распространение получил метод, основанный на измерении торцевых деформаций в скважине. Для определения напряжений в скальных породах разработан и серийно выпускается унифицированный комплект измерительной аппаратуры и оборудования (например, УКР-72).

1. Метод измерения торцевых деформаций (ВНИМИ). Для проведения измерений из горной выработки в заданном направлении бурят скважину диаметром 76—80 мм. В выбранной точке массива бурение прекращают и коронкой специальной конструкции шлифуют забой скважины. С помощью прижимного и ориентирующего устройств к забою скважины прижимают в строго ориентированном положении и приклеивают розетку из трех или четырех электротензометрических датчиков

(рис. 37). Оптимальная база тензодатчиков для большинства пород составляет 15 мм. После полной полимеризации клея, обеспечивающей прочную связь тензометрической розетки с плоскостью забоя скважины и совместность деформаций пород на забое и тензодатчиков, кольцевой коронкой обуривают торец скважины. При этом обуриваемый элемент массива пород освобождается от действовавших в нем упругих напряжений и плоскость забоя скважины испытывает деформации, которые фиксируются тензодатчиками. Точность измерения относительной деформации $\pm 10^{-5}$. По формулам теории упругости, связывающим измеренные деформации и соответствующие им напряжения, определяются главные напряжения в плоскости

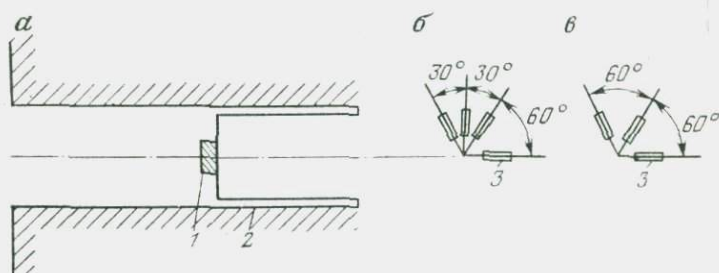


Рис. 37. Схема измерения торцевых деформаций:

a — разгрузочная скважина с наклеенной на заборе розеткой тензодатчиков; *б* — розетка из четырех тензометрических датчиков; *в* — то же, из трех тензометрических датчиков. 1 — розетка тензодатчиков; 2 — разгрузочная скважина; 3 — тензодатчик и 1—4 (нумерация по порядку против часовой стрелки)

торца скважины. Например, для вычисления напряжений в случае применения четырехдатчиковой розетки формулы имеют вид:

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{2} \left\{ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + \frac{4}{3} (\varepsilon_2 - \varepsilon_4)^2} \right\}, \quad (13.1)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{2} \left\{ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + \frac{4}{3} (\varepsilon_2 - \varepsilon_4)^2} \right\}, \quad (13.2)$$

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + \frac{4}{3} (\varepsilon_2 - \varepsilon_4)^2}, \quad (13.3)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2(\varepsilon_2 - \varepsilon_4)}{\sqrt{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}, \quad (13.4)$$

где σ_{\max} и σ_{\min} — соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения в плоскости торца измерительной скважины; τ_{\max} — наибольшее касательное напряжение в той же плоскости; θ — угол между направлением одного из главных напряжений и осью датчика с индексом 1 (см. рис. 37); $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ — относительные деформации по показаниям датчиков с индексами 1, 2, 3 и 4; E и μ — соответственно модуль упруго-

сти и коэффициент поперечной деформации породы, определяемые по керну, который получают при обуривании торца скважины в точке измерения. Установленные таким образом упругие константы породы являются наиболее надежными, так как в этом случае исключается погрешность, обусловленная их вариациями в различных точках массива.

В результате выполненных измерений определяются значения главных напряжений в плоскости забоя скважины только в одной точке массива. Для получения напряжений в других точках продолжают бурение скважины или бурят новые скважины и производят аналогичные измерения. Глубина скважины, в которой производится измерение напряжений, составляет несколько метров.

Для определения главных напряжений, действующих в массиве горных пород, необходимо, чтобы измерительные скважины были ориентированы в направлении этих напряжений. Выявление таких направлений в массиве пород производится на основании характера и расположения участков разрушения пород в подземных горных выработках, по направлению деления зерна буровых скважин на диски или путем определения напряжений ультразвуковым методом. При определении главных напряжений в массиве пород измерения методом разгрузки выполняют не менее чем в двух скважинах. Для контроля целесообразно провести измерения в третьей скважине, ориентированной по направлению третьего главного напряжения.

Напряженное состояние забоя скважины зависит от вида напряженного состояния массива, в котором пробурена скважина, величины коэффициента поперечной деформации пород, формы забоя скважины и других причин. Поэтому напряжения, вычисленные по измеренным деформациям пород торца скважины, отличаются от напряжений, действующих в массиве пород за пределами влияния скважины. Для того чтобы по полученным данным определить напряжения, которые действительно имеют место в массиве пород, применяются поправочные коэффициенты, величины которых, найденные различными авторами экспериментально, существенно отличаются. Например, в случае, когда измерительная скважина пробурена в направлении главного напряжения σ_z , связь напряжений в массиве с деформациями забоя скважины выражается следующим образом:

$$\epsilon_x = \frac{K_1}{E} (\sigma_x - \mu\sigma_y) - \frac{K_2}{E} \mu\sigma_z, \quad (13.5)$$

$$\epsilon_y = \frac{K_1}{E} (\sigma_y - \lambda\sigma_x) - \frac{K_2}{E} \mu\sigma_z, \quad (13.6)$$

где ϵ_x и ϵ_y — главные относительные деформации в плоскости забоя скважины; K_1 и K_2 — коэффициенты концентрации, рав-

ные для плоского забоя соответственно 1,4 и 1,15; E и μ — соответственно модуль упругости и коэффициент поперечной деформации породы; σ_x и σ_y — главные напряжения в плоскости забоя измерительной скважины. Аналогично связь напряжений в массиве с деформациями на забое может быть выражена при бурении скважин в направлении других главных напряжений.

Наилучшие результаты метод разгрузки дает при измерении напряжений в крепких нетрещиноватых породах. Для измерения напряжений в хрупких, трещиноватых или слабых горных породах (например, в каменном угле) с целью обеспечения целостности обуриваемого керна необходимо увеличивать размеры разгружаемого элемента или усовершенствовать конструкцию или способы крепления тензометров. В случае, когда в напряженных массивах пород при разгрузке наряду с мгновенными упругими деформациями проявляются деформации упругого последействия, вычисленные напряжения будут отличаться в большую сторону по сравнению с фактическими. При определении напряжений в таких породах с использованием формул теории упругости в результаты необходимо вводить поправки, учитывающие неупругие свойства пород, устанавливаемые по данным лабораторных испытаний.

2. Метод соосных скважин. Этот метод заключается в измерении деформаций скважины малого диаметра (обычно около 40 мм) при обуривании, а следовательно, и разгрузке ее соосной скважиной большего диаметра. Рекомендуются, чтобы соотношение диаметров соосных скважин было не менее 1:4, так как деформации разгрузки при бурении измерительной скважины будут незначительными по сравнению с деформациями образуемого при обуривании кольцевого цилиндра. По способу измерения деформаций скважины малого диаметра различают схемы Н. Хаста и Е. Лимана.

Для измерения напряжений в заданной точке массива пород из скважины бурится шпур, в которой по схеме Н. Хаста (рис. 38) устанавливается специальный датчик, позволяющий фиксировать изменение диаметра центральной скважины по различным направлениям. Обычно измерения проводятся тремя датчиками, расположенными под углом 60° . После установки датчика производится обуривание шпура соосной скважиной большого диаметра. Происходящие при этом деформации кольцевого цилиндра фиксируются установленными датчиками. Для перехода от измеренных деформаций к напряжениям используются данные лабораторной градуировки датчиков деформометра в специально вырезанных призмах породы с модулем упругости, равным модулю упругости исследуемого массива.

По схеме Е. Лимана на стенки центральной скважины малого диаметра с помощью специальных приспособлений наклеиваются тензодатчики. При расположении датчиков по схеме, приведенной на рис. 39, по измеренным деформациям, происходящим в результате обуривания шпура соосной сква-

жиной, напряжения σ_θ , σ_r и $\tau_{\theta r}$ вычисляются по формулам

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1), \quad (13.7)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} (\mu\varepsilon_2 + \varepsilon_1), \quad (13.8)$$

$$\tau_{\theta r} = G(\varepsilon_2 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_3), \quad (13.9)$$

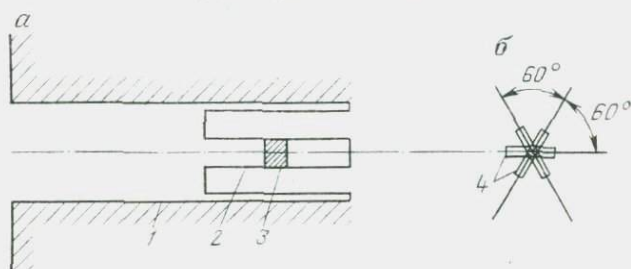


Рис. 38. Схема измерения деформаций кольцевого цилиндра (по Н. Хасту): а — расположение соосных измерительной и разгрузочной скважин (в измерительную скважину малого диаметра помещены деформометр); б — расположение магнитоэлектрических датчиков в деформометре. 1 — скважина разгрузочная; 2 — то же, измерительная; 3 — деформометр; 4 — магнитоэлектрические датчики

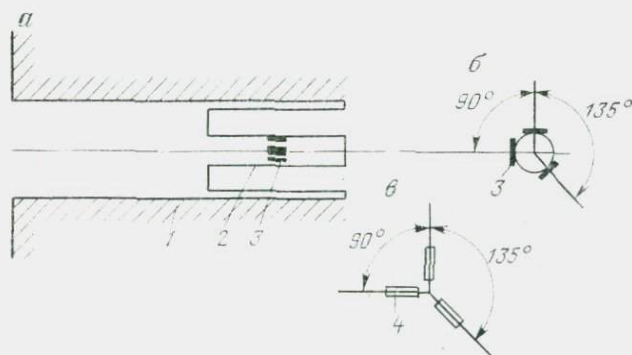


Рис. 39. Схема измерения деформаций кольцевого цилиндра (по Е. Лиману): а — расположение соосных измерительной и разгрузочной скважин (на стенки измерительной скважины малого диаметра наклеены три розетки тензодатчиков); б — размещение розеток тензодатчиков на стенках измерительной скважины; в — расположение тензодатчиков в розетке. 1 — скважина разгрузочная; 2 — то же, измерительная; 3 — розетка тензодатчиков; 4 — тензодатчики 1—3 (нумерация по часовой стрелке)

где E , G , μ — соответственно модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент поперечной деформации пород исследуемого массива; ε_1 , ε_2 и ε_3 — относительные деформации, измеренные датчиками с индексами 1, 2 и 3.

Метод соосных скважин применим для измерения напряжений в скальных и полускальных нетрещиноватых породах, причем исследуется больший массив пород, чем в методе измерения

торцевых деформаций. Однако он сложнее в технологическом отношении, так как получение керна большого диаметра сопряжено с существенными трудностями, обусловленными трещиноватостью пород, а бурение измерительной скважины вызывает деформации, которые невозможно учесть.

Методы восстановления заключаются в измерении давления, которое нужно создать в скважине или другой полости для того, чтобы компенсировать деформацию разгрузки, происшедшую при ее проходке. Для этого на поверхности массива до закладки в нем полости размещают индикаторы, которые при создании полости в результате деформации разгрузки показывают величины происходящих смещений. Затем в полость помещают устройство, позволяющее создать внутри нее давление, которое повышают до тех пор, пока индикаторы смещений не отметят полной компенсации деформации разгрузки и возвращения точек наблюдения в первоначальное положение. Величину этого давления принимают равной напряжению, действовавшему в массиве до разгрузки. При измерении напряжений методами восстановления нет необходимости определять упругие свойства пород.

В методах восстановления используются плоские гидравлические домкраты (гидроподушки) и прессиометры. Для измерения напряжений с помощью гидроподушки в массиве пород создается щель, перпендикулярная к направлению измеряемого напряжения, рис. 40. По обе стороны щели до ее вскрытия устанавливают индикаторы, фиксирующие смещения по поверхности при разработке щели. В щель помещают плоский гидравлический домкрат, соответствующий параметрам щели, с помощью которого возвращают массив в начальное напряженное состояние. Давление в домкрате, при котором индикаторы смещений покажут первоначальные отсчеты, принимают равным напряжению в массиве в направлении, перпендикулярном к плоскости щели.

Аналогичным образом напряжения измеряют с помощью прессиометров, которые помещают в скважины (рис. 41). Измерение деформаций стенок скважины производится специальными тензометрическими датчиками, устанавливаемыми внутри прессиометров. В этом случае напряжения определяются в плоскости, перпендикулярной к скважине.

Методы восстановления применимы для исследования напряженного состояния массива пород различной степени трещиноватости. С помощью гидроподушек и прессиометров кроме изучения напряженного состояния пород массива могут определяться деформационные и прочностные свойства пород.

Деформационные методы широко используются для изучения напряжений в верхних слоях земной коры, распределения напряжений вокруг горных выработок, напряженного состояния склонов на участках строительства крупных гидротехнических сооружений и т. д. Для изучения напряженного состояния не-

тронутого массива пород с помощью методов разгрузки и восстановления необходимо проводить измерения за пределами влияния горных выработок. Совершенствование методов измерения напряжений осуществляется путем повышения чувствительности датчиков, измеряющих относительные деформации, улучшения применяемого оборудования и теоретических разработок и экспериментальных исследований, позволяющих более обоснованно рассчитывать напряжения по замеренным деформациям.

Геофизические методы. Эти методы основаны на измерении в исследуемом массиве искусственно создаваемых фи-

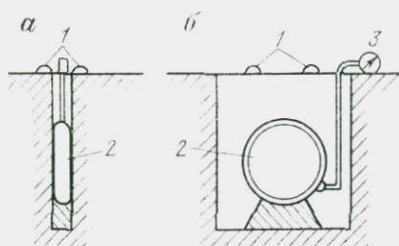


Рис. 40. Схема установки гидроподушки в щель, пройденную в массиве пород (вид сбоку — *а*, вид сверху — *б*):

1 — измерители деформаций; 2 — дисковый домкрат (гидроподушка); 3 — манометр

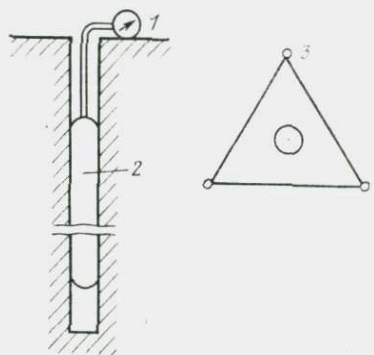


Рис. 41. Схема установки прессиометра в скважину:

1 — манометр; 2 — прессиометр; 3 — измеритель деформаций

зических полей и регистрации этих параметров, меняющихся в зависимости от напряженного состояния. Сюда относятся сейсмоакустические, радио- и электрометрические методы. Основы их применения для изучения напряженного состояния горных пород разработаны Ю. В. Резниченко, В. И. Мячкиным, О. И. Силаевой и др.

Наиболее совершенными в настоящее время являются сейсмоакустические методы. Развита теоретическая основа этих методов, отработана рациональная методика полевых исследований и получены практические результаты [37]. Физической основой применения сейсмоакустических методов для оценки напряженного состояния массивов горных пород являются теоретические и экспериментальные зависимости скоростей распространения упругих волн и характеристик их затухания от величины действующих напряжений. Используются две модификации метода, базирующиеся на исходных сейсмоакустических данных: корреляционный и сейсмический вариант метода разгрузки.

1. Корреляционный метод. Для оценки действующих в массиве напряжений необходимо иметь значения скоростей упругих волн в напряженном v_{σ} и разгруженном v_0 массиве, а также тарировочные зависимости скорости упругих волн от давления для данного типа пород. Сведения о значениях скоростей распространения упругих волн в напряженном массиве v_{σ} получают на основании полевых сейсмоакустических измерений: ультразвукового, акустического или сейсмического каротажа скважин, пробуренных в исследуемом массиве, сейсмического профилирования или просвечивания.

Для определения значений скоростей распространения упругих волн в разгруженной части массива v_0 наиболее часто используют два способа: изучение образцов и замеры скоростей в зоне ослабления вокруг выработки или скважины. Первый из указанных способов применим при длительном выдерживании образцов ($\sigma=0$) и допущении, что за это время в них произошла релаксация напряжений. Большую практическую значимость имеет второй способ, который базируется на теоретических и экспериментальных данных об изменении напряжений в окрестности горных выработок. В соответствии с этими данными по особенностям изменения скоростей продольных v_P и поперечных v_S волн с удалением от полости выработки достаточно уверенно выделяются зоны различных напряжений: разгрузки (1), концентрации напряжений (2) и естественных напряжений (3) (рис. 42) и определяются соответствующие им значения скоростей упругих волн. За величину v_0 принимается среднее значение скорости в зоне разгрузки, ослабленной проходкой выработки, а за величину v_{σ} — среднее значение скорости в неизменной части массива.

Исходные для определения значений v_0 и v_{σ} графики $v_P=f(h)$ и $v_S=f(h)$ в этом способе устанавливаются по данным ультразвукового или акустического каротажа скважин, пробуренных в стенках выработок (рис. 43), или на основании просвечивания целиков между скважинами.

Для количественной оценки напряжений помимо значений скоростей в напряженной и разгруженной частях массива необходимо иметь зависимость изменения скорости упругих волн от давления. Такая зависимость получается экспериментально в результате совместного определения скорости распространения упругих волн под давлением при лабораторных испытаниях на образцах и при натурных опытах в массиве на призмах.

При построении зависимости скорость — давление необходим набор образцов или призм с различными начальными значениями v_0 , т. е. набор разностей одной и той же породы с различной степенью трещиноватости.

По результатам опытов строятся графики $v=f(P)$ в координатных осях $\Delta v/v_0$, σ для серии образцов или призм с различными исходными значениями v_0 . Характер зависимости $v=f(\sigma)$ существенно зависит от типа и состава породы, а для пород оди-

накового состава — от степени их трещиноватости. Вследствие этого графики $v=f(\sigma)$ строятся отдельно для каждого из изучаемых типов пород. В пределах одного типа пород необходим набор образцов с различными значениями v_0 , начиная от минимальных, характеризующих интенсивно трещиноватую породу, до максимальных, свойственных наиболее сохранным разностям.

На рис. 44 приведены зависимости скорости распространения упругих волн от давления для пирротин-халькопиритовых руд

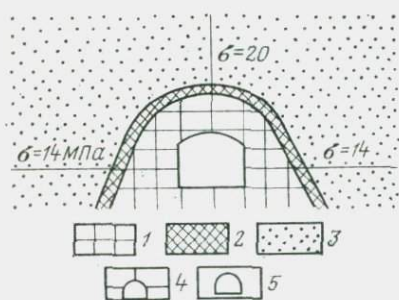
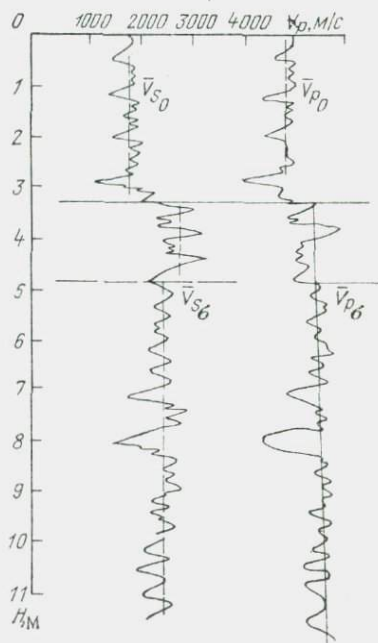


Рис. 42. Распределение скоростей в окрестностях горной выработки:

1 — зона пониженных скоростей (разгрузки); 2 — зона повышенных скоростей (концентрации напряжений); 3 — зона естественных скоростей (естественных напряжений); 4 — ориентировка скважин, в которых проводится ультразвуковой картаж; 5 — горная выработка

Рис. 43. Графики изменения скоростей упругих волн по данным УЗК:

\bar{v}_{S_0} , \bar{v}_{P_0} — средние значения скоростей в разгруженной части массива; \bar{v}_{S_6} , \bar{v}_{P_6} — то же, в зоне естественных напряжений



(рис. 44, а) и габбро-долеритов (рис. 44, б) одного из полиметаллических месторождений, полученные при испытаниях на образцах и призмах размером $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м.

Заключительный этап вычисления напряжений состоит в следующем. По экспериментальным данным определяются средние значения v_0 и v_{σ} , рассчитываются значения $\frac{\Delta v}{v_p} = \frac{v_{\sigma} - v_0}{v_0}$ и по соответствующим тарировочным кривым $\frac{\Delta v}{v_0} = f(\sigma)$ с учетом параметра v_0 или по формуле (13.10) (А. И. Савич, В. И. Коптев) определяются величины напряжений

$$\sigma = v_0^2 \rho \left[(\Delta v_0)^2 - 1 \right] S_0 A_{\sigma} \left\{ 1 + v_0^2 S_0 A_{\sigma} x \left[1 - (\Delta v_0)^2 \left(\frac{v_0}{v_{\max}} \right)^2 \right] \right\}^{-1}, \quad (13.10)$$

где ρ — плотность породы; $S = (v_s^2 \rho_3) / (v_0^2 \rho)$; A_{σ} — коэффици-

енты, учитывающие влияние на величину v_0 напряжений, действующих по другим направлениям; x — параметр, характеризующий зависимости v_3 от σ ; v_3 — скорость в заполнителе трещин; ρ_3 — плотность заполнителя; v_{\max} — максимальное значение скорости для данной монолитной породы.

Определение полного тензора напряжений достигается определенной ориентировкой исследуемых скважин в пространстве

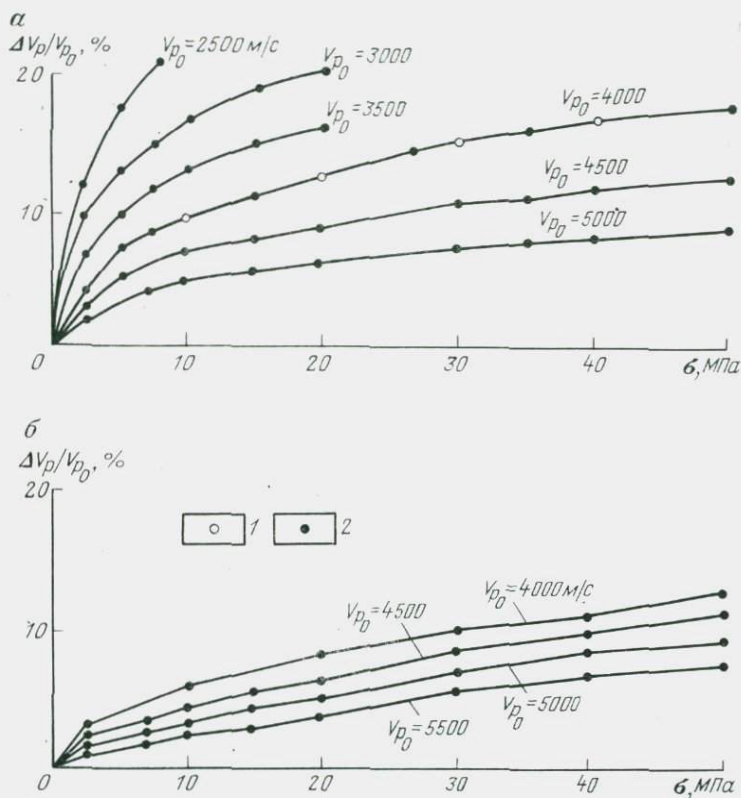


Рис. 44. Графики зависимости скоростей распространения продольных волн от давления:

a — пирротин-халькопиритовые руды; *б* — габбро-долериты. 1 — данные, полученные на образцах; 2 — то же, на натуральных призмах (цифрами на графиках даны начальные значения скоростей упругих волн в образцах и призмах)

и совместной интерпретацией результатов, полученных по разным направлениям.

Метод может быть применен к изучению различных по масштабу полей напряжений. Если значения скоростей определяются по результатам ультразвуковых наблюдений, то изучаются поля напряжений в небольших по объемам ($W=0,1-10$ м³) структурных блоках массива. При определении скоростей по сейсмическим данным характеризуется напряженное состояние

более крупных структурных элементов с объемом $W = 10^4 - 10^{10} \text{ м}^3$.

2. Сейсмический вариант метода разгрузки. В указанном способе создание каждой горной выработки рассматривается как своеобразный натуральный опыт по разгрузке массива: Определив возникающие при этом радиальные деформации и зная величины модуля упругости E_y и модуля деформации E_0 , можно оценить существующие в массиве напряжения, используя уравнения теории упругости.

Расчет напряжений производится по формуле

$$\sigma = \frac{E_{0\sigma} h_p}{(1 + \mu)(r_{\text{эф}} + h_p)} \left[1 + (1 + \mu) \frac{E_{0\sigma}}{E_{0p}} \ln \left(1 + \frac{h_p}{r_{\text{эф}}} \right) \right]^{-1}, \quad (13.11)$$

где $E_{0\sigma}$ и E_{0p} — модуль деформации соответственно нагруженной части массива, не измененной проходкой выработки, и зоны разгрузки; h_p — мощность разгруженной зоны; μ — коэффициент Пуассона в неизменной части массива; $r_{\text{эф}}$ — эффективный радиус выработки.

Все параметры уравнения (3.11) устанавливаются по результатам натурных сейсмоакустических исследований в окрестностях горной выработки.

К числу неоспоримых достоинств сейсмоакустических методов относятся: достаточная простота полевых экспериментальных исследований; возможность определения напряжений по исследованиям в глубоких скважинах, пробуренных с поверхности земли; оценка напряжений на разных масштабных уровнях и, наконец, наблюдения за изменчивостью поля напряжений во времени.

В последние годы для оценки напряжений с успехом применяется метод гидроразрыва. Экспериментальная часть методики во многом подобна гидравлическому возбуждению скважин, широко используемому при разработке нефтяных месторождений.

Сущность метода состоит в следующем. В заданном интервале буровой скважины (наиболее сохранном и лишенном естественных трещин), ограниченном разъемными тампонами, создают давление жидкости на стенки скважины вплоть до образования трещины. Этот момент фиксируется внезапным падением давления. Максимальное давление P_c называется давлением разрыва. Далее замеряется запирающее давление P_{si} , необходимое для того, чтобы держать вызванную трещину открытой.

С помощью последующих нагнетаний жидкости расширяют вызванную трещину и тем самым определяют прочностные характеристики среды. Ориентировка вызванной трещины в стенке скважины производится с помощью тампона-печати или теле-

визионных установок в скважине. Расчет величин напряжений основывается на следующих положениях: 1) одно из главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 направлено параллельно оси буровой скважины; 2) трещина при гидроразрыве возникает и распространяется в плоскости, перпендикулярной к направлению минимального главного напряжения; 3) массив на участке проведения опыта линейно-упругий и водонепроницаемый; 4) разрывающее давление компенсирует первичное касательное напряжение в точке образования трещины и равно ему; 5) давление для раскрытия вызванной трещины соответствует главному напряжению, действующему нормально к плоскости трещины. Тогда для случая вертикальной скважины при образовании вертикальных гидроразрывов главные компоненты напряжений могут быть определены по следующим формулам:

$$\sigma_1 = \rho H; \quad (13.12)$$

$$\sigma_2 = P_{si}; \quad (13.13)$$

$$P_c = 3\sigma_2 - \sigma_3 + R_l - P_0, \quad (13.14)$$

где ρ — плотность породы; H — глубина залегания слоя; R_l — прочность на разрыв; P_0 — поровое давление.

Итак, для определения величины естественного напряжения (в данном случае σ_3) необходимо измерить P_c и P_{si} при гидроразрыве, вычислить P_0 и σ_1 и определить R_l при гидравлическом трещинообразовании по результатам лабораторных измерений или повторных натуральных испытаний в скважине. Преимуществом данного метода перед деформационными методами является возможность его использования в глубоких разведочных скважинах, пробуренных с поверхности земли при отсутствии горных выработок.

Геологические методы. Рациональный комплекс методов оценки естественных напряжений не будет достаточно полным, если в нем не используются менее точные, косвенные геологические методы. Их применяют для выявления закономерностей распределения напряжений, связанных с развитием структуры отдельных участков земной коры. Наиболее разработанным является метод восстановления ориентировки осей напряжений по трещинам, предложенный М. В. Гзовским [12]. Сущность его состоит в следующем. В поле на обнажениях горных пород собираются статистические данные о средней ориентировке трещин скальвания и отрыва, так как они определенным образом расположены относительно главных напряжений. Замеренные трещины наносятся на стереографическую сетку, где определяются плоскости, соответствующие среднему положению каждой из двух сопряженных систем трещин скальвания и отрыва (рис. 45). Линия пересечения сопряженных трещин скальвания является осью промежуточных главных напряжений σ_2 , биссектриса тупого угла — осью

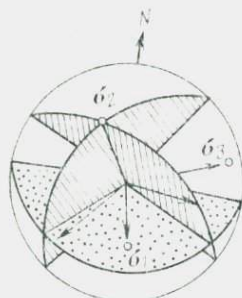
максимальных напряжений σ_1 , перпендикулярной к трещинам отрыва; биссектриса острого угла между сопряженными трещинами скалывания представляет собой ось алгебраически минимальных главных нормальных напряжений σ_3 . Наименование осей контролируется направлениями смещения по трещинам. Таким образом, восстанавливается ориентировка напряжений, действовавших во время возникновения трещин.

Существует целый ряд косвенных методов оценки напряжений массивов горных пород, основанных на наблюдениях за дискообразованием керна при бурении и расщеплением керна, извлеченного из скважин, а также свободной разгрузкой образцов при снятии естественных напряжений и т. д.

Установлено, что при высоком уровне напряжений в массиве наблюдается дискообразование (дискование) — расщепление керна на диски при бурении скважин. Это явление дает возможность приблизительно оценить величину напряжений по формуле, предложенной Г. А. Марковым,

$$\sigma = R_c / K, \quad (13.15)$$

Рис. 45. Восстановление ориентировки осей напряжений по трещинам (по М. В. Гзовскому)



где R_c — прочность горной породы на сжатие; K — коэффициент, определяющий связь между пределом прочности породы в образце и напряжением в массиве.

Значение K устанавливается в зависимости от проявления масштабного эффекта и составляет, по данным Г. А. Маркова, 2—4. Наблюдения за дискообразованием керна в различно ориентированных скважинах позволяют определить направление действия наибольшего напряжения в массиве.

Измерение напряжений в массиве от сооружений и на границе грунт-сооружение

В практике инженерно-геологических работ часто необходимо знать не только природные напряжения в массивах грунтов, но и дополнительные напряжения, возникающие под влиянием возведенных или возводимых инженерных сооружений, а также напряжения на границе сооружений и грунта. Чаще всего это требуется при строительстве туннелей, подпорных стенок, дамб и насыпей.

Применяемое оборудование. Для измерений напряжений в массиве грунтов от сооружений и на границе грунт — сооружение используются специальные диафрагменные датчики. По принципу измерения напряжений датчики могут быть пневматическими, гидравлическими, струнными и тензометрическими.

Основной измерительной частью всех типов датчиков является полый резиновый диск, сжимаемый с плоских сторон. Внутренняя полость диска наполняется газом, водой или какой-либо другой жидкостью (рис. 46—48). У пневматических, гидравлических и струнных датчиков диск соединяется с диафрагменной камерой, которая в свою очередь с помощью соединительных трубок связана с наземной измерительной системой. У пневматических датчиков вся измерительная часть заполнена газом (см. рис. 47), а у гидравлических — жидкостью. У струнных датчиков к диафрагме припаяна тонкая натянутая струна, соединенная кабелем с частотомером (см. рис. 48).

Под влиянием внешнего давления газ или жидкость отжимаются из внутренней полости резинового диска, что приводит к деформированию гибкой диафрагмы. Давление, воспринимаемое диафрагмой, регистрируется газовым или гидравлическим манометрами (пневматические и гидравлические датчики) или по изменению частоты колебаний натянутой струны (струнные датчики).

У тензометрических датчиков измерение осуществляется с помощью нескольких пар тензометров, наклеенных во внутренней полости резиновых дисков (см. рис. 48). По показаниям тензометров, регистрируемым с помощью электрических потенциометров, определяются деформация чувствительной части датчика и величина напряжения.

Каждый из рассмотренных типов датчиков имеет преимущества и недостатки. Так, например, тензометрические датчики просты в употреблении, имеют линейную зависимость между напряжением и деформацией, но ненадежны при длительных натурных наблюдениях из-за механических повреждений и действия влаги. Струнные датчики, наоборот, надежны при долгосрочных измерениях, но имеют нелинейную зависимость напряжения — деформация и обладают высокой инерционностью, что делает их непригодными для измерений динамических нагрузок. Гидравлические и пневматические датчики можно применять как для статических, так и динамических измерений, однако они сложны в эксплуатации и имеют нелинейную зависимость напряжения — деформация.

Тарировка датчиков. Перед установкой датчиков в грунт необходима их тарировка, т. е. получение зависимости между внешним давлением на датчик и его показаниями. Поскольку деформирование датчика отличается от деформирования грунтов, В. Веллер и Ф. Кулхейви в 1979 г. предложили методику тарировки, учитывающую эту особенность приборов. Для тарировки используется грунт, в котором предполагается измерение напряжений. Тарировка проводится в крупногабаритных стабиллометрах или одометрах в условиях изотропного или одноосного сжатия. Задается необходимое давление на грунт и регистрируются показания датчика; полученные данные в дальнейшем корректируются путем деления их на поправоч-

Рис. 46. Схема пневматического датчика измерений напряжений:

1 — полый резиновый диск датчика; 2 — соединительные трубки; 3 — мембрана; 4 — кран; 5 — газовый манометр; 6 — измеритель объема

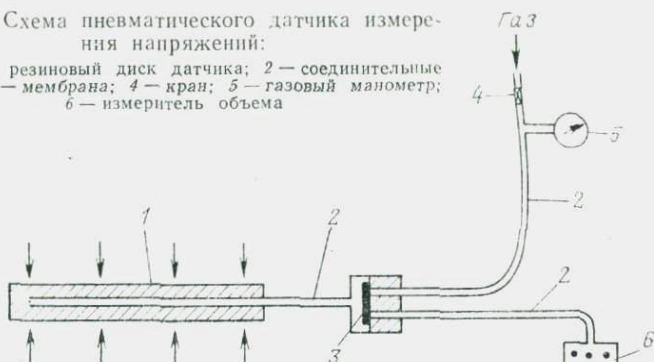


Рис. 47. Схема струнного датчика измерений напряжений:

1 — полый резиновый диск датчика; 2 — соединительная трубка; 3 — мембрана; 4 — натянутая струна; 5 — кабель; 6 — измеритель частоты

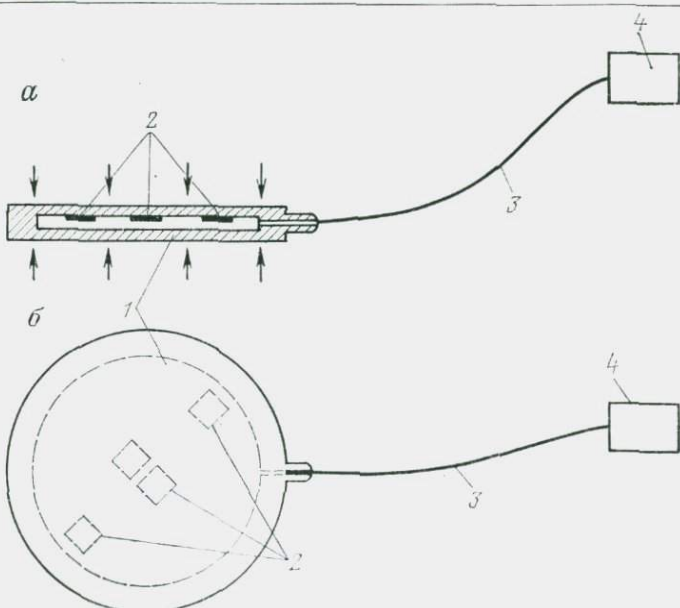
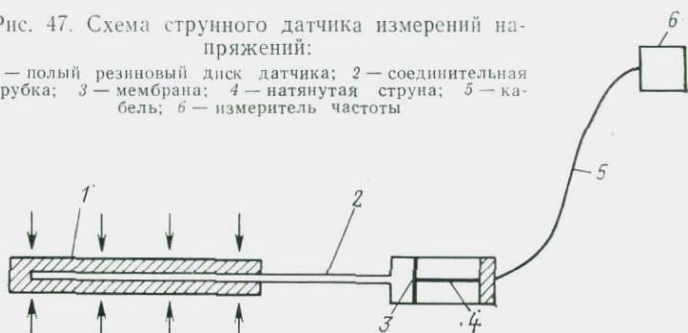


Рис. 48. Схема тензометрического датчика измерений напряжений:

а — вид сбоку; б — вид в плане. 1 — корпус чувствительной части датчика; 2 — тензодатчики; 3 — кабель; 4 — потенциометр

ный коэффициент. Для определения последнего производится повторная тарировка датчика, но не в грунте, а в любой жидкости. Отношение показаний датчика в грунте к его показаниям в жидкости при одинаковых внешних напряжениях дает значение поправочного коэффициента.

При тарировке и проведении натуральных наблюдений необходимо соблюдать определенные правила установки датчиков.

Установка датчиков в теле дамб и насыпей. В теле дамб и насыпей датчики устанавливают по одному или группами (по четыре-пять штук). В первом случае напряжения измеряют в каком-то одном направлении, а во втором — возможна регистрация всесторонних напряжений. При установке датчики располагают таким образом, чтобы плоская сторона резинового диска была перпендикулярна к направлению действующих напряжений. Размещение датчиков проводится в процессе отсыпки земляного сооружения непосредственно на отсыпанной поверхности после ее уплотнения и выравнивания. При работе с глинистыми грунтами датчики размещают в небольших цилиндрических выемках, в точности соответствующих высоте и диаметру резинового диска прибора. При установке датчиков в теле сооружений, возводимых из крупнообломочного материала, готовится специальная выемка, в три-пять раз превосходящая по своим размерам диаметр резинового диска датчика. Выемка на $\frac{1}{3}$ заполняется песком, после чего устанавливают датчик и засыпают выемку.

Для исключения взаимного влияния при установке датчиков необходимо, чтобы расстояние между ними по горизонтали было не менее 1,5, а по вертикали — 4 их диаметров.

Установка датчиков на границе грунт — сооружение. При измерении напряжений на этой границе датчики заранее монтируются в бетонный блок, который в дальнейшем укладывается в ту часть сооружения, где предполагается измерение напряжений на границе с грунтом. В уже построенных сооружениях датчики монтируют в небольшой цементной подушке, которая наращивается на поверхности бетонной конструкции сооружения в том месте, где необходимо провести натурные измерения. В обоих случаях важно, чтобы чувствительная часть датчика (плоская поверхность его резинового диска) находилась на поверхности границы раздела грунт — сооружение.

Влияние различных факторов на точность измерений. Точность измерений напряжений в массиве грунта и на границе грунт — сооружение зависит от ряда факторов, среди которых наиболее важными являются: геометрические размеры и деформируемость чувствительной части датчика (резинового диска), деформируемость грунта и условия установки датчика в нем.

Геометрические размеры чувствительной части датчика определяются его диаметром и толщиной. При увеличении

толщины датчика на его показаниях сказывается не только нормальное, но и боковое давление грунта. Для исключения влияния последнего необходимо, чтобы диаметр чувствительной части датчика (обычно изменяющийся от нескольких сантиметров до 20 см) превосходил его высоту не менее чем в пять раз.

Точность измерений во многом зависит от деформируемости (жесткости) чувствительной части датчика. Необходимо, чтобы деформация датчика в теле грунтового сооружения по своей величине была примерно такой же, как и деформация самого грунта. Иначе при уплотнении грунта над датчиком и по его краям будет происходить концентрация напряжений, что приведет к искажению результатов измерений.

Среди факторов, влияющих на точность измерений напряжений в грунте, наибольшее значение имеет нелинейность зависимости модуля деформации грунта от внешней нагрузки: с увеличением напряжений у многих грунтов изменяется значение модуля деформации. Поэтому в ходе уплотнения изменяется соотношение между деформируемостью грунта и чувствительной части датчика, что приводит к погрешностям, связанным с перераспределением напряжений вокруг датчика.

Часто погрешности измерений могут быть связаны с неправильной установкой датчиков. Установка должна проводиться с минимальным нарушением состояния грунта — его плотности, влажности, однородности и т. д. Наибольшие трудности встречаются при измерениях в крупнообломочных грунтах, где датчики помещаются в специальные выемки, засыпаемые песком или песчано-глинистым материалом. Переуплотнение или, наоборот, недоуплотнение грунта засыпки приводит к заметному искажению результатов измерений.

При определении напряжений необходимо учитывать влияние всех перечисленных факторов. Игнорирование или недоучет их может привести к существенным погрешностям измерений, а в ряде случаев и к получению нереальных результатов. При строгом соблюдении всех методических требований натурные измерения становятся эффективными и позволяют определять напряжения в теле насыпей и дамб с точностью от ± 10 до ± 20 %, а на границе грунт — сооружение — от ± 5 до ± 10 %.

13.2. ИЗУЧЕНИЕ УПЛОТНЕННОСТИ И УВЛАЖНЕННОСТИ

Важнейшими показателями состояния пород в массиве являются плотность и влажность.

Уплотненность породы определяется отношением естественной плотности к возможным предельным ее состояниям (предельно плотному и рыхлому), а увлажненность — влажностью породы в естественном состоянии и дефицитом ее для данной породы и плотности. Существуют различные способы получения показателей плотности и влажности пород в естественном состоянии.

Традиционными являются методы отбора пробы с ненарушенной структурой из скважин, шурфов или других выработок с дальнейшим определением показателей плотности и влажности пород в лабораторных или полевых условиях.

В полевых условиях для оценки плотности пород используется метод режущего кольца (ГОСТ 5182—78). Однако его только условно можно считать полевым, так как для определения плотности породы в конечном итоге необходимо отделить образец породы от массива, взвесить его и установить объем. Кроме того, в большинстве случаев этот способ оценки плотности практически пригоден только для исследования пород зоны аэрации.

Ниже уровня грунтовых вод отбор проб пород с ненарушенной структурой из скважин становится затруднительным, поэтому в последнее время применяются другие методы, позволяющие определять показатели плотности и влажности пород непосредственно в массиве. Прежде всего нужно назвать методы радиоизотопного определения плотности (ГОСТ 23061—78) и нейтронный метод измерения влажности (ГОСТ 24181—80). Последний был подробно описан в разд. 7.2, поэтому ниже будет дано описание только методов определения плотности. Кроме того, для этих целей (в основном для качественной оценки) довольно часто применяются динамическое и статическое зондирование (СНиП ИБ—15) и стереофотограмметрические методы.

Как известно, значения объемной массы несвязных пород в естественных условиях могут колебаться в значительных пределах. Для общей оценки уплотненности песков по плотности их сложения чаще всего используется формула

$$D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}. \quad (13.16)$$

Коэффициент пористости песков в естественном состоянии e определяется по образцам песков с ненарушенной структурой (как правило, выше уровня грунтовых вод). Коэффициенты пористости песков в рыхлом e_{\max} и плотном e_{\min} состояниях рассчитываются по результатам лабораторных определений их плотности в максимально плотном и максимально рыхлом сложении (определяются по образцам нарушенной структуры).

Ниже (табл. 17) приведено разделение песков на виды в зависимости от величины коэффициента пористости (СНиП И-15—74).

Для определения уплотненности песков, находящихся ниже уровня грунтовых вод (в том числе и донных отложений шельфа), используются радиоактивные методы (ГГК и ННК), пенетрационный каротаж, динамическое или статическое зондирование. Ниже (табл. 18) приведена классификация уплотненности песков по данным зондирования (СНиП И-15—74).

В том случае, когда используется пенетрационный каротаж, получают наиболее представительные данные по оценке уплотненности песков, так как одновременно с удельным сопротивлением определяются значения плотности и влажности в естественном состоянии, по которым определяется коэффициент пористости.

Таблица 17

Пески	Сложение песков		
	плотное	среднее	рыхлое
Гравелистые, крупные и средние	$e < 0,55$	$0,55 \leq e \leq 0,7$	$e > 0,7$
Мелкие	$e < 0,6$	$0,6 \leq e \leq 0,75$	$e > 0,75$
Пылеватые	$e < 0,6$	$0,6 \leq e \leq 0,8$	$e > 0,8$

По В. А. Приклонскому, степень уплотненности глинистых пород в зависимости от их коэффициентов пористости в естественном залегании и коэффициентов пористости для нижнего и верхнего пределов пластичности определяется по формуле

$$K_d = \frac{e_T - e}{e_T - e_p}, \quad (13.17)$$

где e_T — коэффициент пористости породы при переходе ее из пластичного состояния в текучее ($e_T = W_{Tp}$); e — то же, в естест-

Таблица 18

Пески	Плотность сложения песков		
	плотные	средней плотности	рыхлые

А. По сопротивлению погружению конуса q_c (в МПа) при статическом зондировании

Крупные и средней крупности *	$q_c > 15,0$	$15,0 \geq q_c \geq 5,0$	$q_c < 5,0$
Мелкие *	$q_c > 12,0$	$12,0 \geq q_c \geq 4,0$	$q_c < 4,0$
Пылеватые:			
маловлажные и влажные	$q_c > 10,0$	$10,0 \geq q_c \geq 3,0$	$q_c < 3,0$
водонасыщенные	$q_c > 7,0$	$7,0 \geq q_c \geq 2,0$	$q_c < 2,0$

Б. По условному динамическому сопротивлению погружению конуса q_d (в МПа) при динамическом зондировании

Крупные и средней крупности *	$q_d > 12,5$	$12,5 \geq q_d \geq 3,5$	$q_d < 3,5$
Мелкие:			
маловлажные и влажные	$q_d > 11,0$	$11,0 \geq q_d \geq 3,0$	$q_d < 3,0$
водонасыщенные	$q_d > 8,5$	$8,5 \geq q_d \geq 2,0$	$q_d < 2,0$
Пылеватые маловлажные и влажные	$q_d > 8,5$	$8,5 \geq q_d \geq 2,0$	$q_d < 2,0$

* Данные не зависят от влажности породы.

венном залегании; e_p — то же, при переходе породы из пластичного состояния в полутвердое ($e = W_p \rho$);

В зависимости от величины K_d принята классификация глинистых пород, приведенная в табл. 19.

Таблица 19

Значения K_d при различных состояниях пород

Коэффициенты пористости породы	Показатель степени уплотненности породы	Состояние породы
$e > e_T$ $e = e_T$	$K_d < 0$ $K_d = 0$	Недоуплотненное Начальная степень уплотненности
$e_p < e < e_T$ $e = e_p$ $e < e_p$	$0 < K_d < 1$ $K_d = 1$ $K_d > 1$	Пластичное Переход в полутвердое Переуплотненное

Метод рассеянного гамма-излучения (ГГК)

Физической основой метода является функциональная зависимость эффекта рассеяния γ -квантов от плотности исследуемой среды. Существуют различные схемы, используемые в гамма-плотномерах. Ниже для иллюстрации возможностей данного метода приводятся различные схемы измерений, по Б. П. Осмачкину (рис. 49—52).

Сущность гамма-методов заключается в количественном определении плотности пород по измеренной скорости счета ослабленного или рассеянного в них излучения радиоактивных источников. При этом появляется возможность определения плотности и динамики водонасыщения породы в различных объемах и положениях испытуемых объектов по отношению к дневной поверхности.

Схема измерения плотности по методу регистрации рассеянного излучения в основном строится в двух вариантах — поверхностном и скважинном. В том и другом случае структурная схема остается общей. Она включает источник радиоактивного излучения (чаще всего используются источники ^{60}Co или ^{137}Cs), детектор излучения (сцинтилляционный кристалл NaI (Tl) с фотоэлектронным умножителем или газоразрядные счетчики типа СТС). С целью максимального снижения влияния прямого излучения между источником и детектором рассеянного излучения устанавливается свинцовый экран. Расстояние между источником и детектором, называемое базой, выбирается в зависимости от требуемых глубинности и чувствительности. В скважинных плотномерах с центральным расположением зонда излучение источника равномерно направлено в окружающую породу. В прижимных и поверхностных плотномерах излучение направлено с помощью коллиматоров в полупространство.

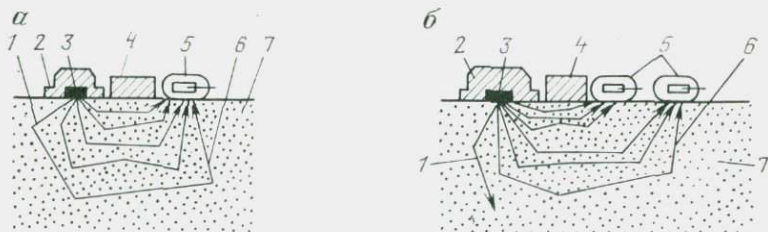


Рис. 49. Схема рассеяния излучения в полубесконечном пространстве при измерении плотности с одним детектором (а) и с двумя детекторами (б): 1 — первичный поток излучения; 2 — защитный контейнер; 3 — источник; 4 — разделительный экран; 5 — детекторы; 6 — рассеянное излучение; 7 — исследуемый материал

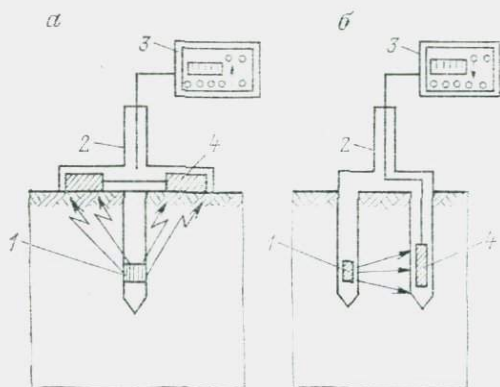


Рис. 50. Схемы измерений плотности по методу ослабленного первичного гамма-излучения:

а — одинарная схема; б — двойная фиксированная схема. 1 — источник излучения; 2 — преобразователь; 3 — измерительный прибор; 4 — детектор

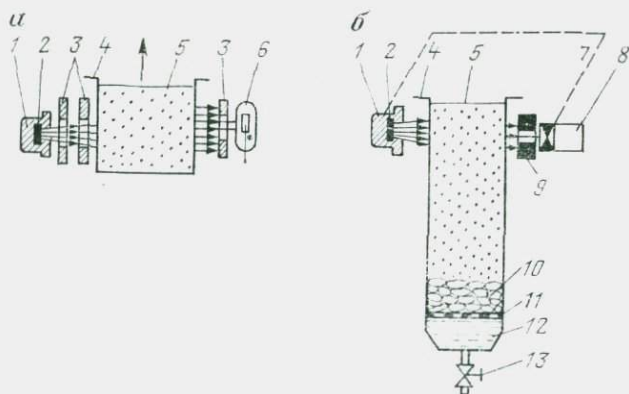


Рис. 51. Ослабление гамма-излучения в геометрии узкого пучка: 1

а — бесконтактное взвешивание; б — кинетика водоотдачи материала. 1 — защитный контейнер; 2 — источник; 3 — коллимирующие устройства; 4 — основная емкость; 5 — исследуемый материал; 6 — детектор; 7 — синхронная механическая связь; 8 — ФЭУ; 9 — сцинтиллятор; 10 — дренажирующий слой; 11 — решетка; 12 — буферная емкость; 13 — вентиль. Стрелка указывает направление перемещения материала

Все плотномеры по условиям их применения можно разделить на: 1) поверхностные, не требующие устройства специальных выработок (волокуши, вилки, штыревые плотномеры); 2) глубинные, требующие оборудования специальных скважин, к которым предъявляются определенные требования как по диаметру обсадных труб, так и по способу их проходки. Причем при проведении испытаний следует применять трубы с параметрами, не отличающимися от принятых при градуировке и поверке радиоизотопных плотномеров.

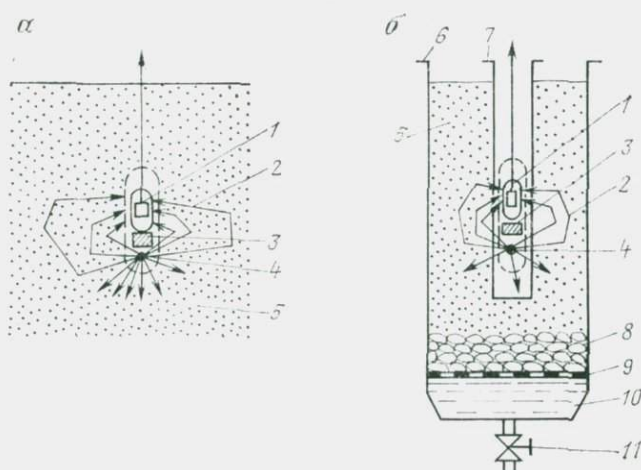


Рис. 52. Схема рассеяния излучения в бесконечной геометрии:

a — плотность и объемная влажность; *b* — кинетика водоотдачи. 1 — детектор; 2 — рассеянное излучение; 3 — разделительный экран; 4 — источник излучения; 5 — исследуемый материал; 6 — емкость; 7 — обсадная труба; 8 — дренажный слой; 9 — решетка; 10 — буферная емкость; 11 — вентиль

В настоящее время разработано и изготавливается мелкими или опытными сериями довольно много модификаций плотномеров (поверхностные СГПП, ПГМ-2М, ППП, Технолог-К; скважинные гамма-плотномеры: РИП-202, УГПП-1, РППП-1, ППГР-1, ГПП-1, РПП-60 и др.). Диапазон измерений плотномеров колеблется в пределах от 0,8 — до 4,0 г/см³, абсолютная погрешность 0,04—0,12 г/см³, длительность измерений от 600 до 2 с. Увлажненность породы определяется коэффициентом водонасыщения, который в свою очередь определяется по влажности и пористости.

Стереофотограмметрический метод

Стереофотограмметрические наземные съемки массивов пород через необходимые интервалы времени с одних и тех же закрепленных базисов и при одинаковом положении фотокамеры обеспечивают получение косвенных, а иногда и прямых данных о динамике и масштабах изменения состояний массивов и свойств пород. В наибольшей мере это относится к массивам,

сложенным глинистыми и метаморфическими породами, которые особенно быстро изменяются в новых для них термодинамических условиях.

Прежде всего эти методы можно использовать для оценки разуплотнения или, наоборот, уплотнения пород соответственно в массиве и отсыпке. Они необходимы, например, при изучении выпора в котловане из-за изменения напряженного состояния пород при его выемке, а также в случаях их набухания или усадки. С этой целью разновременные снимки, полученные с постоянных точек фотографирования при одинаковом положении фотокамеры, составляют для совместного стереоскопического наблюдения в определенных сочетаниях, при которых получают несколько новых видов стереоскопических моделей, дающих зрительное ощущение пространственных изменений и движения [39]. Количественные характеристики изменений получают путем построения и последующего сравнения числовых или картографических моделей, а также при анализе стереомodelей новых видов.

Типы стереомodelей приведены в табл. 20. На стереомodelи типа A_1A_2 или B_1B_2 , для которой снимки A_1 (с левой точки базиса) и B_1 (с правой) получены при первой съемке, а A_2 и B_2 — при повторной, неизменные объекты воспринимаются плоскими, а переместившиеся — объемно. Этим способом определяют участки массива, претерпевшие изменения, т. е. получают качественную характеристику.

Для получения стереомodelи нового типа ($A_1A_2—B_1$ или B_2) на одну из кареток стереоприбора устанавливают сразу два снимка, наложенных друг на друга и совмещенных по координатным меткам или неизменным контурам, а на другую — снимок с той или другой стереопары. При этом достаточно независимо воспринимаются две стереомodelи — обычная и суммарная, что позволяет определять участки, претерпевшие изменения. Метод незаменим, когда на снимках мало стабильных точек, например при выпоре дна котлована.


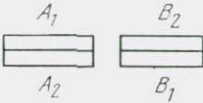
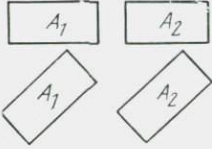

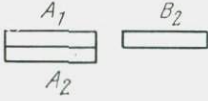
Если установить по два снимка на обеих каретках стереоприбора (вторая новая модель $A_1A_2—B_1B_2$), то наблюдатель увидит две топографические поверхности и непосредственно определит различия в их положении, форме и структуре.

Дешифрирование новых видов стереомodelей позволяет выявить стабильные, подвижные и изменяющиеся участки, определить типы, характер и интенсивность изменений. Измерительная обработка снимков приводит к детальному геометрическому описанию поля деформации и других пространственных изменений без предварительного маркирования точек. С целью совершенствования измерительной обработки разновременных стереосъемок в лаборатории аэрокосмических методов МГУ разработан новый стереокомпаратор, снабженный двумя парами кареток и оптическим приспособлением для передачи изображения обеих стереопар в одно поле зрения.

Уплотнение глинистых или глыбово-щебнистых масс, например, при возведении каменнонабросных плотин можно определить с помощью стереометодов, а также по изменению пространственного положения замаркированных точек и линий. Приблизительно величина этого показателя устанавливается по сближению и деформациям характерных естественных границ.

Таблица 20

Типичные сочетания одновременных снимков для стереонаблюдения
(по Ю. Ф. Книжникову, Ф. В. Никулину)

Варианты сочетания снимков	Схема установки снимков в стереоприборе	Стереозффект
$A_1 B_1$		Объемное восприятие объекта (обычная стереоскопическая модель)
$A_1 A_2 B_2 A_1$		Одновременное объемное восприятие объекта в двух состояниях (совмещенная стереомодель, включающая обычные одновременные модели)
$A_1 A_2$		Объемное восприятие перемещения объекта (стереоскопическая модель смещения)
$A_1 B_2$		Объемное восприятие объекта, деформированное из-за перемещения его точек (суммарная стереоскопическая модель)
$A_1 A_2 B_2$		Совместное объемное восприятие объекта и его перемещения (совмещенная стереомодель, включающая обычную и суммарную модель)

Увлажнение приповерхностной части массивов, сложенных глинами, суглинками и супесями, фиксируется при повторных стереосъемках по изменению фототона изображений. Это может представить интерес при изучении распространения увлажнения от некоторых центров или линий (трещин, контактов,

узлов разрывов и т. п.). При этом устанавливается, с какой скоростью смещается контур увлажнения, и приближенно путем фотометрирования изображений и тарировки определяется степень увлажнения в его пределах. Последнее может потребоваться при необходимости массовых определений быстро изменяющегося состояния крупного массива, например его откосов в котловане.

Разуплотнение массивов дисперсных пород при подрезках, а также их усадка при высыхании могут совершаться сравнительно быстро и сопровождаться образованием как малых, так и крупных трещин. Съемка малоформатными камерами или фототеодолитом позволяет установить, как идут эти процессы, и количественно оценить их.

13.3. ИЗУЧЕНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Трещиноватость является одной из важнейших характеристик массивов скальных горных пород, определяющей 1) водо- и газопроницаемость пород, 2) прочностные и деформационные свойства массива, 3) развитие опасных геологических и инженерно-геологических явлений [14, 32, 38].

Основные характеристики трещиноватости. Согласно Л. Мюллеру, под трещинами понимаются все поверхности отдельности в скальных породах, вдоль которых нарушена связность материала (независимо от того, открыты они или закрыты), распространяющиеся на десятки метров или на несколько сантиметров. Именно трещины обуславливают дисконтинуальность среды и связанные с ней свойства массива скальных пород.

При инженерно-геологическом классифицировании необходимо учитывать следующие признаки трещин: 1) генетический тип, 2) возраст и последовательность образования, 3) ориентировку в пространстве, 4) протяженность, 5) ширину, 6) характер поверхности, 7) заполнитель, 8) интенсивность (степень трещиноватости), 9) форму и размер структурного блока, 10) тип симметрии трещинных решеток и трещиноватости.

1. Генетические типы, возраст и последовательность образования трещин. По генезису наиболее часто выделяются следующие типы: I — литогенетические и петрогенетические трещины напластования и первичной отдельности; II — тектонические трещины (разломы, разрывы, трещины скола и отрыва, скольжения, сланцеватости — кливажа); III — экзогенные — выветривания, разгрузки (бортового отпора), гравитационные (на склонах с неустойчивым профилем равновесия); IV — техногенные, образованные в результате инженерной деятельности человека. Генезис во многом определяет параметры трещин (длину, ширину, протяженность), вид трещинного заполнителя, степень трещиноватости скального массива, форму и размер элементарного блока.

Помимо генетических типов трещин при инженерно-геологическом изучении трещиноватости принято различать: 1) первичную трещиноватость скальных массивов, под которой, согласно В. В. Белоусову, понимают литогенетическую трещиноватость и трещиноватость, связанную с региональными тектоническими процессами, синхронными образованию пород, и 2) вторичную трещиноватость, к которой относятся трещины тектонического происхождения, возникшие после образования породы, выветривания, бортового отпора, гравитационные и др.

2. Элементы залегания трещин. Для выявления закономерностей распространения трещин в пространстве измеряют элементы их залегания: азимуты падения, простирания и угол наклона. Ориентировка трещин в массиве в подавляющем большинстве случаев представлена в виде определенных семейств и значительно реже — хаотически расположенными трещинами. Несколько семейств составляют системы трещин.

Семейства и системы трещин трудно выявить по результатам единичных замеров, но их можно легко установить с помощью статистической обработки. Если рассеяние элементов залегания трещин одной системы небольшое, то речь идет о «строгой» системе, а если большое — об «ослабленной».

3. Размеры трещин, характер их поверхности и заполнитель. По размерам трещины могут быть малыми (внутрислойными) и большими секущими. Малые трещины обычно не выходят за пределы одного пласта. Большие трещины обычно тектонического происхождения пересекают пакки слоев и прослеживаются на расстоянии в десятки — сотни метров и более. Большие трещины, как правило, представляют наибольшую опасность для любых видов сооружений.

Существует ряд классификаций трещин; ниже в качестве примера приведены две из них.

Классификация трещин по протяженности (по Л. Мюллеру)

Категория трещин	Протяженность, м	Отношение длины трещин к размеру сооружения
Небольшие	0,1—1	1/50
Большие	1—10	1/5
Очень большие	10—100	1
Расщелины	>100	>1

Классификация трещин по ширине (по Л. И. Нейнгадт)

Категория трещин	Ширина, мм
Микротрещины	<0,1
Волосные (тонкие)	0,1—1
Узкие	1—5
Средние	5—20
Широкие	20—100
Очень широкие	100—500

По характеру поверхности трещин А. М. Гуреев и С. Е. Моги-левская выделяют: гладкие, шероховатые, бугристые и неровные.

По характеру заполнителя трещины можно классифициро-вать следующим образом: 1) без заполнителя (открытые или зияющие в зависимости от ширины); 2) с порошкообразным за-полнителем из перетертых материнских пород; 3) с глинистым заполнителем; 4) с кристаллическим заполнителем (закрытые).

4. Форма и размер структурных блоков. Трещины различных систем образуют структуру массива, которая характеризуется формой и размером блочности. М. Матула и Р. Хольцер выде-ляют пять типов блочного строения массива (рис. 53): тип 0 —

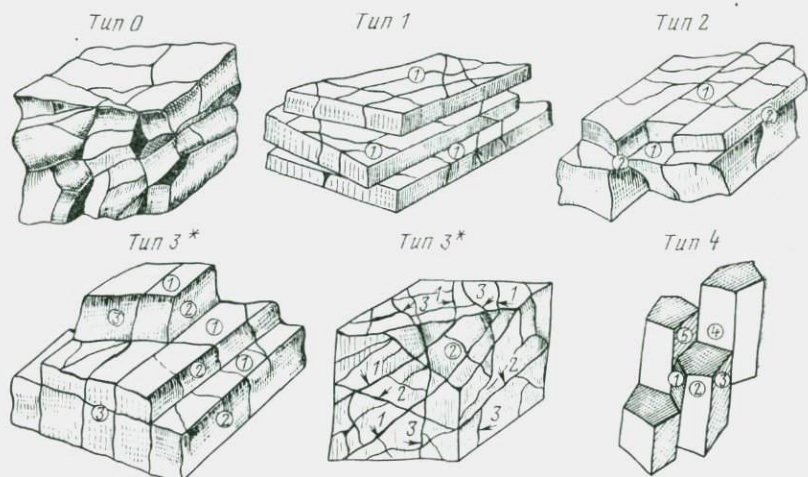


Рис. 53. Основные типы блочного строения массива (по М. Матуле, Р. Холь-церу):

Системы трещин обозначены цифрами в кружках

многогранники неправильной формы без четко выраженных систем трещин; тип 1 — пластовая отдельность, образованная одной, четко выраженной горизонтальной системой трещин и неупорядоченными субвертикальными системами трещин; тип 2 — призматическая или кубическая отдельность, образованная двумя ортогональными равнозначными системами трещин; тип 3 — кубическая или призматическая отдельность, образованная тремя равнозначными системами трещин, две из которых ортогональные; тип 3* — призматическая отдельность, образованная тремя неортогональными системами трещин; тип 4 — многогранники правильной формы (столбчатая отдельность), образованные тремя или более равнозначными системами трещин.

5. Типы симметрии трещин, их решеток и трещиноватости. Симметрия трещиноватости — это точная геометрическая форма выражения особенностей взаимного расположения систем тре-

щин в пространстве. По отношению к мелкой трещиноватости А. А. Варга [9] выделяет два основных вида симметрии: конечную (присущую элементарному блоку отдельности) и бесконечную (характеризующую решетку трещин). В качестве типов симметрии трещинных решеток выделяются: триклинная, моноклинная, ромбическая, тригональная, тетрагональная, гексагональная, кубическая, осевая и сферическая.

При наличии двух преобладающих систем трещин, пересекающихся под острым углом, и при неравенстве средних расстояний между трещинами этих систем симметрия трещинной решетки относится к моноклинной сингонии. При наличии в массиве трех взаимно перпендикулярных систем трещин в зависимости от средних расстояний между трещинами a выделяются сингонии решетки: кубическая (при равенстве расстояний во всех системах $a_1 = a_2 = a_3$); тетрагональная (при $a_1 = a_2 \neq a_3$) и ромбическая (при $a_1 \neq a_2 \neq a_3$). Последний случай является наиболее распространенным и включает примеры размещения систем трещин в осадочных породах относительно слонности и в магматических породах относительно плоскостных систем течения. Полигональная трещиноватость наподобие столбчатой отдельности базальтов относится к осевой симметрии. Хаотическую трещиноватость с равномерным распределением полюсов трещин на круговых диаграммах можно отнести к сферической симметрии.

Основой для определения типа симметрии трещиноватости являются круговые диаграммы, дополненные сведениями о расстояниях между трещинами отдельных систем.

Количественная оценка трещиноватости

Для количественной оценки трещиноватости наиболее часто используются модуль трещиноватости, коэффициент трещинной пустотности, блочность пород. Модуль трещиноватости определяется количеством трещин на 1 м обнажения разреза породы и в выработке или керна буровой скважины.

Коэффициент трещинной пустотности $K_{тр}$ [32] основан на непосредственном подсчете трещинных пустот ($S_{п}$ или $V_{п}$) на определенной площади обнажения (S_0) или в заданном объеме породы (V_0) и находится по формулам

$$K_{тр} = \frac{S_{п}}{S_0} \cdot 100 \% \quad \text{или} \quad (13.18)$$

$$K_{тр} = \frac{V_{п}}{V_0} \cdot 100 \% . \quad (13.19)$$

М. В. Рац и С. Н. Чернышев предлагают оценивать трещинную пустотность (отношение суммарного объема трещин к еди-

нице объема массива горных пород) по формуле

$$n = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \bar{a}_i}{\bar{a}_i + \Delta \bar{a}_i}, \quad (13.20)$$

где n — число систем трещин, совместно развитых в данном объеме массива; $\Delta \bar{a}_i$ — ширина трещин i -й системы; \bar{a}_i — среднее расстояние между трещинами i -й системы.

Блочность пород b , т. е. размер блоков, отделенных друг от друга трещинами, вычисляется по формуле

$$b = \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\left(1 + \frac{\sqrt[3]{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}}{\bar{a}_4}\right) \left(1 + \frac{\sqrt[3]{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}}{\bar{a}_5}\right)}}, \quad (13.21)$$

где $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3$ — средние расстояния между трещинами трех главных систем трещин; \bar{a}_4 и \bar{a}_5 — то же, для более редких систем трещин.

При количественной оценке трещиноватости по керну буровых скважин возможно использование показателя качества RQD , который представляет собой величину, характеризующую относительное процентное содержание столбиков керна высотой более 10 см в определенном интервале бурения.

По величине «показателя качества» выделяются приведенные ниже типы сохранности пород.

Сохранность пород	RQD , %
Очень хорошая	90—100
Хорошая	75—90
Средняя	50—75
Плохая	25—50
Очень плохая	0—25

При изучении трещиноватости по керну буровых скважин часто возникают трудности при определении элементов залегания трещин, так как это требует ориентации керна. В настоящее время существует несколько способов ориентации керна при отрыве его от забоя скважины. Однако при геологоразведочных работах часто приходится иметь дело с неориентированным керном. Замеры элементов залегания трещин производятся приближенно с помощью горного компаса при моноклином залегании пород или с помощью специальных палеток и приборов.

При изучении трещиноватости по керну буровых скважин особое внимание обращается на учет числа трещин на 1 м керна, высоту столбиков керна, количество и характер раздробленного материала, а также на наличие зеркал скольжения.

На перечисленных данных базируются различные классификации оценки степени трещиноватости; в табл. 21 приведена одна из них (по Л. В. Шаумян).

Таблица 21

Оценка трещиноватости пород по керну буровых скважин

Породы	Модуль трещиноватости	Высота столбика керна, см	Количество раздробленного материала, % (от объема)
Слаботрещиноватые	1—5	>20	—
Среднетрещиноватые	5—10	10—20	—
Сильнотрещиноватые	>10	10	10—20
Очень сильнотрещиноватые	>25	<5	50
Раздробленные	>50	—	80

Методы и методика изучения трещиноватости

Определение трещиноватости путем прямых обмеров трещин. Наиболее полная и объективная качественная и количественная характеристика трещиноватости может быть получена только в том случае, когда ее изучение тесно увязано с исследованием геолого-тектонического строения района, а также генезиса, состава и структуры пород при применении комплекса инженерно-геологических и сейсмоакустических методов. Для изучения трещиноватости также используется фототелевизионное обследование скважин. Большое значение для оценки трещиноватости имеют опытно-фильтрационные работы и исследования проницаемости массива сжатым воздухом.

Для изучения трещиноватости используются естественные обнажения горных пород и различные горные выработки (карьеры, штольни, подземные выработки), а также керн буровых скважин. Опорные площадки или скважины выбираются таким образом, чтобы ими были охарактеризованы все литологические и петрологические типы пород района исследований. В пределах распространения пород одного типа опорными площадками должны быть охарактеризованы различные генетические типы трещиноватости (литогенетическая, тектоническая, разгрузки, выветривания и т. д.), а внутри их — зоны разной степени трещиноватости и с различным характером блочности. Рекомендуется опорные площадки располагать по линиям инженерно-геологических профилей вкрест и по простиранию геологических и тектонических структур, а также зон трещиноватости различного генезиса.

Таким образом, площадки должны располагаться в пределах участков, однородных в геолого-структурном отношении. По выбору числа площадок нет и не может быть единых реко-

мендаций [9], так как оно зависит от масштаба инженерно-геологической съемки, степени обнаженности, задач исследований и т. д. В общем надо стремиться к тому, чтобы каждый однородный блок был охарактеризован несколькими эталонными площадками. В среднем по каждому массиву желательно иметь 10—15 опорных площадок.

Размеры и форма опорных площадок могут быть различными. Поскольку каждая система трещин должна быть охарактеризована 10—20 трещинами, площадка будет охватывать 100—200 трещин. По данным М. В. Раца, в каждой системе должно быть описано 20—30 трещин. В рекомендациях Комитета по полевым исследованиям предлагается замерять около 150 трещин.

На опорных площадках определяются: генетические типы, пространственная ориентировка, ширина и протяженность трещин; состав трещинного заполнителя; характер стенок; расстояние между трещинами одной системы; форма и размер элементарного блока. Особое внимание обращается на наличие тектонических трещин с зеркалами скольжения. На основании выполненных замеров определяют: модуль трещиноватости, коэффициент трещинной пустотности и блочность.

В целях наибольшей объективности необходимо зарисовывать и измерять все трещины подряд. Обязательную схематическую зарисовку площадки изучения трещиноватости желательно дополнить ее фотографированием.

Замеры трещиноватости в полевых условиях заносятся в таблицы. Пример описания трещиноватости на опорных площадках приведен ниже.

Результаты обработки трещиноватости также представляются в виде таблицы, которая сопровождается фотографией обнажения или керна с выделением основных систем трещин и указанием места опробования, а также диаграммой трещиноватости.

Опорные площадки должны быть топографически привязаны к карте. Желательно использовать для этого фототеодолитную съемку, которая особенно перспективна при изучении трещиноватости труднодоступных склонов, строительных котлованов, а также районов магнитных аномалий.

Определение трещиноватости сейсмоакустическими методами. Для количественной оценки трещиноватости с успехом применяют сейсмоакустические методы: ультразвуковой (акустический) и сейсмический каротаж скважин и сейсмическое профилирование. Важным преимуществом этих методов является то, что с их помощью можно получить количественную характеристику степени трещиноватости пород в закрытых условиях (на задернованных участках), а в буровых скважинах — по всему разрезу, включая интервалы раздробленных пород и зон тектонических нарушений, как правило, не охарактеризованных керном.

Описание трещиноватости на опорных площадках

1. Местоположение, геолого-структурная обстановка, ориентировка обнажения.
2. Зарисовка трещиноватости в масштабе 1 : 20.
3. Описание обнажений и трещин.

Номер трещины	Генезис	Элементы залегания			Размеры		Морфологические особенности		Заполнитель	
		Азимут		Угол падения	Видимая длина	Ширина	Степень извилистости	Степень шероховатости	Состав	Мощность
		падения	простираия							

4. Круговая диаграмма трещин.
5. Описание систем трещин.

Номер системы	Генезис	Число трещин	Элементы залегания						Размеры				Расстояние между трещинами		Морфология		Заполнитель				
			Азимут падения		Азимут простираия		Угол падения		Длина		Ширина				Форма	Поверхность стенок	Состав	Мощность			
			пределы	средний	пределы	средний	пределы	средний	пределы	средняя	пределы	средняя	пределы	среднее				пределы	средняя		

6. Количественные показатели

Коэффициент трещинной пустотности $K_{тр}$	Модуль трещиноватости		Блочность	
	по горизонтали	по вертикали	пределы	средняя

Основой применения сейсмоакустических методов для количественной оценки трещиноватости является четкая зависимость скоростей упругих волн от пористости и трещиноватости исследуемой среды, для описания которой наиболее часто используется уравнение среднего времени

$$\frac{1}{v_n} = \frac{n}{v_3} + \frac{1-n}{v_t}, \quad (13.22)$$

из которого следует, что

$$K_{тр} = \frac{v_3(v_t - v_n)}{v_n(v_t - v_3)} \cdot 100 \%, \quad (13.23)$$

где v_n — скорость распространения упругих волн в трещиноватой породе; n — пористость породы; v_3 — то же, в трещинном заполнителе; v_t — то же, в скелете породы.

Известна также эмпирическая формула, связывающая скорость продольных волн с пористостью,

$$v_n = (v_t - v_{\min}) e^{-Bn} + v_{\min}, \quad (13.24)$$

где v_t — максимальная скорость распространения волн в породах данного типа при $n=0$; т. е. скорость в «скелете»; v_{\min} — минимальная скорость, зафиксированная для этих пород при максимальном значении пористости; B — коэффициент, характеризующий размер и форму пор ($0,04 < B < 0,08$).

В случае изометричной формы пор в породе следует использовать формулу Макензи — Сато, которая для оценки величины скорости в породе с порами, заполненными воздухом, имеет следующий вид:

$$v_p = v_t \left\{ 1 - n \left[\frac{8\mu - 1}{6(1 - 2\mu)} + \frac{5(1 - 2\mu)}{7 - 5\mu} \right] \right\}, \quad (13.25)$$

где v_p и v_t — скорости соответственно в пористой и монолитной породе; μ — коэффициент Пуассона монолитной породы.

При оценке трещинной пустотности в инженерной сейсмике наибольшее применение получила формула среднего времени (13.23); в нефтяной сейсмике при оценке коллекторских свойств нефтеносных пластов используют как формулу (13.23), так и соотношение (13.24). В специальных случаях для оценки пустотности кавернозных известняков или крупнопористых базальтов следует использовать формулу (13.25). В инженерных приложениях, когда объектом изучения обычно оказывается верхняя часть массива пород, в которой определяющее влияние на скорость упругих волн оказывает трещиноватость, следует применять для расчетов пустотности формулу среднего времени. Как следует из вида формулы, расчеты с ее помощью предельно просты. Некоторые трудности возникают лишь при выборе входящих в нее параметров, т. е. скорости в скелете породы v_t и в заполнителе пор и трещин v_3 .

Исходной информацией для вычисления трещинной пустотности по приведенным формулам являются графики изменения скоростей упругих волн по линиям сейсмических профилей или по разрезу буровой скважины. Необходимо учитывать, что ценность и достоверность информации, полученной с помощью сейсмоакустических методов, увеличиваются во много раз, если они дополняются детальными инженерно-геологическими исследованиями трещиноватости.

Количественная оценка трещиноватости сейсмоакустическими методами с применением выражений (13.22) — (13.23) предусматривает помимо измерения скоростей упругих волн в исследуемом массиве знание скоростей v_t и v_3 .

Определение скорости в скелете породы v_t .

1. Если геофизические исследования проводятся на начальной стадии изысканий, когда никаких определений прямыми методами пористости на образцах и тем более трещиноватости массивов еще не проводилось, для оценки трещинной пустотности массива целесообразно задаваться значениями v_t , пользуясь усредненным графиком (рис. 54) или принимая следующие значения v_t (в км/с): для кислых пород 5,7; для средних — 6,0; для основных — 6,4; для ультраосновных — 7,5.

2. Если имеются данные парных определений скорости продольных волн и пористости на образцах породы данного типа, то с помощью графика $n=f(1/v)$, представляющего собой прямую линию, скорость v_t находят по пересечению прямой с осью скоростей, т. е. при $n=0$.

3. Для малопористых скальных грунтов любого типа при наличии достаточного числа определений скорости ультразвуковым методом на образцах может быть использовано соотношение

$$v_t = \bar{v} + 2,7 \sigma_v, \quad (13.26)$$

где \bar{v} и σ_v — соответственно математическое ожидание (среднее значение) и среднее квадратическое отклонение в распределении значений скорости.

Определение скорости в заполнителе v_3 .

1. Если измерение скорости \bar{v} проводится в лабораторных условиях на образцах, находящихся в воздушно-сухом состоянии, можно считать, что поры заполнены воздухом и тогда $v_3 \approx \approx 350$ м/с.

2. Если есть основание полагать, что скорость в заполнителе может отличаться от скорости в воздухе, то можно использовать результаты парных определений скорости \bar{v} и пористости n (прямым методом) и находить скорость v_3 из соотношения

$$v_3 = \frac{v_t n}{(v_t/\bar{v}) - 1 + n}. \quad (13.27)$$

При этом предполагается, что скорость v_i известна, т. е. определена одним из описанных выше методов. Но поскольку идеально однородных горных пород нет, а следовательно, величины v_i и n_i могут несколько варьировать при определении их на разных образцах одной и той же породы, то целесообразно

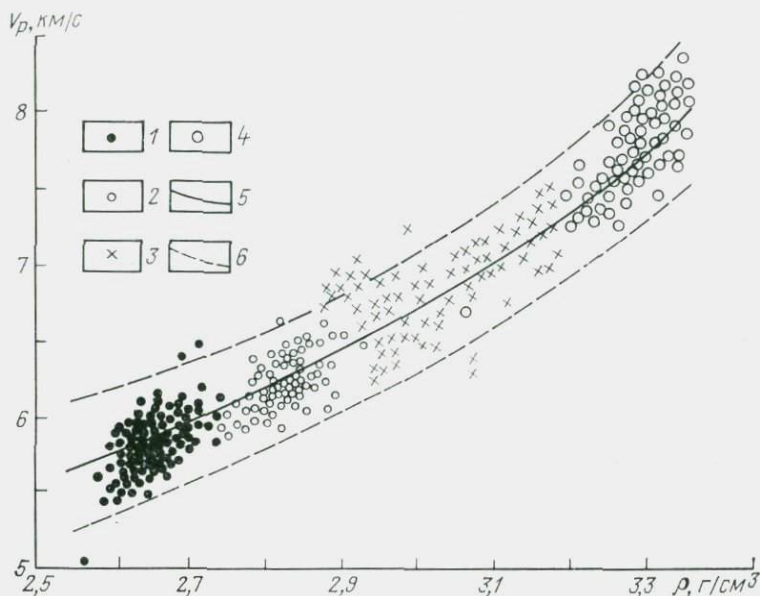


Рис. 54. Графики, иллюстрирующие соотношение скорости распространения продольных волн v_p и плотности ρ интрузивных и метаморфических горных пород (по Н. В. Дортман и М. Ш. Магид):

1 — граниты; 2 — биотитовые и биотит-амфиболовые гнейсы, кварцит-гранат-биотитовые гнейсы, биотит-амфиболовые гнейсы и амфиболиты; 3 — диориты и габбро-диориты; 4 — габбро-нориты, гипербазиты; 5 — усредненная кривая; 6 — граница области рассеяния

использовать серию парных определений v_i и n_i и более точное значение v_3 вычислить как

$$v_3 = \frac{\sum_{i=1}^n v_{3i}}{k}, \quad (13.28)$$

где k — число парных определений.

Можно поступить иначе, найдя предварительно средние значения пористости \bar{n} и скорости \bar{v} для данной серии парных замеров (см. выражение 13.27).

Определение скорости в заполнителе по данным лабораторных измерений базируется на возможности измерения пористости n прямыми методами. Прodelать то же самое в условиях естественного залегания породы не представляется возможным, так как прямых методов определения объемной трещинной пу-

стотности массива не существует. В лучшем случае можно установить площадной коэффициент трещинной пустотности по описанию трещиноватости в горных выработках. Получить значение v_3 путем прямых измерений также невозможно. Поэтому задача определения трещиноватости массивов значительно сложнее, чем изучение пористости той же породы в образце. Задаваться для заполнителя значениями скорости в воздухе или в воде нежелательно, так как в зоне аэрации кроме воздуха в трещинах может присутствовать рыхлый заполнитель и ниже УГВ поры и трещины могут быть заполнены водой не целиком. По данным О. К. Воронкова и М. Ш. Магид, при свободном насыщении образцов водой заполняется лишь часть пор, составляющая так называемую открытую пористость

$$n_{\text{откр}} = \rho_1 n. \quad (13.29)$$

Как показал анализ экспериментальных данных, величина коэффициента ρ_1 может варьировать от 0 до 1,0, имея некоторое примерно постоянное значение для каждого типа горной породы. Преобладающие значения ρ_1 для некоторых типов горных пород таковы.

Породы	ρ_1	Породы	ρ_1
Амфиболиты	0,02	Туфобрекчии	0,50
Габбро	0,06—0,1	Граниты выветрелые	0,48—0,52
Роговики	0,24	Гранитогайсы	0,40
Шлаки, брекчневые лавы	0,35	Алевриты	0,60
Гранитогайсы	0,40	Песчаники	0,6—0,05
Доляриты	0,3—0,5	Известняки	0,72
Сланцы глинистые	0,46	Туфы	0,83

Приведенные данные убеждают в том, что лишь в исключительных случаях скорость в заполнителе может быть равна скорости в воде или в воздухе. Для определения скорости в трещинном заполнителе может быть рекомендован лишь один надежный способ, предложенный О. К. Воронковым, реализация которого возможна при условии, что по данным сейсморазведки определялись скорости как продольных, так и поперечных волн. Суть его заключается в следующем. В системе координат v_p, v_s строится график $v_s = f(v_p)$, который аппроксимируется прямой линией $v_s = a + bv_p$. Поскольку ни в воздухе, ни в воде поперечные волны не распространяются, при $v_s = 0, v_p = v_3 = -(a/b)$. Численно скорость в заполнителе равна отрезку, отсекаемому прямой $v_s = a + bv_p$ на оси скоростей.

Определение трещин пустотности массива. Пустотность массива может быть определена с помощью ультразвукового (УЗК), или сейсмического методов, или при их совместном использовании.

Определение пустотности массива по данным УЗК. Исходные данные — график $v = f(h)$. На измеренные скорости оказывает влияние как пористость, так и трещиноватость породы. Полагая скорость в скелете v_t известной (опреде-

лена одним из описанных выше способов), суммарную пустотность массива можно определить, подставив в уравнение среднего времени значение v_3 . Если принять v_3 равной скорости в воде $v_n=1430$ м/с, то вычисленные величины трещинной пустотности массива будут, очевидно, завышены, так как существует закрытая пористость и измеренные скорости снижены за счет заполнения части пустот воздухом, а не водой, в то время как при расчетах предполагалось, что они целиком заполнены водой. Положение упрощается, если параллельно с каротажем производилось измерение скоростей на керне, выбуренном из той же скважины. Тогда, полагая, что водой заполнены трещины и открытая пористость, уравнение (13.22) можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{\bar{v}} = \frac{1-n}{v_t} + \frac{n(1-p_1)}{350} + \frac{p_1 n}{1450}; \quad (13.30)$$

$$\frac{1}{\bar{v}} = \frac{1-n_n-n_{тр}}{v_t} + \frac{n_{тр}+p_1 n_n}{1450} + \frac{n_n(1-p_1)}{350}, \quad (13.31)$$

где n_n и $n_{тр}$ — соответственно пористость и трещинная пустотность; $p_1 n_n$ — открытая пористость; $n_n(1-p_1)$ — закрытая пористость.

Значение v_t считаем известным, величины p_1 приведены выше, n_n определяются по материалам измерений на керне, \bar{v} получаются по данным каротажа. Единственную неизвестную величину — показатель трещинной пустотности $n_{тр}$ подсчитать не составляет труда.

Определение пустотности массива по данным полевой сейсморазведки. Располагая данными о скоростях в массиве и графиком $v_s=f(v_p)$, сперва находим скорость в заполнителе, после чего с помощью уравнения среднего времени вычисляем полную пустотность массива. Если изучаемый массив расположен ниже УГВ, то определение трещинной пустотности производится точно так же, как и по материалам УЗК.

Наконец, если помимо данных сейсморазведки имеются материалы определения пористости на образцах породы, то: 1) когда массив находится в зоне аэрации, за скорость в скелете можно принять модальное значение скорости в образцах, а скорость в заполнителе трещин считать равной $v_3=350$ м/с (как показывает опыт работ, такое предположение достаточно близко к истине); 2) когда массив находится ниже УГВ, за скорость в скелете можно принять некоторое расчетное значение скорости, которое получится, если в формулу среднего времени подставить следующие величины: v_t — табличное или найденное одним из описанных способов, пористость n_n — из эксперимента. При этом предполагается, что открытая пористость, т. е. $p_1 n_n$, заполнена водой, а закрытая пористость $(1-p_1 n_n)$ — воздухом.

При расчетах $n_{тр}$ полагаем, что все трещинные пустоты заполнены водой, а скорость в массиве равна измеренной по материалам полевой сейсморазведки.

Обработка результатов изучения трещиноватости

Для выяснения закономерностей в распределении и ориентировке трещин применяются различные способы графической обработки. К их числу относятся различные диаграммы трещиноватости, разрезы, карты, срезы и модели трещиноватости исследуемого массива.

Среди диаграмм трещиноватости наиболее часто используются розы-диаграммы, точечные диаграммы и круговые диаграммы в изолиниях (рис. 55, 56, 57).

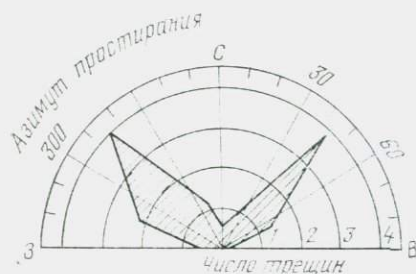


Рис. 55. Роза-диаграмма трещиноватости

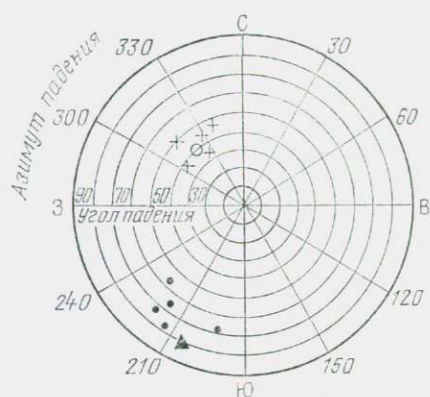


Рис. 56. Точечная круговая диаграмма трещиноватости пород:

1 — трещины напластования; 2 — то же, тектонические; 3 — элементы залегания пород; 4 — то же, зон разломов



На розах-диаграммах показываются направление и число трещин в полярной координатной системе. Точечные диаграммы представляют собой изображение поверхностей трещин в азимутальной проекции. По сравнению с розами-диаграммами они более информативны, так как дают представление не только о направлении, но и углах наклона трещин. Розы-диаграммы и точечные диаграммы применяются для обработки замеров трещиноватости для одного или нескольких обнажений.

Круговые диаграммы в изолиниях применяются для выявления основных систем трещин и их количественного учета на значительных по размерам площадях. Они строятся по данным большого числа опорных точек, расположенных в пределах одного структурного блока. На данном типе диаграмм плотность точек выражают в процентах, относительно общего числа замеров и проводят изолинии через выбранные интервалы.

Для получения более детального представления о положении трещин в пространстве вычерчивают блок-диаграммы трещин

для массивов однородной блочности. Дальнейшим обобщением сведений о характере и степени трещиноватости горных пород являются инженерно-геологические разрезы и карты трещиноватости.

На картах (рис. 58) и разрезах выделяются зоны трещиноватости различного генезиса и разной степени. Генезис трещи-

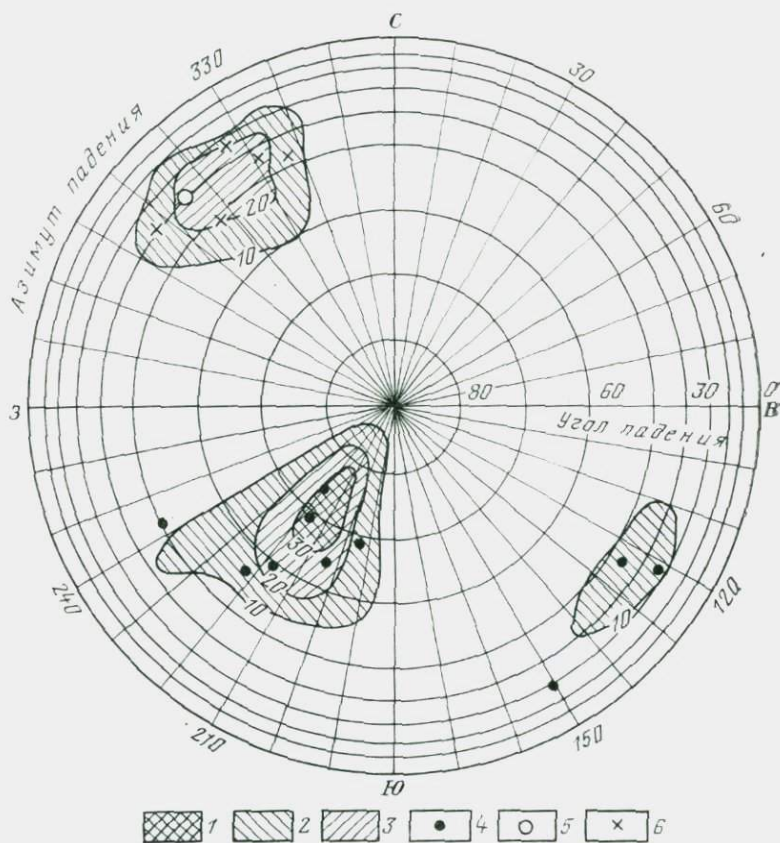
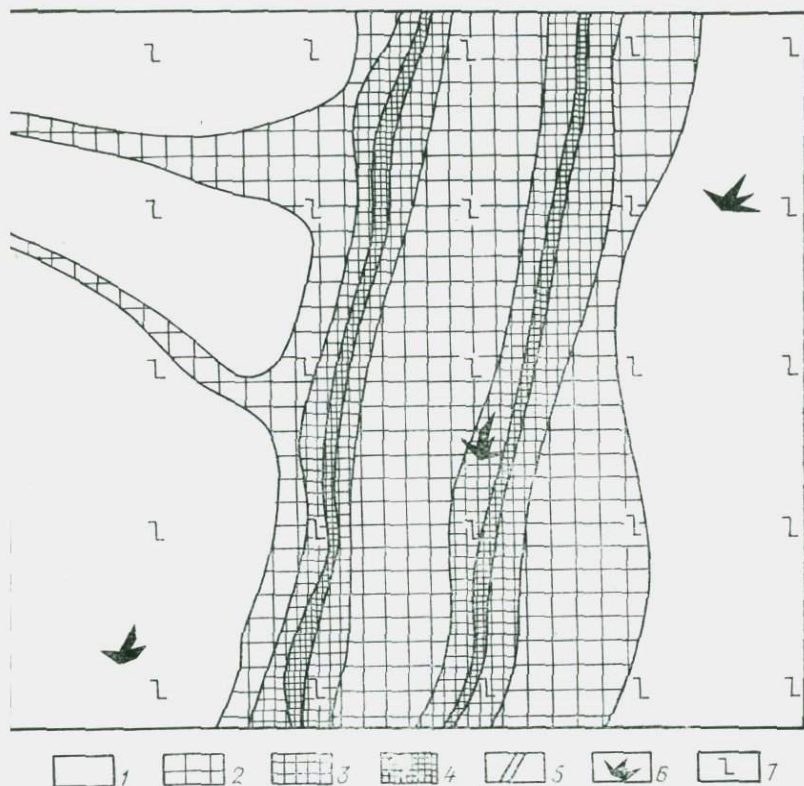


Рис. 57. Круговая диаграмма трещиноватости пород в изолиниях (по В. В. Сукоручкину). Изолинии проведены через 10% плотности трещин: 1 — трещины напластования; 2 — трещины тектонические; 3 — элементы залегания; 4 — зоны тектонических нарушений; 5 — зоны разломов; 6 — зоны дробления

новатости, который чаще всего может быть литогенетическим, выветривания, тектоническим, криогенным, разгрузки и разуплотнения и т. д., показывается, как правило, типом штриховки, а степень трещиноватости (слабо-, средне-, сильно-, очень сильно-трещиноватые и раздробленные породы) — густотой штриховки, причем с ростом интенсивности трещиноватости увеличивается густота штриховки. Кроме информации относительно ге-

зиса и интенсивности развития трещиноватости на карту на-
 сятся диаграммы, позволяющие судить об ориентировке ос-
 вных систем трещин. Такие диаграммы рекомендуется со-
 авлять для всех характерных зон.

Помимо указанных карт и разрезов очень полезно состав-
 ние модели трещиноватости исследуемого массива. На этой



с. 58. Карта интенсивности тектонической трещиноватости базальтового массива (макет):

1 — массивы слаботрещиноватых пород; 2 — то же, среднетрещиноватых пород; 3 — то же, сильнотрещиноватых пород; 4 — зоны дробления; 5 — тектонические нарушения; 6 — розы трещиноватости; 7 — нижетриасовые базальты

модели, так же как и на карте и разрезе, изображаются гене-
 тические типы трещин, выделяются зоны различной интенсивно-
 сти трещиноватости. Кроме того, в пределах генетических типов
 трещиноватости и зон различной интенсивности показываются на-
 правление главных систем трещин и закономерности их рас-
 седеления, даются характеристики блочности, трещинной пу-
 зтности и т. д.

13.4. ИЗУЧЕНИЕ ВЫВЕТРЕЛОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

В инженерной геологии под выветриванием следует понимать совокупность физико-химических, биохимических и физических процессов, изменяющих состав, состояние и свойства горных пород верхней части земной коры под влиянием факторов атмосферы, гидросферы и биосферы, а также хозяйственной деятельности человека. В результате выветривания горные породы могут претерпевать глубокие изменения химико-минерального состава, структурно-текстурных особенностей и свойств. Возникают минералы, более устойчивые к воздействию факторов выветривания, происходит разуплотнение и растрескивание горных пород, в большинстве случаев снижаются их прочностные и деформационные показатели. Среди химических процессов, приводящих к таким изменениям горных пород, преобладают: окисление, растворение, гидратация, гидролиз, катионный обмен. Активизируются также биологические процессы, связанные с деятельностью низших (бактерий, водорослей, грибов и т. д.) и высших растений, что ведет к образованию органических и гуминовых кислот, углекислого газа и пр., способствующих дальнейшему, более интенсивному изменению горных пород. Физическое выветривание горных пород вызывается прежде всего изменением температуры, замерзанием и оттаиванием воды в трещинах, деятельностью растений и животных (рост корней, сверление и т. д.). В процессе выветривания верхние, более разрушенные участки горных пород смываются водными потоками, сдуваются ветром или осыпаются и выветривание вновь активизируется. При отсутствии переноса продуктов выветривания или слабом его проявлении происходит накопление этих продуктов, формируется особый генетический тип континентальных образований — элювий, а интенсивность выветривания коренных пород снижается. Обычно процессы химического и физического выветривания происходят одновременно и взаимосвязаны, но их интенсивность существенно зависит от физико-географических условий, и в каждой природной обстановке преобладает тот или иной тип выветривания. Физическое выветривание доминирует в аридных, высокогорных и полярных областях, химическое — в умеренно влажной, влажной тропической и субтропической зонах. Пространство (по разрезу), где происходит выветривание горных пород, принято называть зоной выветривания, или гипергенеза, а образующийся при выветривании более рыхлый пористый материал, состоящий из обломков исходных пород и минералов и новых минералов, устойчивых в условиях низких давлений и температуры, — корой выветривания. По возрасту образования коры выветривания подразделяются на современные и древние, а по характеру пространственного расположения — на площадные и линейные. Площадная кора выветривания обычно имеет в вертикальном разрезе зональное строение, рельеф подошвы повторяет рельеф поверхности, мощ-

ность относительно выдержана и составляет от нескольких и первых десятков метров (современная кора выветривания) до 500 м (древняя). Линейные коры выветривания формируются в пределах крупных тектонических разломов и крутопадающих контактов пород различного состава. Их мощность может изменяться в достаточно широких пределах и всегда в несколько раз превосходит мощность площадной коры выветривания. В вертикальном разрезе коры выветривания характеризуются закономерным изменением пород как по составу, так и по физико-механическим свойствам, что нашло отражение в ряде схем их расчленения, предложенных Г. С. Золотаревым, Н. В. Коломенским, И. И. Гинзбургом и др. [38].

Изучению процессов выветривания, их направленности, интенсивности проявления и всесторонней оценке кор выветривания придается большое значение при проведении инженерно-геологических исследований для решения разнообразных научных и практических вопросов. Исследования эти проводятся преимущественно по трем направлениям: изучение геохимических особенностей процессов выветривания, оценка физико-механических свойств пород и закономерностей изменения этих свойств при выветривании и выяснение особенностей пространственного развития кор выветривания. При этом особый интерес всегда представляют оценки прогнозного характера, включая вопросы временных прогнозов. В зависимости от особенностей изучаемых объектов и целей исследований методы изучения, степень их детальности и точности могут существенно различаться, но указанную общую направленность их и последовательность целесообразно сохранять.

Изучение геохимических изменений пород при выветривании

Изучение химико-минерального состава и структурно-текстурных особенностей горных пород, а также их изменений в зонах выветривания проводится с помощью петрографических методов. Особое внимание при этом должно уделяться петрографическому изучению пород непосредственно в обнажениях, где визуально или с помощью простейших методов определяются: основные типы коренных пород и продуктов выветривания, текстурные особенности и гранулометрический состав пород, физико-механические свойства отдельных типов пород (определяются различными экспресс-методами), а также условия залегания пород с обязательным выявлением соответствующих зон коры выветривания [38]. Одновременно производится отбор проб для выполнения петрографических исследований, химического и спектрального анализов и определения физико-механических свойств горных пород в лабораторных условиях. В процессе опробования особое внимание следует уделять отбору проб связанных и рыхлых грунтов, а также коренных пород с различной

степенью выветрелости с учетом (качественным и количественным) характера их трещиноватости и блочности. Отбираемые пробы должны быть представительными для основных типов пород в пределах каждой выделенной зоны. Пониженная прочность выветрелых пород и специфические трудности изготовления из них образцов для последующих лабораторных испытаний (петрографических шлифов, образцов правильной геометрической формы и т. д.) требуют особой осторожности при отборе проб, а во многих случаях и их консервации (покрытия парафином или иными укрепляющими и влагонепроницаемыми веществами). Микроскопическое изучение петрографических шлифов, изготовленных из пород коры выветривания, наряду с диагностическими целями должно быть направлено на оценку степени выветрелости породообразующих минералов и выяснение характера изменений структурно-текстурных особенностей пород с проведением там, где это необходимо и возможно, соответствующих количественных подсчетов обычными петрографическими методами. При этом могут быть установлены наименее стойкие к выветриванию минералы, оценено их количество (количество вторичных минералов в горной породе предопределяет степень изменения ее физико-механических свойств, характер анизотропии и пр.) и проведена предварительная типизация изучаемых пород по степени выветрелости. Одновременно могут проводиться определения химического состава пород, позволяющие дополнить результаты петрографических исследований, в том числе по выяснению механизма процесса выветривания в конкретных условиях и установлению закономерностей его проявления.

Знание этих закономерностей необходимо для обоснования прогнозов проявления процессов выветривания в пространстве и во времени. Большую помощь для разработки таких прогнозов может оказать соответствующее моделирование процессов химического выветривания. Его можно осуществлять на специальной установке, позволяющей моделировать процесс выветривания различных типов горных пород применительно к конкретным природным условиям, с учетом химического состава атмосферы, водных растворов (моделируется гидрохимический режим грунтовых вод) и температуры. Принцип работы установки следующий: жидкость соответствующего химического состава нагревается в колбе до заданной температуры, испарения по трубке поступают в холодильник, откуда, конденсируясь, попадают в виде капель на испытываемую породу (навеска щебня пород с диаметром отдельностей 2—3 см). Жидкость после достижения определенного уровня в цилиндре, где она заполняет промежутки между испытываемыми щебенками пород и поры, сливается в колбу-приемник. Процесс этот может продолжаться несколько месяцев, моделируя время выветривания в масштабе порядка 1 : 100 [49]. Проведенное моделирование процесса выветривания пород показало, что направленность процесса вы-

ветривания в значительной степени определяется кислотно-щелочной средой (величиной рН почвенных вод), которая обуславливает различную миграционную подвижность элементов. Неодинаковая кислотно-щелочная обстановка в разрезе способствует возникновению вертикальной зональности химического и минерального состава пород, начало формирования которой совпадает с началом выветривания [50]. При этом для приближенных оценок способности элементов к миграции достаточно пользоваться разделением почвенных вод по величине рН на четыре группы: воды сильноокислые ($pH < 3,0$), кислые и слабокислые (3,0—6,5), нейтральные и слабощелочные (6,5—8,5) и сильнощелочные ($pH > 8,5$). Достоверность результатов моделирования зависит от правильности выбора граничных условий эксперимента, воспроизводящих основные факторы физико-географической обстановки и гидродинамический режим, характерные для изучаемых объектов. Только при соблюдении этого условия моделирование позволяет интенсифицировать природные процессы, не переходя за экстремальные значения параметров процесса, которые достигаются в природе. Использование полученных результатов позволяет более обоснованно проводить инженерно-геологическое картирование с выделением и детальной характеристикой кор выветривания, что иллюстрируется многими примерами [50].

Методы количественной оценки выветрелости и скорости выветривания пород

Вертикальная зональность кор выветривания, обусловленная спецификой химико-минерального состава и структурно-текстурных особенностей пород, в различной степени измененных при выветривании, характеризуется значительными изменениями физико-механических свойств пород. При решении многих практических вопросов количественной оценке степени выветрелости пород уделяется большое значение.

Оценка выветрелости. Приблизительно степень выветрелости может быть оценена по внешним признакам разделением выветрелых пород на несколько категорий или групп. Г. С. Золотаревым предложено выделять четыре категории, обозначаемые индексами А, Б, В и Г и соответствующие разным горизонтам выветривания; Н. В. Коломенским — также четыре группы, соответствующие зонам выветривания: тонкого дробления, мелкообломочной, глыбовой и монолитной.

Для количественной характеристики степени выветривания пород единого общепринятого показателя нет. Предложен целый ряд различных показателей выветрелости. Так, А. Хемрол рекомендует выветрелость изверженных и метаморфических пород характеризовать специальным показателем i

$$i = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100, \quad (13.32)$$

где P_2 — масса образца породы после водонасыщения в течение 1,2—1,5 ч; P_1 — то же, высушенной при 105 °С.

Г. С. Золотарев предложил показатель степени выветрелости B_c , который рассчитывается по формуле

$$B_c = \frac{F_n - F_o}{F_n - F_a}, \quad (13.33)$$

где F — показатель среднего содержания какого-либо минерала (гипса, окислов железа и др.) или значение какого-либо свойства породы (плотность, пористость, временное сопротивление сжатию, динамический модуль упругости и др.). Индексы «н», «о», «а» относятся соответственно к невыветрелым, оцениваемым и предельно выветрелым (горизонт А) породам. По этому показателю предлагается выделять четыре категории пород по степени выветрелости: сильновыветрелые ($B_c > 0,9$), выветрелые (0,9—0,7), средней степени выветрелые (0,7—0,3) и слабовыветрелые ($B_c < 0,3$).

В сейсмическом методе за показатель степени выветривания обычно принимают отношение скорости волны в изучаемом горизонте коры выветривания v_b к скорости волны в неизменной (сохранной) породе v_c : $K = v_b/v_c$.

Показатель стойкости горных пород к выветриванию K_{Π} (по П. Н. Панюкову) рассчитывается по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{R_c^1 - R_c^2}{R_c^1}, \quad (13.34)$$

где R_c^1 и R_c^2 — временное сопротивление сжатию или другой физический параметр соответственно в невыветрелом состоянии и после годового цикла воздействия агентов выветривания.

Показатель интенсивности выветривания K_b , по Л. А. Ярг, определяется из выражения

$$K_b = \frac{R_{i,n} - R_{i,(n-1)}}{\frac{h_n}{2} + \frac{h_{(n-1)}}{2}}, \quad (13.35)$$

где $R_{i,n}$ и $R_{i,(n-1)}$ — средние значения какого-либо показателя для изучаемых зон выветривания; h_n и $h_{(n-1)}$ — мощности тех же зон.

Оценка скорости выветривания. Большое практическое значение представляет определение скорости процесса выветривания горных пород, для чего также предложен ряд показателей.

Коэффициент скорости выветривания $K_{св}$ (по Г. С. Золотареву), представляющий собой отношение объема выветрелых пород горизонта А к площади выветривания.

Стойкость к атмосферному выветриванию пород в обнажениях из «зон глинистых продуктов выщелачивания» — Π (по В. М. Швецу, Б. Н. Мельникову, Л. А. Татариновой) оценивается по интенсивности (скорости) снижения показателей состава или прочностных свойств пород

$$\Pi = \frac{R'_i - R''_i}{t}, \quad (13.36)$$

где R'_i и R''_i — временное сопротивление пород сжатию (для глинистых пород) или степень разрушения обломков (для обломочных) соответственно до и после воздействия процессов выветривания за время t . Степень разрушения обломков при этом устанавливается по отношению массы фракции размером менее 2 мм к массе частиц размером более 2 мм.

Е. М. Сергеев и Ю. Д. Матвеев разделяют процесс выветривания на стадии: 1) интенсивного выветривания (период, за который формируется более 50 % мощности коры выветривания); 2) замедленного выветривания (мощность коры выветривания увеличивается до 80 %); 3) затухающего выветривания (формируется максимальная мощность коры выветривания в данных природных условиях).

Изучение особенностей пространственного развития кор выветривания

Пространственное положение кор выветривания изучается для определения объемов вскрышных пород при промышленном освоении месторождений полезных ископаемых и различных видах строительства, для выбора оптимальных условий размещения строительных объектов, прогнозной оценки возможного проявления инженерно-геологических процессов и т. д. Важнейшие задачи таких исследований: определение мощности коры выветривания и особенностей ее изменения, выделение соответствующих зон, выявление физико-механических свойств слагающих их пород и составление детальных инженерно-геологических карт (масштаб 1:25 000—1:1000). Выполнение такой инженерно-геологической съемки связано с изучением имеющихся обнажений и специальных инженерно-геологических шурфов и скважин, заложение и технология проходки которых определяются целями исследований. Так, например, диаметр скважин выбирается с учетом размеров колец компрессионных и сдвиговых приборов (но не менее 131 мм), глубина скважин (и шурфов) должна на 2—3 м превышать мощность коры выветривания, выход керна должен быть максимальным. Это достигается применением специальной технологии бурения, ограничением скорости и уменьшением интервалов бурения, использованием двойных колонковых труб и т. д. Технология опробования должна обеспечивать возможность отбора проб с ненарушенной структурой, причем интервал опробования

принимается не более 1,5 м. Физико-механические свойства пород коры выветривания определяются общепринятыми методами с учетом их петрографических особенностей и степени выветрелости [42].

Сейсмический метод изучения кор выветривания

В последние годы при изучении кор выветривания успешно применяются методы разведочной геофизики, и прежде всего сейсморазведка. Учитывая эффективность этих методов и относительную новизну их использования для инженерно-геологического изучения кор выветривания, на них следует обратить особое внимание.

Физической основой изучения методами сейсморазведки строения коры выветривания, ее мощности, а также свойств отдельных горизонтов является тесная связь между состоянием горной породы и скоростями распространения в ней упругих колебаний — сейсмических волн. В общем случае чем более выветрелая порода, тем больше ее пористость и трещиноватость и тем больший процент породообразующих минералов заменен вторичными, более слабыми, имеющими меньшие скорости распространения сейсмических волн. Поскольку степень выветривания породы постепенно уменьшается в глубину, это приводит к соответствующему возрастанию скорости. При плавном увеличении скорости волн в глубину от источника колебаний, расположенного на дневной поверхности, будут распространяться рефрагированные волны, а при слоистом строении зон выветривания на кровле каждого ее горизонта будут образовываться и распространяться преломленные волны. Как следует из теории сейсморазведки, и тот и другой тип волн несет информацию о строении среды и свойствах слагающих разрез пород, в данном случае горизонтов коры выветривания.

Применяя соответствующие способы обработки, по наблюдаемым годографам сейсмических волн можно восстановить скоростной разрез и определить общую мощность зоны выветривания. Поскольку в пределах зоны выветривания породы всегда имеют повышенную трещиноватость и, как следствие этого, характеризуются пониженными значениями сейсмических скоростей, по материалам сейсмических наблюдений на поверхности земли независимо от типа породы может быть определена общая мощность коры выветривания. В любой из существующих классификаций при расчленении коры выветривания на отдельные горизонты за основу принимается степень трещиноватости породы. Соответственно, как это следует из физических соображений, относительное понижение скорости независимо от типа породы определяется трещинной пустотностью (оценивается коэффициентом трещинной пустотности). Следовательно, если считать, что каждому горизонту коры выветривания соответствует определенная степень дезинтеграции по-

род, или, иначе, ее трещиноватости, то, зная величину снижения скорости по сравнению с ее максимальным значением в нетрещиноватых блоках, можно проводить расчленение коры выветривания на отдельные горизонты по сейсмическим данным.

Для подтверждения этой точки зрения на эталонных разрезах-расчистках проводилось сопоставление результатов расчленения коры выветривания на горизонты по геологическим признакам и по сейсмическим разрезам, построенным в тех же точках. При этом было установлено, что, как правило, независимо от типа породы верхний горизонт коры выветривания (горизонт А, по Г. С. Золотареву) по значениям скоростей волн не может быть отделен от покрывающего коренные породы делювиального чехла, а горизонт Г обычно объединяется с относительно сохранной породой. Следовательно, мощность зоны выветривания, определяемая по данным сейсморазведки, в большинстве случаев представляет собой суммарную мощность горизонтов Б и В. Для более крепких пород величины скорости волн в горизонтах Б и В составляют, как правило, 0,4—0,8 от величины скорости волн в неветрелой породе, что и может служить критерием для их выделения по данным сейсморазведки. Для более слабых цементированных грунтов и глин снижение скорости волн в пределах горизонта Б несколько больше (в среднем 0,2—0,3), что следует учитывать при расчленении кор выветривания на горизонты.

Анализ данных ультразвуковых измерений на образцах, отобранных из различных горизонтов коры выветривания, также обнаруживает снижение скоростей волн, но в меньшей степени, чем по материалам сейсмических измерений (табл. 22). Следовательно, принципиально как сейсмический, так и ультразвуковой методы могут быть использованы для изучения пород в пределах коры выветривания. Но реальные возможности сейсморазведки несравненно больше, так как наблюдения могут быть выполнены с дневной поверхности при отсутствии каких-либо разведочных выработок и даже при отсутствии выходов изучаемого массива на дневную поверхность. Наряду с этим для выполнения ультразвуковых измерений необходимы образцы пород, отобранные из скважин, шурфов, обнажений и т. д.

Таким образом, с помощью сейсморазведочных наблюдений можно расчленять коры выветривания на отдельные слои, соответствующие горизонтам и зонам, принятым в инженерно-геологических классификациях.

С точки зрения сейсморазведки коры выветривания в любых горных породах представляют собой среду, в которой скорость сейсмических волн возрастает в глубину от некоторого минимального значения v_c до величины v_{max} на подошве коры выветривания. Для выяснения закона изменения скорости волн в глубину необходимо на дневной поверхности выполнить

наблюдения по методике продольного сейсмического профилирования. На местности сейсмический профиль располагают таким образом, чтобы вдоль линии наблюдений был по возможности спокойный рельеф, причем безразлично, располагается профиль на горизонтальной или наклонной поверхности, по простиранию или падению склона. Массив пород, у которых

Т а б л и ц а 22

Значения коэффициента K_v для выветрелых пород

Метод	Порода	K_v для горизонтов	
		Б	В
Ультразвуковой	Граниты (южная Болгария)	0,41	0,82
	Граниты (Украинский щит)	0,51—0,70	0,88—0,93
	Базальты (северная Болгария)	0,51	0,76
	Габбро (Болгария)	0,94	0,98
	Известняки (Болгария)	0,85	0,90
	Слюдистые гнейсы (Болгария)	—	0,81
	Аргиллиты (р. Днестр)	0,65	0,68—0,86
Сейсмо-разведка	Диабазы траппов (Сибирь)	0,50—0,80	
	Перидотиты и пироксениты (Сибирь)	0,36	0,67
	Известняки (Средняя Азия)	0,54—0,64	
	Известняки (Грузия)	0,40—0,75	
	Песчаники (Казахстан)	0,40—0,75	
	Песчаники (Средняя Азия)	0,44—0,60	
	Алевролиты (Северный Кавказ)	0,50—0,80	
	Аргиллиты (р. Днестр)	0,2—0,3	0,56—0,68
	Аргиллиты (Северный Кавказ)	0,15—0,24	0,45—0,56

П р и м е ч а н и е. По Болгарии использованы данные Л. А. Ярг.

изучается кора выветривания, может выходить на дневную поверхность или быть скрытым под чехлом рыхлых отложений. Исследование строения и свойств пород в пределах коры выветривания возможно, если мощность наносов не превышает 5—10 м. В качестве примера на рис. 59 приведены системы встречных и нагоняющих годографов и построенный по ним разрез коры выветривания. Построенный разрез (см. рис. 59) соответствует пластовому строению коры выветривания, т. е. когда вся обломочная часть коры выветривания разделяется на несколько слоев с примерно постоянными значениями скорости волн в пределах каждого из них. По значениям коэффициента $K = v_v/v_{сокр}$ (отношение скорости волн в данном горизонте коры выветривания к скорости волн в невыветрелой породе) каждый из слоев соответствует горизонтам коры выветривания по классификации Г. С. Золотарева. При обработке сейсмических годографов в случае пластового строения коры выветривания применяются способы, используемые в методике

преломленных волн. Приведенный на рис. 60 разрез соответствует другому случаю — когда скорость упругих волн, а стало быть, и степень выветрелости породы изменяются от дневной поверхности в глубь массива.

При изучении особенностей выветривания определенного комплекса пород на некоторой территории задача может быть поставлена в различных вариантах. Иногда в пределах рас-

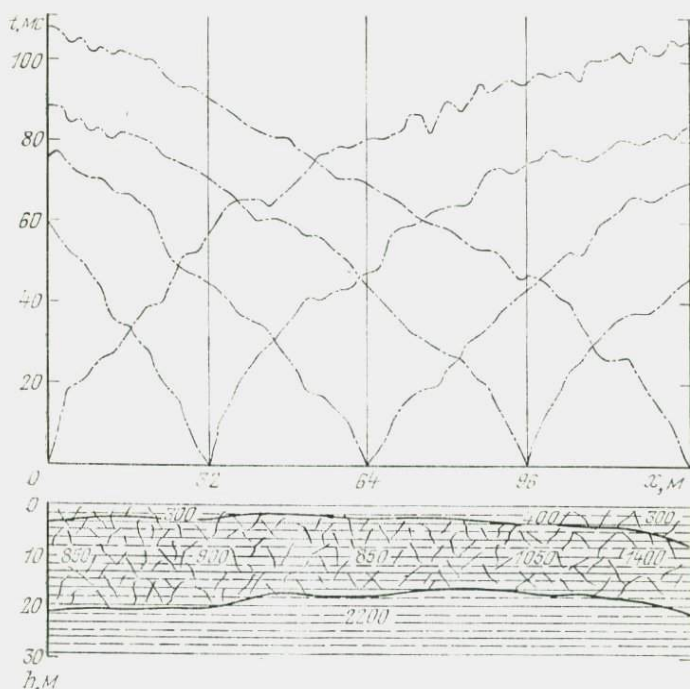


Рис. 59. Строение коры выветривания метаморфических сланцев по данным интерпретации системы годографов продольного сейсмического профилирования (случай пластового строения коры выветривания)

сматриваемой территории достаточно установить общий закон изменения степени выветрелости пород от дневной поверхности в глубину. В таком случае одиночные годографы продольного профилирования, полученные в разных точках участка работ, сводят к одному источнику колебаний, а затем полученное семейство годографов усредняют одной плавной кривой. Обработывая усредненный годограф методами, развитыми для градиентных сред, получают обобщенный график изменения скорости с глубиной.

В отдельных случаях большой интерес представляет не получение обобщенных особенностей строения коры выветривания, а характер ее изменения в пределах изучаемой территории, связь строения коры выветривания в конкретных точках с эле-

ментами рельефа, экспозицией склонов, мощностью рыхлого чехла и т. п. В таких случаях каждый полученный годограф обрабатывают отдельно или получают детальные разрезы коры выветривания вдоль сейсмических профилей, обработанных по полным системам, т. е. с получением встречных и нагоняющих годографов (см. рис. 59, 60).

Особое место в изучении развития кор выветривания занимают повторные режимные наблюдения, проводимые на специ-

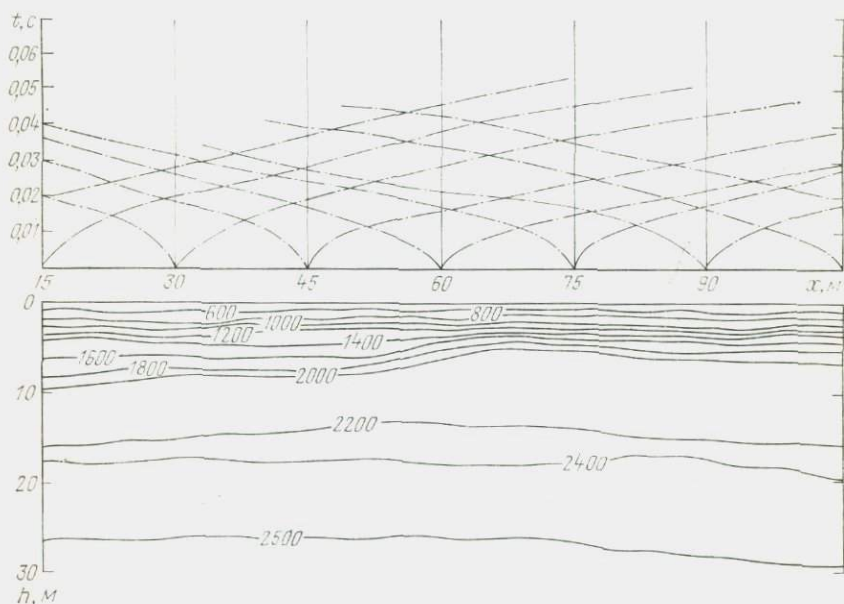


Рис. 60. Строение коры выветривания метаморфических сланцев по данным интерпретации системы годографов продольного профилирования — представление разреза по способу полей скоростей (случай плавного возрастания скорости с глубиной)

альных площадках. Площадки для таких наблюдений должны быть типовыми для изучаемых территорий как в геологическом, так и в ландшафтно-геохимическом плане. Их площадь обычно выбирается в пределах от 10 до 100 м². На площадках проводится широкий комплекс инженерно-геологических исследований, которые затем повторяются через определенные промежутки времени для оценки отдельных, наиболее характерных показателей состава и физико-механических свойств пород. Повторяемость таких наблюдений бывает различной: от ежемесячной до одного раза в год или реже. Подобные наблюдения позволяют повысить надежность количественных оценок скорости выветривания различных типов пород, обнажающихся в пределах изучаемых площадок, оценить неравномерность скорости выветривания пород, а также выяснить особенности воз-

действия на процесс выветривания различных природных и антропогенных факторов. Результаты проведения таких режимных наблюдений в течение 10 лет на площадке, сложенной флишевой толщей меловых пород Черноморского побережья, приведены на рис. 61. При этом, в частности, оказалось возможным оценить скорость выветривания основных типов пород, которая составила (в мм/год): для песчаников 3—7, для мергелей 13—20 и для аргиллитов 26—33. Установлено также, что

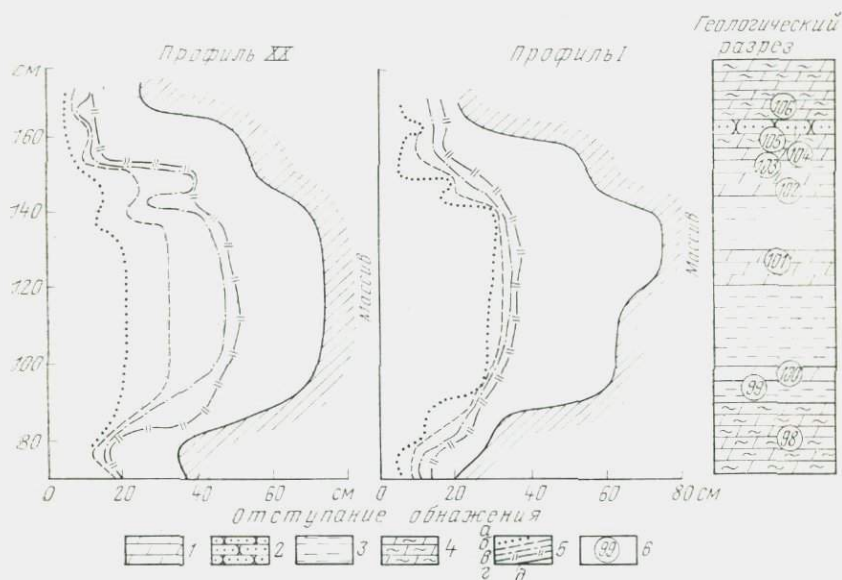


Рис. 61. Оценка скорости выветривания на опытной площадке (вертикальное обнажение) по данным многолетних наблюдений (по С. В. Николаеву, Э. Л. Олферьевой, О. В. Пимкиной):

1 — мергель известковый; 2 — песчаник; 3 — аргиллит; 4 — мергель глинистый; 5 — контуры поверхности опытной площадки в различные периоды наблюдений (а — 1971 г., б — 1972 г., в — 1973 г., г — 1974 г., д — 1982 г.); 6 — места отбора и номера проб

надежную оценку скорости выветривания при этих исследованиях одновременно на нескольких опытных площадках можно получить за три-четыре года наблюдений, при этом мощность слоев различных пород оказывает существенное влияние на скорость выветривания.

Стереофотограмметрический метод изучения выветривания пород

Наряду с описанными выше методами изучения процессов выветривания пород в настоящее время применяются стереометоды, основанные на использовании стереофотограмметрии (см. разделы 10.2 и 11.2).

Съемкой малоформатными камерами и фототеодолитом с близкого расстояния можно установить, как идет процесс выветривания пород и развитие трещиноватости во времени. Более того, можно определить общую и сезонную роль в этом льдообразования по трещинам и наслоениям.

Представляет интерес применение стереофотограмметрии для изучения выветриваемости пород в искусственных обнажениях, особенно когда процесс совершается быстро. Во-первых, метод обеспечивает большую документальность и наглядность в изучении выветривания пород во времени. Во-вторых, удается количественно оценить влияние неоднородностей массива, льдообразования и оттаивания на пространственно-временное протекание в нем выветривания, развитие его от конкретных линий, центров, участков. В-третьих, по усложнению сети трещин выветривания определяется время, с которого начинается осыпание откоса, а в дальнейшем (за годы и сезоны) — и его интенсивность. В последнем случае может быть использована стереомодель вида A_1A_2 и третья новая модель A_1B_2 или A_2B_1 (см. разд. 13.1), на которых разрозненное движение масс (обломков) воспроизводится соответственно как специфическое и вие топографической поверхности объекта.

Эти тенденции выветривания могут быть прослежены с помощью стереометодов и в приустьевых частях штолен, т. е. в разных зонах выветривания. При этом определяется, как мигрируют границы и изменяются мощности зон.

Глава 14

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ И ВОДОПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ МАССИВОВ

Фильтрационные свойства горных пород определяются с целью проведения фильтрационных расчетов для обоснования проектов строительства гидротехнических сооружений и мелиорации земель, оценки эксплуатационных запасов и расчетов водозаборов подземных вод, определения притоков в горные выработки и расчетов системы водопонижения и дренажа, расчетов закачки промышленных стоков в скважины, прогнозов загрязнения подземных вод и т. д. Основными полевыми методами опытно-фильтрационных работ являются опытные откачки из скважин, опытные нагнетания и наливы в скважины и опытные наливы в шурфы.

Разработанная в последнее время методика исследования фильтрационных свойств пород зоны аэрации нагнетанием воздуха в скважины и шурфы, а также геофизические методы исследований охарактеризованы в специальной литературе.

14.1. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Основными параметрами, определяющими фильтрационные свойства горных пород, являются коэффициенты фильтрации и проницаемости, водопроводимости и пьезопроводимости, фильтрационной анизотропии и скорости фильтрации, а также фильтрационное сопротивление русловых отложений.

Коэффициент фильтрации k_{Φ} — это показатель, характеризующий степень водопроницаемости пород и определяющий как скорость фильтрации при гидравлическом градиенте, равном единице.

По закону Дарси

$$k_{\Phi} = \frac{v}{i} = \frac{Q}{FI}. \quad (14.1)$$

При

$$I = 1, \quad k_{\Phi} = V = \frac{Q}{F}, \quad (14.2)$$

где v — скорость фильтрации; I — гидравлический градиент; Q — расход фильтрационного потока; F — площадь поперечного сечения потока.

Проницаемость — это свойство пород пропускать через себя жидкость, газы и смеси при наличии перепада давления. Коэффициент проницаемости C — это расход жидкости вязкостью $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$, фильтрующейся через сечение площадью 1 см^2 при перепаде давления $0,1 \text{ МПа}$, измеряемый в квадратных микрометрах. Связь между коэффициентом фильтрации и коэффициентом проницаемости выражается следующей зависимостью:

$$k_{\Phi} = C\gamma/\eta, \quad (14.3)$$

где γ — плотность жидкости; η — динамическая вязкость жидкости.

Для воды приблизительно можно считать, что коэффициент проницаемости $C = 1 \text{ мкм}^2$ соответствует коэффициенту фильтрации $k_{\Phi} = 1 \text{ м/сут}$.

Коэффициент водопроводимости T равен произведению коэффициента фильтрации k_{Φ} на мощность напорного пласта

$$T = k_{\Phi}m. \quad (14.4)$$

Для безнапорных вод $T = k_{\Phi}h_{\text{ср}}$, где $h_{\text{ср}}$ — средняя мощность водоносного пласта.

Коэффициент водопроводимости T характеризует степень водообильности водоносного пласта и представляет собой единственный расход потока (на 1 м ширины) при $I = 1$. Размерность коэффициента водопроводимости $\text{м}^2/\text{сут}$.

Коэффициент пьезопроводности для напорных вод a или уровнепроводности для безнапорных вод a_y характеризует скорость перераспределения напоров или уровня подземных вод в пласте при неустановившемся режиме фильтрации. В напорном пласте $a = k_{\phi} m / \mu^*$, в безнапорном пласте $a = \frac{k_{\phi} h_{\text{ср}}}{\mu}$, где μ^* — упругая водоотдача пород; μ — гравитационная водоотдача пород. Значения коэффициента уровнепроводности обычно изменяются в пределах 10^2 — 10^4 м²/сут, а коэффициент пьезопроводности — в пределах 10^5 — 10^7 м²/сут.

Фильтрационная анизотропия отражает изменение водопроницаемости пород в различных направлениях. Отношение наименьшего коэффициента фильтрации к наибольшему называют коэффициентом фильтрационной анизотропии λ .

Для слоистых пород $\lambda = \sqrt{\frac{k_{\text{в}}}{k_{\text{г}}}}$, для лёссов $\lambda = \frac{k_{\text{г}}}{k_{\text{в}}}$, где $k_{\text{в}}$ — коэффициент фильтрации пластов в вертикальном направлении; $k_{\text{г}}$ — то же, в горизонтальном.

Суммарное фильтрационное сопротивление русловых отложений ΔL соответствует росту длины потока на величину, эквивалентную сопротивлению русловых отложений.

Удельное водопоглощение q — это величина поглощения воды на 1 м опытного интервала при напоре 1 м.

14.2. ОПЫТНЫЕ ОТКАЧКИ ВОДЫ ИЗ СКВАЖИН

Опытные откачки являются основным видом опытно-фильтрационного опробования пород. По своему назначению и продолжительности они подразделяются на пробные, опытные и опытно-эксплуатационные.

Пробные, или кратковременные (продолжительностью от 2 до 12 ч), откачки проводятся почти во всех разведочных скважинах в ходе позонного их опробования для предварительной оценки фильтрационных свойств водовмещающих пород и качества подземных вод. Они проводятся также для прокачки скважины при отборе проб воды на химический или бактериологический анализы, при очистке скважины от шлама или глинистого раствора, при проверке изоляции после тампонажа и крепления скважины обсадными трубами или установке тампона, при проходке водоносных пород в горных выработках, перед опытными откачками и т. д. К этому типу откачек следует отнести экспресс-откачки (оттартовки) и кратковременные откачки «на слив», т. е. откачки из напорных водоносных горизонтов, когда пьезометрический уровень устанавливается значительно выше устья скважины и не требуется применения насосного оборудования.

Опытные откачки проводят для решения следующих задач: 1) определения основных гидрогеологических параметров

ров водоносных горизонтов и разделяющих слоев; 2) изучения граничных условий водоносных горизонтов в плане и разрезе, взаимосвязи подземных и поверхностных вод, взаимодействия смежных водоносных горизонтов и т. п.; 3) установления зависимости между дебитом скважины и понижением уровня в ней; 4) выяснения величин срезов уровня в пределах действия водозабора или системы водопонижения и др.

Опытные откачки подразделяются на одиночные и кустовые. При помощи одиночных откачек определяются удельные дебиты, коэффициенты фильтрации и водопродовимости пород. Более полные и достоверные данные получаются при проведении опытных кустовых откачек. С их помощью определяются: коэффициенты фильтрации, водопродовимости, пьезо- и уровнепродовимости; гравитационная и упругая водоотдачи; характер формирования депрессионной воронки; фильтрационная анизотропия; степень взаимосвязи между водоносными горизонтами, а при запуске индикаторов в наблюдательные скважины — также и действительные скорости фильтрации. Разновидностью кустовых откачек являются опытные групповые откачки, которые целесообразно проводить для изучения условий взаимосвязи водоносных горизонтов и определения основных гидрогеологических параметров в случае необходимости создания более значительных понижений для повышения точности фильтрационных расчетов и для натурального моделирования условий будущей эксплуатации ряда скважин в различных целях.

Опытные эксплуатационные откачки из одной или нескольких скважин проводятся на стадии детальной разведки в сложных гидрогеологических и гидрохимических условиях с целью установления закономерностей изменения уровней подземных вод или их качества при заданном водоотборе. Обычно такие откачки проводятся на участках проектируемых водозаборов для оценки эксплуатационных запасов подземных вод или расчетов притока воды к строительным котлованам и шахтам и др.

Все методы обработки результатов откачек основаны на решениях уравнений фильтрации при соответствующих граничных и начальных условиях, т. е. при определенной расчетной схеме. Поэтому точность получаемых результатов зависит от правильности выбора расчетной модели опыта, которая зависит от многих факторов. В действующих инструкциях и справочных руководствах все опыты сведены к определенному числу расчетных схем, учитывающих следующие основные факторы: мощность водоносного горизонта, характер его внешних границ в плане и разрезе, степень неоднородности и анизотропности пород, гидравлический тип пласта (напорный, безнапорный), степень и характер вскрытия пласта скважиной и расположение ее рабочей части в нем, режим откачки (установившийся и неуставившийся), организация опытных работ — одиночная или кустовая откачка и т. д.

По степени вскрытия пласта различают совершенные (вскрывающие всю мощность пласта) и несовершенные (прорезающие только часть пласта) скважины.

Опытные интервалы выбираются таким образом, чтобы они характеризовали наиболее распространенные и характерные для данного участка слои пород или неблагоприятные участки и соответствовали определенным схемам, отражающим природные условия на опытном участке. Поэтому при проведении опытных откачек следует учитывать эти условия и фильтры центральных и наблюдательных скважин располагать таким образом, чтобы опыт соответствовал одной из схем, для которых существуют расчетные формулы. При этом следует руководствоваться следующими основными положениями: 1) при мощности пласта до 12 м откачку следует вести из совершенных скважин, вскрывающих всю мощность пласта; 2) в процессе позонного опробования пород длина открытого интервала должна быть равной примерно 5 м в водообильных породах и 2—10 м в средне- и слабопроницаемых; 3) при большой мощности пласта откачку ведут, как из несовершенной скважины. В рабочей части такой скважины в пласте ограниченной мощности (когда она меньше трехкратной длины фильтра $m < 3l$) фильтр должен примыкать к кровле или подошве пласта или располагаться в середине пласта.

При откачке из полуограниченного пласта, когда мощность его больше, чем три длины фильтра ($m \geq 3l$), но кратчайшее расстояние от центра фильтра до одной из границ пласта ($c_1 < 1,5l$), а влиянием второй границы можно пренебречь ($c_2 > 1/5l$), фильтр следует располагать у одной из границ пласта.

При откачке из неограниченного пласта, когда $m > 3l$ и $c \geq 1/5l$ для обеих границ пласта, фильтр следует располагать в середине пласта на расстоянии $c_1 > 1/5l$ и $c_2 > 1,5l$.

При кустовых откачках из несовершенных скважин границей пласта можно пренебречь, если она располагается на расстоянии большем пятикратного расстояния до наблюдательной скважины. В безнапорных пластах первый опыт проводится с незатопленным фильтром. При откачках для определения коэффициента фильтрации нижнего, сильнопроницаемого слоя фильтр устанавливается на всю мощность этого слоя.

При переслаивании маломощных (до 2 м) пластов различной водопроницаемости длина фильтров должна быть примерно равна пятикратной мощности водоносного слоя, а расположение его должно быть таким, чтобы прорезались пачки пород, отражающие основную закономерность в чередовании слоев.

При откачках под руслом реки влиянием реки можно пренебречь, если расстояние верхнего конца фильтра от дна реки $c_p > l/\ln \frac{l}{r}$ (где r — радиус фильтра). Величина эта обычно

не превышает 3 м. Кроме этого, во избежание больших градиентов у верхнего конца фильтра должно соблюдаться условие $s_{\max} < \frac{1}{3} c_p$ (где s_{\max} — максимальное понижение при опытной откачке).

Число и расположение наблюдательных скважин в зависимости от геолого-литологического разреза и граничных условий расчетной схемы намечаются следующим образом.

1. В однородных отложениях можно ограничиться двумя-тремя наблюдательными скважинами, расположенными на одном луче перпендикулярно к естественному потоку подземных вод.

2. Для опробования отдельных слоев большой мощности фильтры в центральной и наблюдательных скважинах располагаются в средней части этих слоев.

3. При двухслойном строении водоносной толщи, когда водопроницаемость верхнего слоя значительно меньше, чем нижнего ($k_2/k_1 > 10$), фильтры центральной и наблюдательных скважин устанавливаются на всю мощность последнего, а фильтры-дублиеры располагаются в верхней части слабопроницаемого слоя.

4. При трехслойном строении водоносной толщи с разделяющим слабопроницаемым слоем фильтр центральной скважины размещается в сильнопроницаемом слое, а наблюдательные скважины — в обоих сильнопроницаемых слоях в виде скважин-дублиеров.

5. В скальных породах наблюдательные скважины располагаются по направлению преобладающей трещиноватости и перпендикулярно к ней, что позволяет оценить анизотропию водоносных слоев в горизонтальном направлении.

6. Для определения фильтрационной анизотропии в вертикальном направлении фильтры наблюдательных скважин располагаются на уровне фильтра центральной скважины, а также выше и ниже его.

7. При расположении опытных кустов вблизи реки для оценки взаимосвязи подземных и поверхностных вод скважины располагаются по двум лучам — перпендикулярно и параллельно к реке. В параллельном луче оборудуются две-три наблюдательные скважины. По этим скважинам определяются параметры пласта. На перпендикулярном луче также располагаются две-три скважины, причем одна из них располагается вблизи уреза реки. На узких реках задается наблюдательная скважина на противоположном берегу. По этому лучу определяются параметры взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

Перед опытной откачкой составляется техническое задание или проект ее проведения. При этом важен обоснованный выбор расчетной схемы откачки, которая лежит в основе технического задания или проекта.

Размещение и длина опытных интервалов в разрезе уточняются после тщательного изучения керна и выяснения литологического состава пород, анализа данных наблюдений за уровнями воды и поглощением промывочной жидкости при бурении, данных каротажа, резистивиметрии, экспресс-опробования и пр. При кустовых опытах число и расположение наблюдательных скважин и глубину установки фильтров следует принимать в зависимости от изменения фильтрационных свойств в пространстве пласта и принятой расчетной схемы. Расстояние между центральной и наблюдательными скважинами следует определять на основе предварительных расчетов с условием, чтобы разность величин понижений уровня воды в соседних наблюдательных скважинах была бы не менее 0,3 м и величина понижения уровня в конце откачки в дальней наблюдательной скважине превышала абсолютную величину возможной погрешности измерения уровня не менее чем в десять раз, т. е. составляла не менее 0,3 м.

Расстояния от наблюдательных скважин r_n до центральной можно определять по полуэмпирической формуле Б. Г. Самсонова

$$r_n = r_1 \alpha^{n-1}, \quad (14.5)$$

где r_1 — расстояние до ближайшей наблюдательной скважины; α — коэффициент для безнапорных вод, равный 1,5, а для напорных — 2,5; n — порядковый номер наблюдательной скважины.

Конструкция опытной и наблюдательных скважин зависит от конечного диаметра скважины, который зависит от условий установки фильтра, глубины залегания и предполагаемого дебита опробуемого водоносного горизонта, необходимой изоляции опробуемого водоносного горизонта, водоподъемного оборудования. В маломощных водоносных горизонтах с ожидаемым дебитом до 1 л/с диаметр водоприемной части скважины должен быть не менее 100 мм, а при большей водообильности скважины — 150—250 мм и более. При выборе диаметра водоприемной части скважины следует учитывать, что в большинстве случаев фильтр оборудуется привязным пьезометром, а при устройстве фильтров с гравийной обсыпкой толщина обсыпки должна составлять не менее 40 мм. В наблюдательных скважинах опытного куста диаметр фильтра обычно равен 60—100 мм. При мощных откачках специального назначения с целью получения значений максимального расхода и большого радиуса депрессионной воронки диаметр опытной скважины может быть увеличен до 800 мм. Для изоляции опробуемого интервала обычно применяются обсадные трубы, посаженные на глинистую или цементную подушку, а при позонном опробовании скальных и полускальных пород — тампоны. При использовании тампонов необходимо учитывать диаметр труб

тампона, обеспечивающий спуск применяемого водоподъемного оборудования. В таких случаях применяются тампоны С-1, спускаемые на трубах (диаметр 127 или 146 мм) или с переходниками, позволяющими вверху увеличивать диаметр труб тампона в соответствии с диаметром скважин. В последнее время применяются видоизмененные тампоны УКН-1М, переоборудованные таким образом, чтобы внутреннюю колонну разжимных штанг после разжатия тампона можно было извлечь на поверхность.

Фильтры устанавливаются в водоносных породах, представленных рыхлыми песчаными и песчано-гравийно-галечниковыми отложениями, а также в слабоустойчивых полускальных и скальных породах для закрепления стенок скважины и свободного пропуска в скважину подземных вод.

Основным элементом фильтра является рабочая часть, которая должна подбираться и устанавливаться в водоносном слое строго по заданию в соответствии с геологическим разрезом и расчетной схемой. Кроме того, обязательным элементом фильтра является отстойник, так как при прокачке и в начальный период откачки могут происходить вынос частиц водоносной породы и оседание их в отстойнике; при этом сохраняется все сечение рабочей части фильтра.

Конструкция фильтров зависит от состава и состояния пород водоносного горизонта и от ожидаемого дебита откачки. Различают фильтры дырчатые, сетчатые, гравийные и специальных конструкций. Фильтры опытных скважин должны иметь скважность (отношение суммарной поверхности проходных отверстий к общей поверхности фильтра) не менее 20 %, а наблюдательных скважин — не менее 5 %.

При наличии фильтра с затрубным или прифильтовым пьезометром во время откачки замеряется динамический уровень как в фильтре, так в пьезометре. Рабочая часть прифильтового пьезометра изготавливается из трубы диаметра 1/2", перфорированной со стороны, обращенной к стенке скважины, и обмотанной латунной сеткой. Выше рабочей части для удобства замера уровня применяются трубы диаметра 3/4", которые соединяются с нижней частью при помощи переходника.

Длина перфорированной части пьезометра должна быть равна рабочей длине фильтра (при длине его до 5 м); при большей длине фильтра рабочая часть пьезометра должна составлять 5 м и размещаться против средней части фильтра. При этом между наружной стенкой фильтра и пьезометром предусматривается зазор (более 20 мм), заполняемый материалом обсыпки или породой опробуемого интервала. Размер зерен обсыпки зависит от гранулометрического состава пород водоносного пласта. Средний диаметр зерен обсыпки должен примерно в 10 раз превышать средний размер зерен опробуемого интервала. Необходимый минимальный объем материала обсыпки V

при этом подсчитывается по формуле

$$V = \frac{\pi}{4} (d_{\text{скв}}^2 - d_{\text{ф}}^2) [l + (a + 1)], \quad (14.6)$$

где $d_{\text{скв}}$ — диаметр водоприемной части скважины; $d_{\text{ф}}$ — внешний диаметр фильтра; l — длина рабочей части фильтра; a — расстояние от верхнего конца рабочей части фильтра до башмака обсадных труб (ближайших).

Обсыпка фильтров в скважине производится отдельными порциями, заполняющими пространство высотой 1,0—1,5 м, обычно через колонну вспомогательных труб с одновременным постепенным подъемом обсадных труб не более чем на 0,6 м. Необходимо соблюдать условие, чтобы, с одной стороны, не допускать обрушения стенки скважины, а с другой — предотвратить возможность заклинивания обсадных труб с фильтром при чрезмерной порции обсыпки, что может повлечь за собой подъем обсадных труб с фильтровой колонной на поверхность и вынужденное разбуривание скважины.

В гравийно-галечниковых грунтах с содержанием песчаных частиц диаметром меньше 0,5 мм менее 10 % (по массе) применяются фильтры без гравийной обсыпки. Длина фильтровой колонны, а также всех обсадных труб подбирается так, чтобы после оборудования опытной скважины к откачке верх их выступал над основанием бурового станка не больше чем на 0,5 м. Для этого используются короткие патрубки длиной 0,5—1,5 м.

Для откачек применяются эрлифты, электропогружные, центробежные, поршневые, водоструйные и штанговые насосы. При измерении дебита чаще всего используются протарированные мерные емкости, объем которых выбирают в зависимости от ожидаемого дебита откачки с таким расчетом, чтобы емкость заполнялась водой не менее 30 с.

Для замеров дебита применяются также протарированные водомеры и водосливы. При измерении уровней воды в скважинах применяются электроуровнемеры ЭУ-75 и ЭУ-200, хлопушки, гидрорюлетки с хлопушкой, дисковые уровнемеры, реже уровнемеры ВСЕГИНГЕО барабанного типа (УВБ) и самописцы для непрерывной автоматической записи уровня. Желательно, чтобы опытные участки были обеспечены автоматической системой измерений. При откачке вблизи водоема в нем должна быть установлена водомерная рейка. По окончании подготовительных работ и при наличии всего необходимого для опыта оборудования приступают к прокачке.

Следует помнить, что позонное опробование скважин опытными откачками, как правило, производится способом «сверху вниз» в ходе проходки скважины.

В процессе проходки скважин отбирают валовые пробы для лабораторного определения гранулометрического состава рыхлых отложений, их коэффициента фильтрации, неоднородности

и т. д. Коэффициент фильтрации рыхлых отложений ориентировочно можно определить по гранулометрическому составу (по формулам Крюгера, Павчича, Милихикера и др.). Для сопоставления опытных и лабораторных данных пробы грунта отбирают из опытных интервалов через каждый метр проходки скважины.

Опытные откачки обычно проводятся при одном постоянном расходе в течение всего опыта и изменяющемся во времени понижении уровня. Такой ход опыта упрощает обработку и увеличивает надежность получаемых результатов. При самоизливе воды из скважин опытный слив, или так называемый выпуск, наоборот, производится при одном понижении на отметке слива и изменяющемся во времени расходе. Постоянный динамический уровень или постоянное понижение поддерживаются также при откачках поверхностным или штанговым насосом «на храл», когда с откачиваемой водой засасывается воздух, создающий характерный звук, указывающий на то, что динамический уровень находится на отметке низа водоподъемной трубы. В этих случаях происходит снижение расхода во времени.

Откачки при нескольких понижениях и расходах проводятся только для построения кривой дебита в разведочно-эксплуатационных скважинах. В большинстве случаев для этого достаточно двух понижений, а в безнапорных трещиноватых породах — трех.

Для получения достоверных параметров, величина понижения уровня при откачке на одно понижение должна быть не менее 3 м. При откачках на два и три понижения минимальное из них и разница между ними должны быть не менее 1 м.

Откачиваемая в процессе опыта вода отводится от опытной скважины на расстояние, превышающее радиус влияния откачки, или сбрасывается в ближайший водоток.

Формирование депрессионной воронки, фиксируемое ходом снижения уровней в процессе откачки, весьма сложно, так как оно зависит от ряда факторов, главными из которых является осушение пласта в безнапорных горизонтах или влияние упругого режима в напорных пластах. В начальный период откачки наблюдается неустановившийся режим фильтрации, который через определенный промежуток времени переходит в квазистановившийся, когда депрессионная кривая перемещается во времени параллельно самой себе.

При расположении опытной скважины вблизи реки (за счет питания из реки) и в многослойной среде (вследствие перетока из смежных водоносных горизонтов) через некоторый период после начала откачки наступает установившийся режим фильтрации, когда расход и понижение уровня постоянны во времени. Такой режим наблюдается также при откачках из несовершенных скважин с короткими фильтрами за счет притока из выше- и нижележащей частей водоносного горизонта.

В состав опытной откачки входит прокачка скважины, восстановление уровней до статического, повторные откачка и восстановление уровней до статического.

Прокачку в условиях рыхлых пород следует начинать с минимальных расходов, т. е. насос должен включаться при почти закрытой задвижке Лудло, которая в ходе прокачки постепенно открывается с целью устранения кольматации фильтра. Прокачка ведется при максимальном дебите до полного осветления откачиваемой воды и обычно продолжается от 3 до 12 ч.

По окончании прокачки наблюдают за восстановлением уровней воды до полной их стабилизации. Если опыт ведется вблизи реки или в ее русле, проводится опытная откачка в период относительной стабилизации уровня воды в реке. Если в период откачки наблюдаются колебания воды в реке, то все замеры уровня воды в скважинах корректируются. Для этого наблюдения за срезкой уровня ведутся в скважине, расположенной в аналогичных условиях за пределами влияния опытной откачки. Для расчета гидрогеологических параметров в начальный период откачки (примерно 0,5—1 ч) замеры уровней ведутся через 1—3 мин, затем интервал между наблюдениями увеличивается до 5—10 мин и после достижения разности уровней воды между очередными замерами примерно 3—5 см замеры проводятся через 0,5—1 ч. После стабилизации расходов и уровней измерения проводятся через 1—2 ч.

Наблюдения за уровнем воды в центральной и наблюдательных скважинах куста и определение расхода производятся последовательно через одинаковые промежутки времени между замерами. Продолжительность опыта определяется видом и задачами откачки и гидрогеологическими условиями участка опробования. Длительность опытных одиночных откачек составляет обычно от 6 до 12 смен.

При проведении позонных опытных откачек и построении кривой дебита $Q=f(s)$ продолжительность каждого понижения может быть сокращена до двух смен. Это определяется тем, что при небольшой длине опытного интервала за счет перетока из выше- и нижележащей частей пласта сравнительно быстро наступает установившийся режим фильтрации.

Продолжительность кустовой откачки определяется обеспечением достаточного понижения уровня в дальних наблюдательных скважинах и достижением в них режима, необходимого для правильной интерпретации графиков временного прослеживания уровней $s=f(lgf)$. Такие графики строятся в процессе опыта на полулогарифмической бумаге, где на оси абсцисс откладываются логарифмы времени от начала откачки, а на оси ординат — понижения уровня.

Ход изменения уровней при откачке зависит от геологического строения и гидрогеологических условий участка опытного куста.

Ниже рассматриваются примеры длительной кустовой откачки в типовых гидрогеологических условиях.

На рис. 62, *a* показан ход изменения уровней при откачке из напорного однородного пласта. На графике выделяются три участка. На участке *I* опытные точки не ложатся на прямую линию, так как они соответствуют начальному, неустановившемуся режиму фильтрации. На участке *III* происходит отклонение графика от прямой линии, что обычно связано с влиянием границ пласта. При наличии влияния водоупорной границы, график отклоняется вверх от прямой. Если границей пласта является река, то график выполаживается. На участке *II* точки ложатся на прямую линию, что соответствует так называемому квазистационарному (квазистационарному) режиму фильтрации.

Время наступления квазистационарного режима t_k определяется по формуле $t_k = 2,5 \cdot r^2/a$ (где r — расстояние до наблюдательной скважины; a — коэффициент проницаемости, принимающийся по аналогии).

Для получения предельно прямолинейного участка *II* время откачки должно быть не менее пятикратного периода квазистационарного режима $t \geq 5t_k$. Если, например, принять $r = 100$ м, $a = 10^4$ м²/сут, то $t_k = \frac{2,5 \cdot 100^2}{10^4} = 2,5$ сут. Следовательно, продолжительность кустовой откачки должна быть порядка 12,5 сут. Если t_k получается меньше суток, то его рекомендуется принять равным суткам и опыт продолжать не менее 5 сут.

Установлено, что период наступления квазистационарного режима в напорных горизонтах при расстоянии наблюдательных скважин до 100 м от центральной не превышает суток, а при расстоянии до 500 м — достигает нескольких суток.

На рис. 62, *б* показан ход снижения уровня в наблюдательных скважинах при откачке вблизи реки. На графике $s=f(\lg t)$ также выделяются три участка. Участок *I* соответствует периоду откачки, когда река еще не влияет на ход снижения уровней в опробуемом пласте. Участок *II* отвечает времени, когда влияние реки увеличивается; длительность этого периода определяется главным образом степенью несовершенства связи реки с опробуемым пластом. И наконец, участок *III* соответствует условию установившегося режима, когда отбор воды из скважины компенсируется притоком из реки. Таким образом, при определении длительности кустовой откачки вблизи реки следует учитывать, что установившийся режим должен выдер-

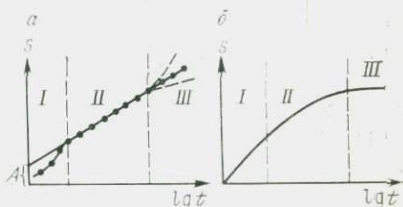


Рис. 62. Закономерности изменения уровня при откачке в типовых гидрогеологических условиях:

a — напорный однородный пласт; *б* — откачки вблизи реки

живаться в течение не менее одной трети от общей продолжительности откачки.

При кустовых откачках из трещиноватых скальных пород форма графиков $s=f(\lg t)$ обусловлена главным образом влиянием эффекта двойной пористости, связанного с наличием крупных трещин и пустот, обеспечивающих основной приток воды к скважине в начальный период откачки, и более мелких трещин, определяющих общую водопроницаемость породы в последующие периоды откачки. На графике $s=f(\lg t)$ также выделяются три участка, причем расчетным является участок II, характеризующий усредненные фильтрационные и емкостные свойства трещиноватых скальных пород.

Примерная продолжительность опытных кустовых откачек обычно составляет: а) при опробовании рыхлых песчаных пород в напорных условиях — 6—8 сут, в безнапорных условиях — 8—10 сут; б) при опробовании трещиноватых пород, а также при определении параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод — 10—12 сут и более; в) при откачках в двухслойной среде с менее водопроницаемым верхним слоем 10—12 сут, а в трехслойной среде с мощностью разделяющего слоя до 10 м — 15—20 сут. Последние проводятся по специальному заданию для оценки условий перетекания. Для контроля хода опыта и установления продолжительности откачки строятся графики: $Q=f(t)$, $s=f(t)$, $s=f(\lg t)$, а в случае необходимости при кустовых откачках — $s=f(\lg r)$ и $s=f \times \left(\lg \frac{t}{r^2}\right)$.

Опытная откачка должна вестись без перерыва. Для изучения химического и бактериологического состава подземных вод отбор проб воды батометром следует производить в начале и в конце опыта. В ходе откачки два-три раза в смену должны проводиться замеры температуры воды и воздуха. При откачке из скважин, расположенных в русле или вблизи реки, в водоеме также измеряется температура и отбираются пробы воды.

После окончания откачки проводят наблюдения за восстановлением уровней воды до статического в центральной скважине, в прифильтровом пьезометре и во всех наблюдательных скважинах опытного куста, а также в наблюдаемых инженерно-геологических скважинах. Уровни считаются восстановленными, если в течение суток они повысились не более чем на 1 см.

По данным восстановления уровней как при одиночных, так и кустовых откачках рассчитываются гидрогеологические параметры (k_f , k_m , a , μ), поэтому наблюдения за восстановлением уровня должны вестись с особой тщательностью и с той же частотой, как и при прослеживании уровня в процессе откачки. Обработка результатов опытных откачек ведется на сводных листах, макеты которых приведены в ГОСТ 23278—78.

Гидрогеологические параметры по данным опытных откачек рассчитывают различными способами: для установившегося ре-

жима — по формуле Дюпюи для совершенных скважин и с поправкой Н. Н. Веригина для несовершенных скважин; в условиях неустановившегося режима — графоаналитическим, эталонной кривой произвольных точек, характерных точек и др. Наибольшее распространение имеют графоаналитические методы, базирующиеся на логарифмическом законе изменения понижения во времени, соответствующего квазистационарному режиму фильтрации способами временного, площадного и комбинированного прослеживания [4].

14.3. ИЗУЧЕНИЕ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ СКАЛЬНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ОПЫТНЫХ НАГНЕТАНИЙ ВОДЫ В СКВАЖИНЫ

Опытные нагнетания воды в буровые скважины являются одним из наиболее распространенных гидравлических методов изучения проницаемости скальных и полускальных пород, что связано с относительной простотой этих опытов, а также возможностью применять их для изучения не только водоносных, но и необводненных пород. Нагнетания позволяют получить данные об относительной водопроницаемости пород, характеризуемой величинами удельного водопоглощения q и приведенного расхода Q_p . Под удельным водопоглощением понимается расход воды, поглощаемой скважиной на 1 м длины опробуемого интервала при напоре, равном 1 м,

$$q = Q/(lH), \quad (14.7)$$

где l — длина интервала нагнетания; H — напор над статическим уровнем воды в опробуемом интервале (в сухих интервалах — над серединой интервала). Размерность удельного водопоглощения выражается в л/(мин·м²), однако на практике для упрощения применяется обозначение л/мин.

Приведенный расход представляет собой расход воды на 1 м длины опытного интервала при напоре 100 м, выдержанном в течение 10 мин. Приведенный расход вычисляют по формуле

$$Q_p = Q_{100}/l,$$

где Q_{100} — расход воды, поглощаемой интервалом скважины; l — длина опробуемого интервала. Приведенный расход выражается в л/мин или практически аналогичным показателем, используемым за рубежом, — люжоном (1 л/мин = 1 люжон).

По величине удельного водопоглощения оценивается относительная водопроницаемость скальных и полускальных пород. При проектировании противофильтрационных завес для оценки необходимости и условий выполнения инъекционного уплотнения пород используется величина приведенного расхода.

Для изучения водопроницаемости трещиноватых скальных пород применяются различные методы гидравлического опробования: опытные откачки, нагнетания и наливки воды в сква-

жины, а также нагнетание воздуха и некоторые геофизические методы. Из гидравлических методов наиболее широкое распространение получили опытные нагнетания воды. По сравнению с откачками метод опытных нагнетаний имеет и ряд недостатков:

при откачке вода, поступая из породы в скважину, промывает и расширяет пути фильтрации в приинтервальной зоне, закольматированной буровым шламом, а при нагнетаниях, когда фильтрация происходит в обратном направлении, раскольматации трещин не происходит, что влечет за собой преуменьшение показателей водопроницаемости;

напоры, создаваемые при нагнетаниях, как правило, несравненно больше, чем понижения при откачках, поэтому в приинтервальной зоне при нагнетаниях может увеличиться ширина отдельных трещин в породе, что вызовет изменение ее фильтрационных свойств;

нагнетаниями можно охарактеризовать лишь относительную водопроницаемость горных пород, но нельзя получить необходимый для различных фильтрационных расчетов показатель водопроницаемости — коэффициент фильтрации;

методика расчета удельного водопоглощения имеет обоснованную гидравлическую схему только для нагнетаний в водонесные породы, когда действующий напор точно определяется высотой столба воды (создаваемого при опыте над статическим уровнем подземных вод), замеренного в опробуемом интервале скважины. При нагнетаниях в неоднородные породы напор является величиной неопределенной и за начало его отсчета в этом случае условно принимают горизонтальную плоскость, проведенную через середину опробуемого интервала скважины.

Таким образом, данные о водопроницаемости пород, полученные методом опытных нагнетаний, в значительной мере условны и могут быть использованы в основном для оценки степени фильтрационной неоднородности скального массива. Для получения характеристики абсолютной водопроницаемости массива, необходимой для различных фильтрационных расчетов, и установления коррелятивной связи между q и k_f на каждом объекте проводятся совмещенные опыты — нагнетания и откачки в одних и тех же интервалах. Число их в пределах каждого гидрогеологического элемента изучаемого скального массива должно обеспечивать возможность статистической и графической обработки полученных результатов. Выполнение совмещенных опытов целесообразно в породах средней водопроницаемости с $q=0,1-1,0$ л/мин. В слабопроницаемых породах разброс точек на графиках связи q и k_f очень велик и не соответствует природе этих величин. Опыты проводятся в специально выделенных скважинах или выборочно в отдельных их интервалах. Каждый опыт состоит из трех циклов: опытное нагнетание, опытная откачка, повторное опытное нагнетание. Сравнение результатов первого и повторного нагнетаний поз-

воляет оценить влияние зашламованности стенок скважины при бурении на результаты нагнетаний и учесть его при анализе результатов массового опробования. По результатам совмещенных опытов строится в логарифмическом масштабе график связи коэффициента фильтрации с удельным водопоглощением (рис. 63), который используется для перехода от значений q к значениям k_f для данного типа пород. Там, где совмещенные опыты не производились, при подборе расчетных значений коэффициента фильтрации можно использовать в качестве аналогов графики связи, составленные для сходных геологических условий.

Нагнетания проводятся в изолированные тампоном интервалы вертикальных и наклонных скважин. В процессе нагнетания поддерживается постоянный напор над верхней границей опробуемого интервала в сухих породах и над статическим уровнем воды в опробуемом интервале в обводненных породах. Поддерживаемый во время опыта уровень воды в опытном интервале при этом может находиться выше или ниже устья скважины. В первом случае избыточный напор над устьем скважины замеряется манометром, во втором — для замеров напора используются электроуровнемеры.

Для определения величин q опытные нагнетания выполняются с напором 10 м водяного столба, Q_n определяется по результатам нагнетаний с напором 100 м, которые следует проводить в скважинах, расположенных на участках вероятного расположения противofильтрационных завес, начиная с глубин, ниже которых не могут происходить расширение трещин под воздействием приложенного напора и прорыв нагнетаемой воды на земную поверхность.

С целью уменьшения влияния кольматации прискважинной зоны буровым шламом на результаты опытов нагнетания в скважине проводят способом «сверху вниз», т. е. по мере ее углубления. В порядке исключения при специальном обосновании допускается поинтервальное опробование нагнетаниями уже пройденных скважин восходящими интервалами «снизу вверх» с последовательной цементацией опробованных интервалов или с изоляцией их при помощи двойных тампонов.

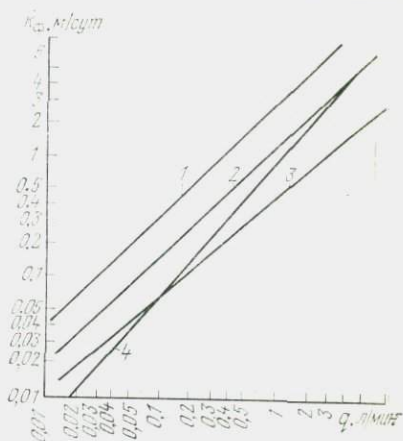


Рис. 63. Графики связи коэффициента фильтрации k_f и удельного водопоглощения q для различных пород:

1 — диабазы (Братская ГЭС); 2 — кристаллические сланцы (Саяно-Шушенская ГЭС); 3 — известняки (Токтогульская ГЭС); 4 — переслаивание песчаников и алевролитов (Нурекская и Курпсайская ГЭС)

для замеров напора используются электроуровнемеры.

Опробуемый интервал скважины должен быть полностью расположен в обводненных или необводненных породах. Желательно, чтобы он находился в пределах пород, более или менее однородных по характеру водопроницаемости, что определяется однородностью их литологического состава, трещиноватости, кавернозности, выветрелости и прочими признаками. Опробование в одном интервале пород, резко отличающихся по водопроницаемости (например, известняк и глинистый сланец), проводят только в том случае, если изучение зоны контакта этих пород представляет самостоятельный интерес.

В наклонных скважинах интервалы, примыкающие к зеркалу грунтовых вод, нагнетаниями не опробуются, так как вследствие влияния границы раздела между водоносными и необводненными породами результаты нагнетаний в таких условиях несопоставимы с результатами нагнетаний в соответствующие интервалы вертикальных скважин.

Сравнимые величины поглощения воды на единицу длины интервала могут быть получены лишь в том случае, если длина его постоянна во всех скважинах и на всех глубинах. Принятая в практике изысканий стандартная длина интервала 5 м дает достаточно дифференцированную характеристику изменения трещиноватости и водопроницаемости пород. При очень слабой водопроницаемости исследуемых пород, когда по нескольким скважинам установлено, что удельное водопоглощение их не превышает 0,01 л/мин, длина опытного интервала может быть увеличена до 10 м. В отдельных случаях при выявлении зон повышенной водопроницаемости или отдельных открытых трещин длина интервала может быть уменьшена до 1 м.

В сильно разрушенных породах, в которых не удается добиться удовлетворительной изоляции интервала тампоном при способе опробования «сверху вниз», на участке установки тампона применяется предварительное цементирование ствола скважины. В крайних случаях возможно опробование нарастающим интервалом, с тампоном, устанавливаемым на одной глубине, и увеличивающейся глубиной скважины. Ниже приводится примерный ход подготовки и проведения опытного нагнетания.

После очистки опытного интервала скважины от шлама и промывки до полного осветления воды производится сборка и установка тампона в скважину на намеченную глубину. После надежного разжатия тампона восстанавливается уровень воды в опробуемом интервале и в стволе скважины над тампоном. Затем собирают распределительное устройство (рис. 64) и проводят пробное нагнетание продолжительностью 10—15 мин с напором 10 м для проверки качества изоляции опытного интервала, герметичности соединений и работы системы водоснабжения. Изоляция опытного интервала считается удовлетворительной, если во время пробного нагнетания уровень над тампоном не поднимается или его подъем к концу пробного

нагнетания не превышает 0,2 м. В случае некачественной изоляции производят доразжатие тампона. Если и после этого интервал изолирован недостаточно, тампон следует переставить на 0,5—1,0 м вверх или вниз по стволу скважины и повторить пробное нагнетание.

В сильно разрушенных породах для обеспечения изоляции интервала на участке установки тампона заблаговременно

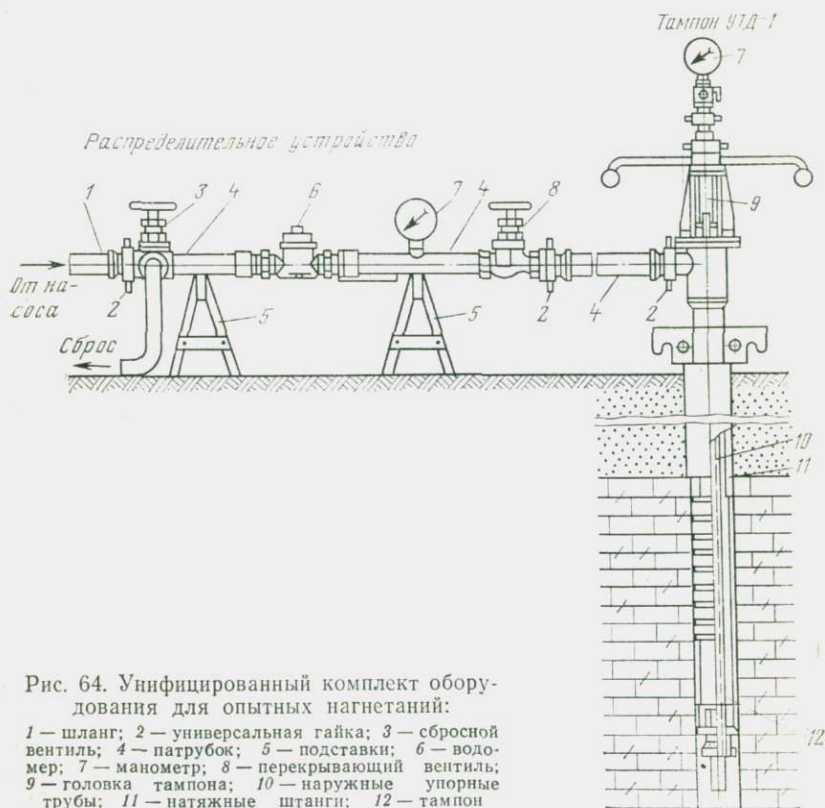


Рис. 64. Унифицированный комплект оборудования для опытных нагнетаний:

1 — шланг; 2 — универсальная гайка; 3 — сбросной вентиль; 4 — патрубок; 5 — подставки; 6 — водомер; 7 — манометр; 8 — перекрывающий вентиль; 9 — головка тампона; 10 — наружные упорные трубы; 11 — натяжные штанги; 12 — тампон

устраивается цементный пояс или применяются гидравлические и пневматические тампоны. Сразу после пробного нагнетания и установления статического уровня в опытном интервале приступают к опытному нагнетанию воды в скважину. При проведении нагнетаний необходимо соблюдать следующие общие условия:

вода для нагнетаний не должна содержать взвешенных минеральных и органических частиц и по возможности должна быть близкой по температуре и химическому составу к воде водоносного горизонта;

показания манометра при измеряемом напоре должны находиться в средней части его шкалы, пользоваться первой и

последней четвертями шкалы не рекомендуется, так как погрешность замера здесь может значительно превышать допустимую;

водомер для измерения расхода воды следует выбирать в соответствии с порогом чувствительности, при малых поглощениях воды (до 10 л/мин) замеры расхода необходимо производить с помощью водомерных баков;

во избежание скопления в головке тампона воздуха, искажающего показания манометра, необходимо в начале нагнетания держать воздушный кран открытым, а затем в процессе опыта периодически открывать его и выпускать воздух. При отсутствии воздушного крана для выпуска воздуха обычно отвинчивают манометр и держат его в таком положении до тех пор, пока из-под резьбы не пойдет вода, после чего манометр завинчивают до отказа;

обязательно проводится контроль надежности изоляции опытного интервала во время опыта путем замера уровня воды в затрубном пространстве над тампоном в начале, в середине и в конце каждой ступени напора.

Действующий напор в опытном интервале скважины измеряется в обводненных породах от статического уровня воды, а в сухом интервале — от его середины. Величина напора выражается в метрах. При производстве опытного нагнетания с избыточным напором (с манометром) действующий напор в опытном интервале определяется суммированием показания манометра с высотой столба воды от статического уровня до шейки манометра. В необводненных породах показания манометра складываются с расстоянием от середины опробуемого интервала до шейки манометра.

В наклонных скважинах высоту h столба воды над статическим уровнем (или над серединой интервала в необводненных породах) вычисляют с учетом угла наклона скважины по формуле $h = h_n \sin \alpha$ (где h_n — длина столба воды в наклонном стволе скважины; α — угол наклона скважины к горизонту).

Нагнетания для определения величины удельного водопоглощения выполняются при одной ступени напора 10 м. Продолжительность этих опытов при установившемся расходе составляет 30 мин в обычных условиях и 2 ч в фильтрационно неустойчивых породах (доломитах с доломитовой мукой, сильно закарстованных известняках, галогенных породах и пр.). Замеры расхода воды производятся через каждые 5—10 мин.

В скважинах, проходимых в пределах зоны вероятного расположения противofильтрационных устройств, нагнетания выполняются при трех ступенях напора 10, 100 и 10 м. Если напор воды 100 м не может быть достигнут, то нагнетание допускается проводить при меньшем напоре, но не менее 50 м. Величину расхода воды при напоре 100 м в этом случае следует определять путем линейной экстраполяции величины расхода при фактическом напоре. Продолжительность опыта на первой ста-

дии такая же, как в одноступенчатых опытах, а на второй — 10 мин. За расчетную величину расхода на второй ступени напора принимается средний расход за это время. Третья ступень опыта проводится в течение 30 мин, ее данные позволяют определить фильтрационную устойчивость пород и заполнителя трещин и полостей. Замеры расхода воды производятся через каждые 5—10 мин при первой и третьей ступенях напора и через 2—3 мин — при второй. Нагнетание на заданной ступени напора производится непрерывно. Переход от одной ступени к другой должен производиться без перерыва, за исключением коротких остановок для замены манометров.

После окончания нагнетания в случае излива воды из труб тампона проводят наблюдения за расходом изливающейся воды до прекращения излива. Для своевременного контроля за ходом нагнетания и установления продолжительности его на каждой ступени напора строятся графики изменения расхода и напора во времени. По результатам опыта рассчитывают величины удельного водопоглощения и приведенного расхода.

Для определения k_{ϕ} необводненных крупнообломочных и песчаных грунтов, а также скальных и полускальных пород в случае, когда нельзя провести опытные нагнетания из-за невозможности установки тампона, выполняются опытные наливы воды в скважины по методу В. М. Насберга. При наливах в скважины (в отличие от нагнетаний) динамический уровень воды во время опыта поддерживается у верха опробуемого интервала. При проведении опытного налива желательно, чтобы высота столба воды в скважине не превышала расстояния от низа опробуемого интервала до уровня подземных вод (или до кровли водоупора), а длина интервала была больше диаметра скважины или фильтра в 25—100 раз.

Наливы проводят при постоянном столбе воды в опытном интервале и при установившемся расходе в течение 30 мин в обычных условиях и 2 ч в фильтрационно неустойчивых породах. Для наливов применяют только чистую воду.

Коэффициент фильтрации k_{ϕ} вычисляют по формуле

$$k_{\phi} = 0,423 \frac{Q}{h^2} 1g \frac{2h}{r}, \quad (14.8)$$

где r — радиус скважины (или фильтра).

14.4. ОПЫТНЫЕ НАЛИВЫ В ШУРФЫ

Опытные наливы в шурфы применяются для определения водопроницаемости однородных по литологическому составу и плотности грунтов, залегающих выше уровня грунтовых вод (УГВ) в зоне неполного водонасыщения пород (в зоне аэрации). Для проведения опыта в дне шурфа проходится зумпф, в нем устанавливается одно или два металлических кольца, в кото-

рые наливается вода и поддерживается постоянный или переменный напор. Наливаемая вода под действием гравитационных и капиллярных сил инфильтруется в породу, вытесняет из нее воздух и движется по порам, каналам и трещинам в глубь массива. Основными факторами, усложняющими инфильтрацию воды и обработку результатов опытного налива, являются защемление воздуха в порах грунта и боковое растекание воды, обусловленное действием капиллярных сил.

Строгое решение задачи инфильтрации воды в зоне аэрации с учетом действия капиллярных сил и защемления воздуха дано Н. К. Гириным. Однако в связи с трудностью учета этих факторов, а также неоднородностью строения пород определяемые параметры являются приближенными.

В практике изысканий широкое применение получили опытные наливы воды в шурфы по способу А. К. Болдырева и Н. С. Нестерова. В основу их положена предпосылка, что инфильтрация воды в сухой грунт происходит только вертикально вниз через площадь учетного кольца. При этом растекание воды под действием капиллярных сил и влияние защемленного воздуха не учитываются, так как оба фактора действуют в противоположном направлении — растекание завывает, а защемленный воздух занижает расход на инфильтрацию из зумпфа. Опыты ведутся при постоянном напоре до стабилизации расходов, и коэффициент фильтрации рассчитывают исходя из условий установившегося режима фильтрации. При этом глубина промачивания не должна достигать капиллярной каймы грунтовых вод или границы грунта с иной водопроницаемостью.

Н. Н. Биндеман на основании решения уравнения Ф. Цункера, описывающего вертикальное неустановившееся просачивание воды, разработал способ, позволяющий кроме коэффициента фильтрации определять недостаток насыщения и высоту капиллярного давления. Н. Н. Веригин на основании решения того же уравнения предложил способ определения коэффициента фильтрации при мгновенном наливе со свободным понижением уровня или с постоянным расходом.

В. В. Бадов, используя решение Н. К. Гирицкого и учитывая изменение скорости инфильтрации во времени, предложил способ, позволяющий определять k_f грунта при неоднородном строении по вертикали и при глубине залегания грунтовых вод менее 3 м. Способы обработки опытов с учетом неустановившегося режима фильтрации позволяют также сократить продолжительность опытных наливов в шурфы. В зависимости от состава исследуемых пород и назначения опытов применяются различные способы проведения наливов в шурфы и расчетов гидрогеологических параметров.

Ниже приводится краткое описание методики проведения опытов и расчетов коэффициента фильтрации по способам А. К. Болдырева и Н. С. Нестерова при установившемся режиме фильтрации и расчетов параметров по Н. Н. Биндеману

и В. В. Бадову, учитывающих неустановившийся режим фильтрации. Методика расчетов по способам Н. Н. Веригина и Н. К. Гириного приводится в работах [10, 35].

Расчет фильтрационных параметров при установившемся режиме фильтрации

Способ А. К. Болдырева. Налив воды в шурф по этому способу производится в одно кольцо без учета влияния капиллярных сил. В связи с этим он может применяться только в породах с незначительной высотой капиллярного давления (средне- и крупнозернистые пески, гравийно-галечниковые отложения и трещиноватые полускальные и скальные породы). Для наливов в песчаные породы используется кольцо диаметром 35—50 см и высотой 20—25 см, задавливаемое в дно зумпфа не более чем на 2,5 см. Если диаметр кольца принять равным 35,7 см, то площадь его поперечного сечения составит 1000 см² (или 0,1 м²). Для предотвращения фильтрации воды через стенки зумпфа пространство за кольцом утрамбовывается влажной глиной или суглинком. Чтобы предохранить грунт от размыва и заиления, дно зумпфа засыпают слоем (2—3 см) мелкого гравия. Для наблюдения за уровнем воды в кольце к стенке его прикрепляют рейку высотой 10 см с нулевой отметкой на дне зумпфа. Опыты проводятся при постоянном напоре, равном 10 см над дном зумпфа, и колебаниях уровня не более 1 см. Подача воды в зумпф и поддержание постоянного уровня в кольце производится из специальных баков с автоматическим регулятором уровня.

Для опыта используется только чистая вода, так как взвешенные частицы заиливают дно зумпфа, снижают расходы и, как следствие этого, приводят к уменьшению водопроницаемости опробуемого грунта. Расходы воды регистрируют через каждые 10—15 мин в течение первых двух часов, а затем интервалы между замерами увеличиваются до 20—30 мин. По данным опыта строится график зависимости $Q=f(t)$. Опыт заканчивается, когда расходы воды отличаются от среднего не более чем на 10 % на протяжении 4—6 час. Общая продолжительность опыта 10—12 ч.

В скальных и полускальных породах, а также при опробовании валунно-галечниковых отложений опытный налив следует вести на всю площадь дна шурфа или шахты, а в штольне выбирать участки длиной 3—5 м по всей подошве штольни. При опробовании крупновалунных образований, залегающих близко к дневной поверхности, опытные наливы целесообразно проводить на площадках сечением 3×3 м и более (примерно в пять раз больше, чем площадь отдельных валунов). Чтобы исключить фильтрацию воды в стенки, по периметру площадки проходится канава глубиной 20—30 см, которая заполняется утрамбованной глиной на 0,2 м выше поверхности площадки. При

большом поглощении бесперебойная подача воды производится насосом, устанавливаемым на ближайшем водотоке, а расход воды замеряется водомером. Коэффициент фильтрации рассчитывается по формуле

$$k_{\phi} = Q/F, \quad (14.9)$$

где Q — установившийся расход; F — площадь учетного кольца, или дна зумпфа, или опытной площадки.

Если стенки зумпфа закрыты и фильтрация происходит только через дно зумпфа, то

$$F = \pi d^2/4. \quad (14.10)$$

Если стенки зумпфа открыты и фильтрация происходит помимо дна зумпфа через его стенки, то

$$F = (\pi d^2/4) + \pi d h_0, \quad (14.11)$$

где d — диаметр зумпфа; h_0 — глубина воды в зумпфе. При наливах во все сечение шурфа или площадки F соответствует площади смоченной поверхности.

Способ Нестерова. По этому способу проводятся опыты для определения водопроницаемости связных грунтов (суглинков, супесей и глин) и тонкозернистых пылеватых песков. Налив проводится одновременно в два стальных кольца, концентрически вдавливаемых в грунт на глубину до 2,5 см. Диаметр наружного кольца должен быть не менее 50 см, внутреннего — не менее 25 см, высота 25 см. Соотношение наружного и внутреннего колец должно быть не менее 2 : 1.

Подготовка к опыту такая же, как по способу А. К. Болдырева. При наливе во внутреннем кольце и в зазоре между кольцами строго поддерживается один и тот же уровень, для чего в каждом из них устанавливается регулятор уровня. Расходы воды замеряются отдельно по внутреннему кольцу и по кольцевому зазору, для чего вода к ним должна поступать от двух баков. При наливах в суглинки и глины с небольшими расходами воды применяются сосуды Мариотта. Опыты проводятся до стабилизации расхода в течение не менее 6 ч. Общая продолжительность опыта 20—24 ч. В особых случаях для оценки изменения водопроницаемости при нарушении структуры грунта или при выщелачивании водорастворимых солей опыт может продолжаться несколько суток. Такие опыты выполняются по специальной программе. Приблизительный расчет коэффициента фильтрации проводится по формуле (14.9) на основании установившегося расхода Q и площади поперечного сечения F внутреннего кольца. Значение k_{ϕ} уточняется путем установления глубины промачивания грунта при опыте. Для этого после опыта бурят две скважины — одну в центре зумпфа, а другую в 3—4 м от него — и отбирают через каждые 0,2 м образцы грунта в бюксы для определения влажности. По точке пересечения кривых влажности устанавливается глубина просачива-

ния воды при опыте. Для определения глубины просачивания применяются и радиометрические методы.

Коэффициент фильтрации рассчитывается по формуле

$$k_{\phi} = \frac{Ql}{F(h_0 + h_k + l)}, \quad (14.12)$$

где l — глубина просачивания воды от дна зумпфа; h_0 — толщина слоя воды в зумпфе; h_k — действующее капиллярное давление. Значение h_k равно примерно 50 % от максимальной высоты капиллярного поднятия.

Грунт	Высота капиллярного поднятия, м
Суглинок:	
тяжелый	0,70
легкий	0,50
Супесь:	
тяжелая	0,30
легкая	0,20
Песок:	
мелкий глинистый	0,15
мелкий чистый	0,10

Расчеты параметров с учетом неустановившегося режима фильтрации

Способ Биндемана. Во время опыта наряду с замером расхода воды в единицу времени Q_t вычисляется или замеряется объем воды W , профильтровавшейся от начала опыта через расчетное кольцо. По этим данным строят графики, приведенные на рис. 65, в, 66 и 67. Коэффициент фильтрации рассчитывают по формуле

$$k_{\phi} = 1,44\beta W/(Ft), \quad (14.13)$$

где W — общий объем воды, поступившей в грунт через внутреннее кольцо за время t от начала опыта; β — коэффициент, зависящий от отношения t/t_1 (t_1 — продолжительность опыта, при которой объем воды составляет половину общего объема воды, поглощенной за время опыта t , t_1 определяется по графику (рис. 66), построенному по данным опыта (см. рис. 65, а, табл. 23, 24, 25); F — площадь расчетного кольца. Недостаток насыщения μ определяется по формуле

$$\mu = 0,001W/(Fl). \quad (14.14)$$

Для определения высоты капиллярного давления h_k предварительно определяется глубина промачивания l (аналогично способу, описанному выше). Затем по графику (рис. 67) опре-

деляется отношение l/H_0 , где H_0 — напор, равный сумме столба воды в зумпфе h_0 и капиллярного давления h_k .

Зная l по данным бурения скважин, находим H_0 , после чего

$$h_k = H_0 - h_0. \quad (14.15)$$

Способ Бадова. Определение параметров этим способом проводится параллельно с обработкой по способу Биндемана.

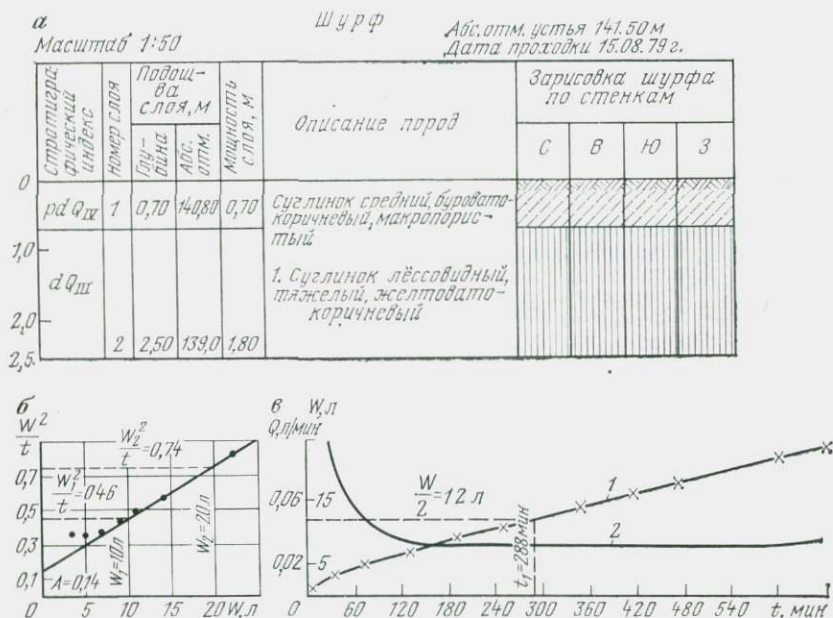


Рис. 65. Определение параметров по способу Бадова (б) и Биндемана (в)
1— $W=f(t)$; 2— $Q=f(t)$

Таблица 23

Номера замеров	t , мин	W , л	W^2 , л ²	W^2/t , л ² /мин
1	10	1,0	1,0	0,1
2	20	2,0	4,0	0,2
3	40	3,5	12,25	0,362
4	70	5,0	25,0	0,36
5	130	7,0	49,0	0,33
6	190	9,0	81,0	0,43
7	250	11,0	121,0	0,48
8	350	14,0	196,0	0,56
9	470	18,0	324,0	0,69
10	600	22,0	484,0	0,81
11	660	24,0	576,0	0,87

Для своевременного контроля за ходом налива в процессе опыта строятся графики $v=f(t)$ и $vW=f(W)$ (v — текущая скорость инфильтрации воды, определяемая по формуле $v=Q/F$

Т а б л и ц а 24

t , мин	W , л	$W/2$, л	t_1 , мин	t/t_1	$\beta = f(t/t_1)$	$\beta \cdot W$	$F \cdot t_1$, м ² /мин	$\frac{B \cdot W}{Ft}$	$K = 1,44 k$, м/сут
190	9	4,5	6,2	3,1	0,365	3,3	18,3	0,18	0,26
350	14	7	130	2,7	0,57	8,0	33,6	0,24	0,35
660	24	12	288	2,3	0,79	16,8	63,4	0,26	0,38

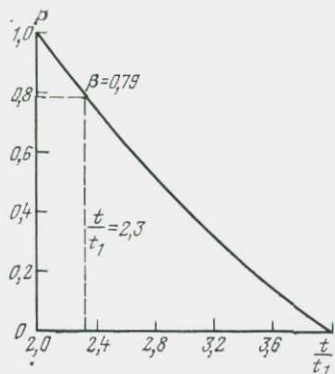


Рис. 66. График зависимости β от t/t_1

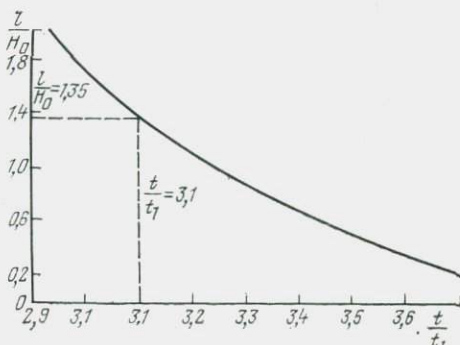


Рис. 67. График зависимости l/H_0 от t/t_1

(где Q — расход воды в данный момент времени; F — площадь расчетного кольца); W — суммарный (с начала опыта до момента замера t) объем профильтровавшейся воды, v и W принимаются на один и тот же момент времени).

Т а б л и ц а 25

t , мин	W , л	q , л	Δt , мин	Q , л/мин
1,0	1,0	1,0	—	0,1
20	2,0	1,0	10	0,1
40	3,5	1,5	20	0,075
70	5,0	1,5	30	0,05
130	7,0	2,0	60	0,033
190	9,0	2,0	60	0,033
250	11,0	2,0	60	0,033
350	14,0	3,0	100	0,033
470	18,0	4,0	120	0,033
600	22,0	4,0	130	0,031
600	24,0	2,0	60	0,033

При отклонении графика $vW=f(W)$ от линейного, что может быть вызвано нарушением однородности смоченной толщи грунта или достижением уровня грунтовых вод, опыт прекращается.

Для расчета параметров строится график в координатах $\frac{W^2}{t} \div W$. С учетом переводных коэффициентов расчетные формулы принимают вид:

$$k_{\Phi} = \frac{1,44 \left[\left(\frac{W^2}{t} \right)_2 - \left(\frac{W^2}{t} \right)_1 \right]}{F(W_2 - W_1)}; \quad (14.16)$$

$$\mu = \frac{0,00144A}{F^2 k_{\Phi} (h_0 + h_k)}, \quad (14.17)$$

где значения $\left(\frac{W^2}{t} \right)_2$ и $\left(\frac{W^2}{t} \right)_1$ и соответствующие им значения W_2 и W_1 определяются по двум точкам на опытной прямой (см. рис. 65, б); A — отрезок, отсекаемый опытной прямой на оси ординат. Остальные обозначения приведены выше.

Пример определения параметров по способам Биндемана и Бадова по данным опытного налива в шурф приведен на рис. 65. Многократные определения параметров по данным одного опыта выполняются для контроля и подтверждения достоверности расчета.

14.5. ИЗУЧЕНИЕ ВОДОПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ МАССИВОВ

Способность горных пород и их массивов сохранять прочность и механическую устойчивость при взаимодействии с водой называется водопрочностью. Это понятие является комплексным, поскольку условия взаимодействия породы или массива с водой могут быть весьма различными: статическими (спокойная вода) или динамическими (движущийся водный поток). В первом случае водопрочность характеризуется показателями размокаемости и размягчаемости, во втором — размываемости и фильтрационной устойчивости.

Водопрочность пород и массивов обуславливается как внутренними, так и внешними факторами. Среди комплекса внутренних факторов определяющими являются химико-минеральный состав пород и структурно-текстурные особенности, влажность пород, состав и концентрация порового раствора. Водопрочность массивов, кроме того, зависит от геологического строения, характера взаимоотношения различных литологических типов пород в пределах массива, трещиноватости, степени выветрелости и увлаженности пород. Среди внешних факторов, влияющих на водопрочность, основными являются условия (статические или динамические) воздействия воды на породу

или массив, интенсивность и вид гидродинамического воздействия (смыв, размыв, подмыв и т. д.), состав и концентрация водного раствора, взаимодействующего с породой, наличие внешнего давления, температура [14].

Водопрочность пород во многом определяет интенсивность развития выветривания и геологических процессов, связанных с поверхностным стоком, — плоскостной эрозии, когда при смыве (абляции) происходит снос размываемых поверхностных образований массивов горных пород потоками талой или дождевой воды; линейной эрозии — при образовании рытвин и промоин в породах, перерастающих в овраги. При воздействии постоянных водотоков на массивы горных пород водопрочность их влияет на развитие процессов размыва русел рек, подмыва берегов. Кроме того, параметры, характеризующие водопрочность пород, используются при решении прогнозных задач переработки берегов водохранилищ, устойчивости склонов котлованов, карьеров, каналов, грунтовых плотин и других земляных сооружений. В прибрежной части морей, озер и водохранилищ под действием энергии волн происходит переработка берегов, активизирующая проявление склоновых процессов (оползание, осыпание, обрушение и т. д.), интенсивность которых во многом определяется размываемостью пород.

При полевом исследовании водопрочности горных пород и их массивов следует прежде всего установить характер и условия взаимодействия породы или массива с водой или водным потоком (спокойная вода, поверхностный поток, направленный гидродинамический поток, фильтрационный поток и т. д.) В зависимости от вида этого взаимодействия полевые методы изучения водопрочности пород можно подразделить на две группы: 1) методы изучения водопрочности в статических условиях и 2) в динамических условиях.

Изучение водопрочности в статических условиях

При проведении полевых исследований водопрочности пород и их массивов, взаимодействующих со спокойной водой, оценивается размокаемость и размягчаемость пород.

В ходе изучения размокаемости пород, главным образом визуально, фиксируется характер и интенсивность размокания пород в массиве на участках взаимодействия его с водоемом (при затоплении водой котлованов, выработок, шурфов, каналов и т. д.). При этом в зависимости от водопрочности пород характер их размокаемости в стенках выработок может быть различным: водопрочные породы сохраняют искусственные углы откосов выработок под водой (рис. 68, а), а в условиях размокающих пород происходит изменение профиля выработки. Так, размокание глинистых пород приводит к образованию ниш и вывалов в стенках затопленных выработок с последующим оползанием и обрушением вышележащих толщ массива (см.

рис. 68, б). При наличии сильнонабухающих глин, размокаемость которых обычно несколько ниже, напротив, в стенках могут образовываться выпоры породы в виде пологих уступов (см. рис. 68, з). В стенках массивов, сложенных переслаивающимися породами с различной водопрочностью, размокаемость носит избирательный характер, в результате чего в менее водопрочных породах образуются ниши, разделенные прослоями неразмокающих пород (см. рис. 68, в). В наименее водопрочных песчаных и пылеватых грунтах размокание приводит к наиболее сильному изменению профиля затопленной выработки. Так, в лёссовых массивах размокание пород сопровождается явлениями просадки, породы оплывают под водой, переходя в текучее состояние, а в надводной части образуются просадоч-

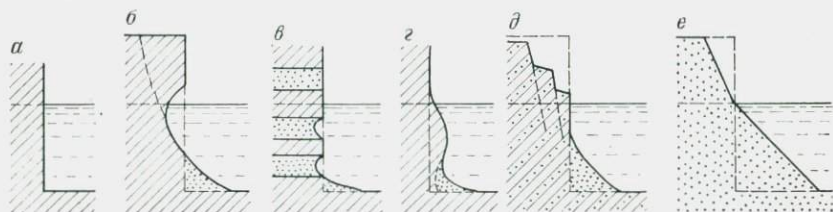


Рис. 68. Характер размокания пород в стенках выработок при статическом взаимодействии с водой:

а — неразмокающие породы; *б* — образование вывалов и оплывин в размокающих породах; *в* — избирательное размокание слоистых толщ; *з* — набухание и оплывание пород; *д* — просадка и оплывание лёссовых пород; *е* — оплывание песчаных пород

ные уступы и трещины, распространяющиеся на значительное расстояние от места затопления выработки (см. рис. 68, д). В массивах, сложенных песчаными породами, в результате размокания также происходит сильное изменение профиля затопленной выработки (см. рис. 68, е), при этом склоны выработки в надводной и подводной частях вывалаживаются в соответствии с углами естественного откоса на воздухе и под водой.

Таким образом, при оценке размокания пород в статических условиях в ходе полевых исследований фиксируются: 1) характер размокания пород, наличие или отсутствие оплывин размокшей породы, вывалов и выступов; 2) углы откоса пород над водой φ_0 и под ней $\varphi_в$; 3) показатель интенсивности или глубины размокания пород I ; 4) степень и характер обводненности породы выше уровня воды. Углы откоса φ_0 и $\varphi_в$ измеряют с помощью угломеров и реек или эклиметром горного компаса. Показатель I на выбранном участке стенки выработки оценивается по замерам объемов вывалившейся при размокании породы и рассчитывается по формуле

$$I = V/S, \quad (14.18)$$

где V — объем образовавшихся пустот, углублений или ниш; S — площадь участка стенки выработки. Величина I дает коли-

чественную оценку масштаба переработки профиля выработки при ее затоплении и размокании пород.

Наряду с этим изучается литолого-петрографический состав пород по разрезу, фиксируются структурно-текстурные особенности, влияющие на характер размокания пород в массиве (пористость, трещиноватость, наличие слоистости и т. д.). При постановке режимных исследований оборудуется опытная площадка на характерном участке затопления и проводятся наблюдения за скоростью процесса размокания и развитием во времени процессов, сопровождающих размокание пород (оползание, обрушение, осыпание и т. д.). При этом фиксируется изменение углов откосов выработок выше и ниже уровня воды, скорость их изменения во времени. По данным замеров объема размокающей и обрушающейся породы на участке стенки (откоса) постоянной площади и расчетам I во времени оценивается скорость размокания по формуле

$$v = \frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0}, \quad (14.19)$$

где v — скорость размокания; I_0 и I_1 — показатели интенсивности размокания соответственно в начальный t_0 и текущий t_1 моменты времени.

Кроме того, размокаемость отдельных образцов горных пород может исследоваться в полевых условиях с помощью простейших лабораторных приборов (см. т. 2, разд. 9.8). Для этого проводят опробование исследуемой толщи; отобранные образцы, одинаковые по форме, размеру и имеющие естественную влажность, исследуются на размокание в воде, взятой из изучаемого водоема.

Размягчаемость горных пород при полевых исследованиях изучается на отобранных из разреза образцах правильной формы по методике, указанной в т. 2, разд. 9.8. В полевых условиях воздушно-сухие и насыщенные водой из исследуемого водоема образцы пород могут испытываться на одноосное сжатие с помощью переносных гидравлических прессов (например, типа «Школьник»). Рассчитываемые при этом значения коэффициентов размягчаемости являются косвенными показателями водопрочности пород изучаемого массива в статических условиях.

Изучение водопрочности в динамических условиях

Горные породы и их массивы испытывают направленное динамическое воздействие воды, в связи с чем данная группа методов имеет наиболее важное значение при исследовании водопрочности горных пород в полевых условиях. Характер динамического воздействия водного потока на породу (или массив) может быть весьма различным: при движении потока дождевых и талых вод по склону происходит смыв поверхностных

отложений (рис. 69, а); под действием течения реки и направленной энергии волн в прибрежной части водоемов происходят размыв пород приустьевой части склонов и переработка берегов (см. рис. 69, б); при фильтрации подземных вод размывающее действие фильтрационного потока приводит к потере устойчивости пород в массиве в результате растворения, выщелачивания и выноса частиц размываемых пород (см. рис. 69, в). В зависимости от этого методы изучения водопрочности горных пород в динамических условиях можно подразделить на: 1) методы изучения водопрочности при смыве; 2) при волновом размыве; 3) методы изучения фильтрационной устойчивости при суффозии.

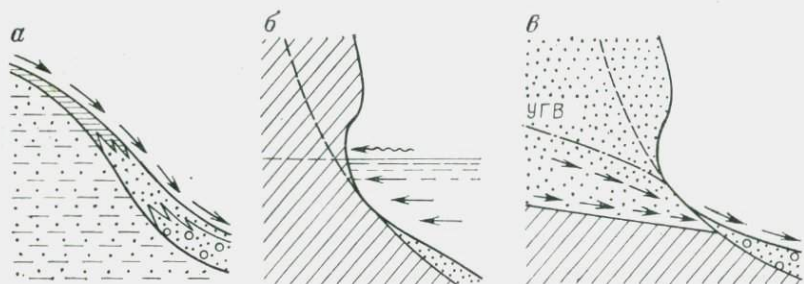


Рис. 69. Условия динамического размыва пород:

а — поверхностный (плоскостной) смыв пород; б — направленный (внешний) волновой размыв пород; в — фильтрационный (внутренний) размыв пород. УГВ — уровень грунтовых вод

При поверхностном смыве водопрочность горных пород характеризуется косвенными геоморфологическими показателями исследуемого склона и параметрами смыва пород. Изучению этих вопросов посвящены работы А. Н. Бефани, В. Д. Быкова, А. Д. Дубаха, С. В. Избаша, М. М. Протодяконова, Г. П. Сурмача, В. М. Павлова и др.

В ходе полевых исследований на ранних стадиях проектирования ориентировочная оценка водопрочности пород при поверхностном смыве производится по анализу геоморфологических показателей территории. Для этих целей используются как топографические картографические материалы, так и непосредственные геоморфологические полевые наблюдения (топографические профили элементов рельефа или его частей). При этом фиксируются углы наклона склонов и предельно пологих осыпных склонов, а также наличие канав, промоин, овражной сети и т. д. Следует также иметь в виду, что при прочих равных условиях интенсивность поверхностного смыва зависит от характера пород, уклона поверхности, а также наличия или отсутствия растительного покрова (табл. 26).

Для проведения режимных стационарных наблюдений за смывом пород в характерных участках территории оборудуются

наблюдательные стоковые площадки. На них устанавливаются реперы для наблюдений за изменением профиля склона, устройства для контроля выпадающих осадков и т. д. В нижней части площадки помещают устройства для сбора смываемой породы, отстойники и отводные водосливы. В ходе исследований изучают: интенсивность смыва I_s , определяемую количеством породы, смытой с 1 м^2 поверхности при данном угле наклона за сезон (обычно полгода); скорость поверхностного потока, определяемую с помощью красящих электролитов; объем пород, смываемых с 1 м^2 поверхности, определяемый по замерам с помощью реперов глубины смываемых пород. По результатам полевых наблюдений строят диаграммы зависимости I_s от уклонов поверхности, скорости потока, типа пород, с помощью которых оценивается водопрочность пород исследуемой территории.

Т а б л и ц а 26

Интенсивность смыва почвенных покровов
(по П. Н. Панюкову)

Уклон поверхности, градусы	Количество пород (в г), смываемых за сезон (полгода) с 1 м^2 поверхности	
	покрытой травяни- стой растительностью	обнаженной
10	14	834
20	42	1368
30	51	3104

При волновом размыве водопрочность горных пород оценивается как косвенными геоморфологическими показателями территории, так и прямыми параметрами размыва. Изучением водопрочности пород при волновом размыве занимались С. Д. Воронкевич, А. С. Девдариани, Г. С. Золотарев, Е. Г. Качугин, Ц. Е. Мирцхулава, Л. Б. Розовский и др.

В качестве косвенных геоморфологических показателей размываемости пород, определяемых в полевых условиях или по топографическим данным, используются (по С. Д. Воронкевичу) угол предельно пологого осыпного склона, средний угол наклона и ширина бечевника, угол наклона тальвега. Эти показатели являются классификационными и могут быть применены для относительной оценки пород по степени их устойчивости размыву. На их основе С. Д. Воронкевичем [29] была разработана классификация горных пород по водопрочности при размыве, в которой на базе литологических характеристик и косвенных показателей водопрочности горные породы подразделяются по размываемости на ряд классов, групп и типов (табл. 27). Использование этой классификации уже на ранних стадиях проектирования позволяет составить приближенное

Классификация горных пород по водопрочности при размыве

Подразделение пород по размываемости			Показатели	
			прямые	
Класс	Группа	Тип	Размываю- щая (критическая) скорость потока v_k , м/с	Спротив- ляемость волновому размыву (по Е. Е. Кон- дратьеву), МПа
Геологически медленно раз- мываемые	Скальные нерастворимые	Породы извер- женные и мета- морфические Доломиты и доломитизиро- ванные извест- няки	—	—
	растворимые		—	>100
Исторически медленно раз- мываемые	Скальные растворимые Полускальные	Известняки и гипсы Мергели и алевроиты	—	100
			>15	50
Практически медленно размываемые	Связные не- размокаемые Несвязные	Глины древние морские уплот- ненные	3	50—15
		Глины и су- глинки моренные	0,7—2,2	50—15
		Галечники	0,7—2,2	—
Практически быстро раз- мываемые	Связные не- размокаемые Связные раз- мокаемые Несвязные	Глины и суглинки четвертичные	0,4—0,8	2,0—1,0
		Суглинки чет- вертичные, часто лессовидные	0,4—0,75	10,0—1,5
		Пески крупно- и среднезерни- стые четвертич- ные	0,45	2,0—1,0
Катастрофи- чески размы- ваемые	Связные раз- мокаемые Несвязные	Лёссы и лёссовид- ные супеси чет- вертичные	0,35—0,45	1,0—0,5
		Пески тонкозер- нистые четвер- тичные	0,35—0,45	1,0—0,5

(по С. Д. Воронкевичу)

водопрочности пород					
(расчетные)		косвенные (классификационные)			
Коэффициент волнового размыва (по Е. Г. Качу- гину), $K_p \cdot 10^3, \text{ м}^2/\text{т}$	Угол наклона абразивной отмели на водохрани- лищах, градус	Лаборатор- ный показатель водопрочно- сти	Геоморфологические показатели устойчивости пород		
			Угол наклона талвега, градус	Угол предельно пологого осыпного склона, градус	Средний угол наклона, градус (ширина бечевника, м)
—	20—22	—	—	—	—
—	—	—	40	55	17 (20)
—	19	—	35—40	50—55	15—17 (20—40)
—	—	Более 5 циклов	30—35	42—45	10—15 (20—40)
0,4	7—10	2—4 цикла	25—30	34—42	5—10 (50—80)
0,7—0,9	7—13	1 цикл	—	—	—
0,5	9—14	—	—	—	—
1—1,5	—	—	—	—	—
3,5—3,7	2,6	Время раз- мокания от несколь- ких минут до 1 ч	—	25—30	—
1,2—2	6—12	—	—	—	—
4,4—6	1,5—4	Время раз- мокания 1 мин	—	—	—
4,8—6,5	2—6	—	—	—	—

количественное представление о размываемости пород, а также помогает более правильно и обоснованно проектировать натурные опыты на больших моделях с целью получения расчетных показателей.

Для получения расчетных показателей размываемости пород в пределах наиболее ответственных участков водохранилищ проводятся полевые экспериментальные исследования, объем и масштабы которых различны. Для этих целей сооружаются лотки (с сечением до 2×2 м и более) в траншеях различной длины, врезаемых в бечевник реки или береговой склон водохранилища перпендикулярно к береговой линии. Для возбуждения волны в лотке применяются волнопродукторы, позволяющие задавать различную высоту, период и длину волны, параметры которой измеряются по боковым стенкам лотка. В ходе экспериментов определяется коэффициент сопротивляемости пород размыву K_c [29] по формуле

$$K_c = E_0/V, \quad (14.20)$$

где E_0 — суммарная энергия волны за опыт; V — объем размыва породы.

Энергия волны E'_0 в единицу времени с учетом влияния глубины воды в лотке H рассчитывается по формуле

$$E'_0 = \frac{\gamma \lambda a^2}{4\tau} \left(1 + \frac{2kH}{\text{sh}(2kH)} \right), \quad (14.21)$$

где γ — плотность волны; λ — длина волны; a — амплитуда волны; τ — ее период; $k = 2\pi/\lambda$; sh — гиперболический синус.

Коэффициент размываемости пород (по Е. Г. Качугину) K_p^0 определяется в ходе полевых исследований в первый год заполнения водохранилища, когда нет отмели, и характеризуется отношением объема размываемых пород высоких берегов (> 30 м) за первый год V_1 к энергии волн E_1 за тот же период

$$K_p^0 = V_1/E_1.$$

Величина энергии волн E_1 определяется с помощью номограмм А. П. Браславского.

При фильтрационном размыве горных пород их водопрочность обычно оценивается критическими параметрами фильтрационного потока, при которых начинаются внутренний размыв, вынос частиц породы и снижение ее устойчивости. Изучению этих вопросов посвящены исследования Е. А. Замарина, В. С. Истоминой, С. В. Избаша, Л. К. Козловой, Н. Н. Маслова, Н. Н. Павловского, В. Н. Славянова и др.

В ходе полевых работ для оценки фильтрационной устойчивости пород выясняются: 1) гранулометрический состав, текстура и нарушенность пород по разрезу; 2) источники и возможные пути движения воды через размываемую породу; 3) условия и места в разрезе, где породы теряют свою прочность при увлажнении; 4) величины и направления действующих гра-

диентов фильтрации. При этом особое внимание уделяется участкам выхода подземных вод из толщ фильтрационно неустойчивых отложений, к которым прежде всего относятся пески (мелко- и тонкозернистые, особенно рыхлосложенные) и пылевато-глинистые отложения. На таких участках фильтрационный внутренний размыв пород проявляется в оплывании пород и механической суффозии.

Расчетными показателями, определяемыми в ходе полевых исследований, являются критический градиент фильтрации, при котором начинается вынос частиц, и критическая скорость фильтрации. Для определения указанных параметров проводятся полевые опыты в скважинах: на опытном участке оборудуются нагнетательная скважина и на расстоянии 1,5—2 м от нее одна или несколько скважин, из которых производится откачка. При этом фильтры скважин устанавливаются в горизонтах изучаемых пород.

Перед испытаниями проводится прокачка скважин до полного осветления откачиваемой воды, затем при различных степенях нагнетания — откачки проводятся замеры расхода воды, давлений нагнетания, уровня воды в скважине при откачке и количества взвешенных частиц, выносимых в процессе откачки. Наряду с этим выявляется фактическая скорость движения подземных вод между скважинами с помощью электролита. О начале размыва пород судят по резкому увеличению расходов нагнетаемой и откачиваемой воды, росту количества выносимых частиц породы (мутность раствора) и увеличению фактической скорости фильтрации воды. По результатам замеров определяются величины критического градиента и критической скорости фильтрации. Ориентировочно в полевых условиях эти величины оцениваются с помощью эмпирических формул (см. т. 2, разд. 9.8) по данным гранулометрического состава пород и их пористости.

Глава 15

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

15.1. ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ С ПОМОЩЬЮ ШТАМПОВ

Штамповые испытания являются одним из наиболее распространенных полевых методов определения деформационных свойств грунтов, заключающимся в изучении сжимаемости грунтов в условиях их естественного залегания под нагрузкой, передаваемой на грунт через штамп. Определение деформационных свойств с помощью штампов применяется практически для всех видов грунтов (скальные, песчано-глинистые, крупнообломочные и др.).

Штамповые испытания — это дорогостоящий вид опытных работ: минимальная стоимость одного опыта на скальных грунтах, например, составляет не менее 2000 руб. Поэтому они применяются главным образом при изыскании под ответственные и уникальные сооружения [2, 26, 43].

Опытные штамповые работы проводятся обычно на детальных стадиях изысканий при обосновании технических и рабочих проектов (или техно-рабочих проектов при одностадийной системе изысканий) конкретных сооружений, когда необходимо получить достоверные данные для расчета устойчивости основания сооружения по деформациям. При проведении таких испытаний ставятся следующие задачи: 1) сравнительное изучение сжимаемости грунтов на разных участках и глубинах исследуемой площадки, необходимое для обоснования или уточнения компоновки сооружения и глубины заложения фундаментов; 2) определение общего модуля деформации — основного расчетного показателя сжимаемости грунта; 3) оценка просадочности лёссов при замачивании; 4) оценка осадки мерзлых грунтов при оттаивании.

Штамповые опыты позволяют изучать сжимаемость значительного объема грунта в условиях его естественного залегания, что повышает достоверность получаемых данных по сравнению с лабораторными испытаниями. Это особенно важно при работе с неоднородными трещиноватыми породами, для которых роль масштабного эффекта очень велика. Точность определений деформационных свойств возрастает с увеличением площади штампа, в то же время это приводит к удорожанию опытов. Поэтому при проведении штамповых испытаний большое значение имеет выбор оптимального размера штампа. Чаще всего применяются штампы площадью от 600 до 10 000 см².

Применение штампов площадью менее 600 см² недопустимо, особенно при работе с дисперсными грунтами, так как вместо сжатия грунта начинается развиваться процесс вдавливания (пенетрации) штампа, подобно тому, как это происходит при статическом задавливании плоского зонда.

В практике изыскательских работ в зависимости от типа пород, задач исследований и вида строительства используется три разновидности штамповых испытаний: 1) в шурфах и котлованах; 2) в скважинах; 3) в штольнях и туннелях. Для каждой из них разработаны специальные установки и методики проведения опытов.

Оборудование для штамповых испытаний

Проведение штамповых испытаний на дне котлованов или в шурфах осуществляется с помощью установок, включающих: штамп; анкерную систему, состоящую из упорной балки и анкерных свай или распорных щитов; устройства для нагрузки штампа (домкрат или грузы); приборы для измерения осадки штампа (рис. 70 и 71).

При испытаниях песчано-глинистых грунтов обычно используются квадратные или круглые штампы, изготовляемые из толстой металлической плиты площадью 2500 или 1000 см². В последнем случае вокруг штампа создается специальная кольцевая пригрузка площадью не менее 5000 см². Часто такие штампы имеют фильтрующую подошву, облегчающую отток воды из-под штампа. При работе с крупнообломочными, а также сильносжимаемыми и неоднородными дисперсными грунтами допускается применение штампов площадью 5000 и 10 000 см². Исследование скальных грунтов проводится с применением бе-

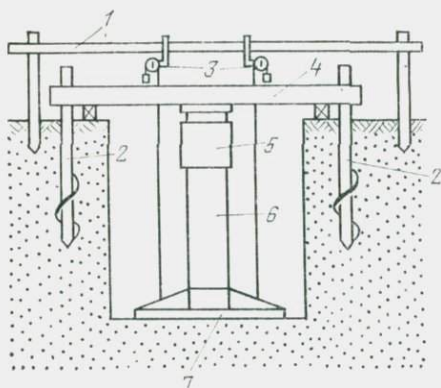


Рис. 70. Штамповая установка с упором в балку, закрепленную анкерными сваями:

1 — реперная система; 2 — анкерные сваи; 3 — прогибомеры; 4 — упорная балка; 5 — гидравлический домкрат; 6 — стойка для передачи нагрузки; 7 — штамп

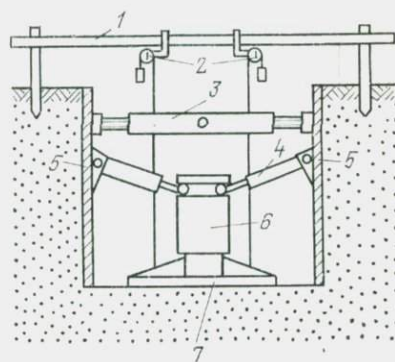


Рис. 71. Штамповая установка с упором в стенки шурфа:

1 — реперная система; 2 — прогибомеры; 3 — распорный винтовой домкрат; 4 — стойки для упора в стенки шурфа; 5 — упорные щиты; 6 — гидравлический домкрат; 7 — штамп

тонных или железобетонных штампов, изготовляемых в виде блоков размером 1×1×1 м, а иногда и большего размера.

Нагрузка на штампы передается с помощью гидравлических или пневматических домкратов с мощностью, обеспечивающей задание необходимых величин напряжений. Иногда загрузка штампа производится бетонными или металлическими грузами, укладываемыми на специальную грузовую площадку штампа.

В качестве упора для домкратов служит упорная балка, связанная с анкерными сваями (см. рис. 70). Анкерные сваи закручиваются в грунт и воспринимают реактивное усилие от домкратов. Для правильной постановки опыта необходимо, чтобы напряжения в грунте, создаваемые анкерами, не захватывали активную зону штампа. При проведении испытаний под небольшими нагрузками в качестве упоров могут использоваться распорные щиты, упирающиеся в противоположные стенки шурфа (см. рис. 71) и передающие реактивное усилие на боковые стенки шурфа.

Испытание скальных грунтов требует создания мощной анкерной системы. В этом случае опыты проводятся с применением натяжных тросов, которые закрепляются (цементируются в глубине массива в скважинах малого диаметра). На другом конце троса имеется оголовок, в который упираются домкраты (рис. 72). Глубина заложения анкера должна быть не менее 8 диаметров штампа, что исключает его влияние на результаты опыта. Подобная система может состоять из одного анкера, проходящего через небольшое отверстие в центре штампа (см. рис. 72), или нескольких анкеров, с помощью которых крепится упорная балка. В последнем случае возможно проведение опыта с большими по площади штампами и высокими нагрузками.

Деформации грунта под штампом измеряют индикаторами часового типа, прогибомерами и экстензометрами. Индикаторы и прогибомеры устанавливают на поверхности грунта с помощью независимой системы крепежа (реперов) так, чтобы деформация грунта и опускание штампа не изменяли их начальную точку отсчета. Для выполнения этого условия реперы, на которых крепятся индикаторы и прогибомеры, следует устанавливать на расстоянии не менее 8 диаметров штампа от центра загружаемой поверхности. Измерение деформаций проводится не менее чем двумя индикаторами или прогибомерами, устанавливаемыми вокруг штампа под углом 180 или 120°. Точность измерений деформаций с помощью индикаторов составляет 0,01—0,005 мм, а прогибомеров — 0,05 мм. Ход штока индикатора должен быть не менее 5 см.

При работе со скальными грунтами наиболее надежной измерительной системой являются экстензометры. Конструкция наиболее простых экстензометров механического типа включает анкер; головку; металлический стержень, упирающийся в анкер и свободно ходящий через головку экстензометра; индикатор часового типа (рис. 73). Приборы устанавливаются в скважине небольшого диаметра, пробуренной в центре исследуемой площадки на глубину, выходящую за пределы зоны деформации грунта. Анкер экстензометра цементируется на забое скважины, а его головка крепится на поверхности штампа. При деформировании грунта штамп вместе с головкой опускается, при этом длина верхней части металлического стержня, выступающего над поверхностью головки, начинает увеличиваться. Измеряя с помощью индикатора расстояние от верхнего торца стержня до поверхности головки экстензометра, можно определить деформацию грунта под штампом. В настоящее время существуют многоточечные экстензометры, позволяющие одновременно определять деформацию грунта на различных глубинах от поверхности штампа.

В СССР разработано несколько конструкций штамповых установок, предназначенных для работы на дне котлованов или в шурфах. Наиболее распространенными из них являются установки Белорусского государственного института инженерных

изысканий, НИИОСПа, Фундаментпроекта, Уральского политехнического института и ПНИИИСа. В качестве примера на рис. 71, 72 приведены схемы двух штамповых установок, предназначенных для работы с дисперсными грунтами с применением квадратных штампов площадью 5000 см². Нагрузка на штамп задается с помощью гидравлических домкратов. Упорным устройством у первой установки служит металлическая

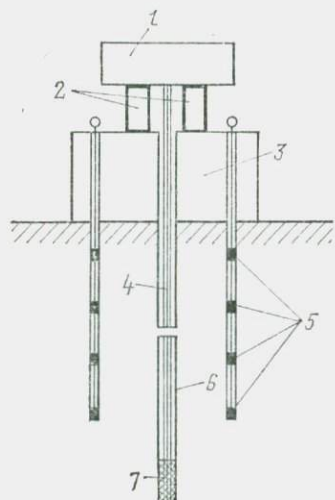


Рис. 72. Схема штамповых испытаний скальных грунтов с применением тросового анкера:

1 — оголовок; 2 — домкраты; 3 — штамп; 4 — трос; 5 — датчики измерения деформации грунта под штампом; 6 — скважина; 7 — цемент

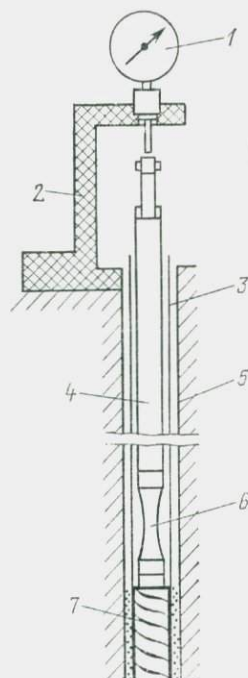


Рис. 73. Схема конструкции экстензометра для измерения деформации грунтов:

1 — индикатор часового типа; 2 — измерительная головка экстензометра; 3 — обсадная (пластиковая) труба; 4 — металлический стержень; 5 — скважина; 6 — анкерный конус; 7 — анкер

балка с двумя анкерами, а у второй — распорные щиты. Максимальное сжимающее усилие, передаваемое на грунт с помощью первой и второй установок, составляет не более 0,5 МПа.

Испытания в скважинах. При необходимости изучения деформационных свойств грунтов на значительных глубинах прибегают к штамповым испытаниям в скважинах. Они проводятся с применением круглого штампа площадью 600 см², опускаемого на колонке труб на забой скважины. Нагрузка задается гидравлическими или пневматическими домкратами. При испытании дисперсных грунтов закрепление упорной рамы осуществляется с помощью двух или чаще — четырех лопатных анкеров (рис. 74). На скальных грунтах применяются анкеры

из железобетонных свай, создаваемые в грунте путем бурения скважины, армирования ее металлическими прутьями и последующей заливки бетоном. Деформации грунта под штампом измеряют с помощью индикаторов часового типа или прогибомеров.

Среди скважинных штамповых установок, предназначенных для работы с дисперсными грунтами, в нашей стране наиболь-

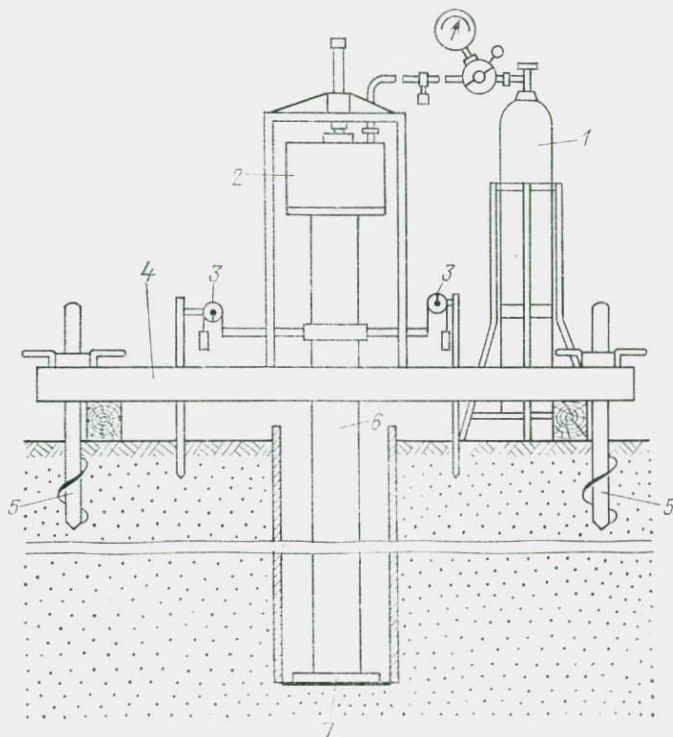


Рис. 74. Схема установки УДГШ-600 для штамповых испытаний в скважинах: 1 — баллон со сжатым воздухом; 2 — пневматический домкрат; 3 — прогибомеры; 4 — упорная балка; 5 — анкеры; 6 — несущая колонна труб; 7 — штамп

шее применение получила установка диафрагменная пневматическая штамповая (УДГШ-600). Она позволяет вести испытания в скважинах диаметром 325 мм до глубины 10 м и создавать предельное давление на грунт, равное 1 МПа.

Испытания в штольнях и туннелях. При изучении скальных грунтов, особенно в связи с подземным строительством, возведением транспортных туннелей и ответственных гидротехнических сооружений, штамповые испытания часто проводятся в штольнях и туннелях. При этом возможно применение нескольких способов таких испытаний: с помощью напор-

ных камер, жесткими штампами, плоскими и цилиндрическими гидравлическими домкратами.

Метод напорных камер заключается в том, что на исследуемом участке туннеля или штольни с помощью одной или двух бетонных перегородок создается замкнутая камера (рис. 75). Ее наполняют водой, подаваемой под давлением. Предварительно внутри камеры в интересующих точках устанавливаются экстензометры с дистанционной регистрацией показаний. Создавая в камере определенное гидростатическое давление, одновременно регистрируют сжатие грунта вокруг нее и тем самым определяют деформационные свойства пород массива.

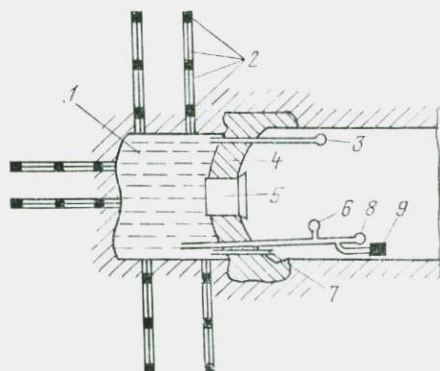


Рис. 75. Схема изучения деформационных свойств скальных грунтов с помощью напорной камеры:

1 — напорная камера, наполненная водой; 2 — экстензометры; 3 — кран для выпуска воздуха; 4 — бетонная перегородка; 5 — люк; 6 — манометр; 7 — трубка кабеля датчиков; 8 — система подачи воды под напором и водомер; 9 — кран для выпуска воды

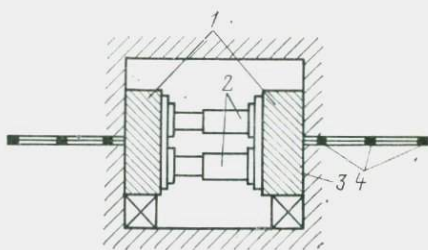


Рис. 76. Схема изучения деформационных свойств скальных грунтов в штольнях с применением жестких штампов:

1 — бетонные штампы; 2 — домкраты; 3 — стенка штольни; 4 — приборы для измерения деформации грунта

Испытания с применением жестких штампов, изготовляемых в виде бетонных блоков, осуществляются с помощью домкратов, опорой для которых служит кровля или противоположная стенка выработки (рис. 76). Наличие жесткой опоры позволяет применять при таких опытах большие по площади штампы и создавать нагрузку на грунт от 500 до 12000 кН [16]. Испытания проводятся в вертикальном или горизонтальном направлениях, а при наличии анизотропии сжимаемости сжатие грунта выполняется в обоих направлениях. Деформация породы под штампом измеряется с помощью экстензометров, устанавливаемых по центру штампа или располагаемых на горизонтальном профиле, пересекающем исследуемую площадку.

Наряду с жесткими штампами в последние годы все большее применение находят опыты с использованием плоских и цилиндрических домкратов. Испытания с плоскими домкратами

проводятся в специальной прорези, устраиваемой в основании или одной из боковых стенок выработки. В прорезь помещают плоский домкрат, представляющий собой герметичную камеру из прочного, но легко деформируемого материала. Вокруг плоского домкрата создается цементная подушка (рис. 77). После затвердения цемента в камеру под давлением подается жидкость, с помощью которой создается необходимое давление, передаваемое на грунт. Деформация массива вокруг прорези определяется по объему жидкости, подаваемой в домкрат. Такие опыты часто проводятся в горизонтальном и вертикальном на-

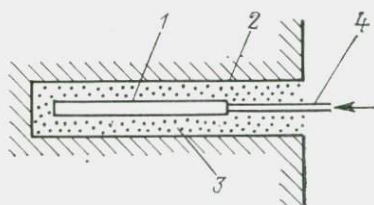


Рис. 77. Схема изучения деформационных свойств скальных грунтов с помощью плоских домкратов:

1 — плоский домкрат; 2 — прорезь в грунте; 3 — цементная подушка; 4 — система подачи жидкости под давлением

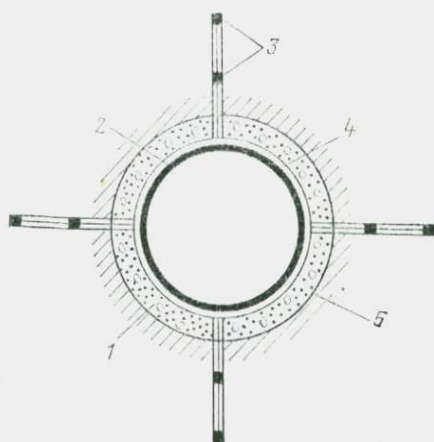


Рис. 78. Схема изучения деформационных свойств скальных грунтов с помощью цилиндрических домкратов:

1 — цементная подушка; 2 — металлическая труба; 3 — приборы для измерения деформации грунта; 4 — цилиндрический домкрат; 5 — стенка выработки

правлениях, с тем чтобы оценить анизотропию свойств грунтов в массиве.

Иногда при работе в туннелях и штольнях применяются цилиндрические домкраты, позволяющие создавать напряжение по всей окружности выработки. Цилиндрические домкраты закладываются между стенкой выработки и жесткой металлической трубой с диаметром несколько меньшим поперечника выработки (рис. 78). Давление задается так же, как и в плоском домкрате. Деформации по радиальным направлениям вокруг выработки измеряют с помощью ряда экстензометров.

Методика штамповых испытаний включает выбор площадки исследований, подготовку ее поверхности, монтаж установки и проведение испытаний.

Выбор площадки исследований и подготовка ее поверхности. При штамповых испытаниях, особенно на стадии детальных исследований (обоснование технических и рабочих проектов), ставится задача изучения сжимаемости всех разностей пород, залегающих в активной зоне сооружения. Поэтому площадки для испытаний выбирают в пределах контура

будущего сооружения или наиболее ответственных его узлов. Для правильной постановки опыта нужно знать точный геологический разрез на всю глубину активной зоны сооружения. Для этого вблизи площадки испытаний (в 3—5 м) проходят разведочную скважину или шурф и тщательно документируют геологический разрез. При работе с дисперсными грунтами это необходимо для того, чтобы выделить литологические разности пород, точно установить границы между ними, оценить состояние пород, их обводненность и т. д. В скальных грунтах отмечают однородность пород, степень и характер их трещиноватости и выветрелости, наличие раздробленных и ослабленных зон. Исходя из этих данных определяются число опытных площадок сверху вниз по разрезу и глубина их заложения. Если в пределах активной зоны сооружения залегает однородная толща грунта, то испытание выполняется только на глубине заложения фундамента. Если в основании сооружения залегает несколько разнородных слоев или зон грунта, различающихся по состоянию и свойствам, то испытаниям должны подвергаться все выделяемые разности пород. В соответствии со СНиП-15—74 для достоверной оценки деформационных свойств необходимо провести не менее трех испытаний для каждой из выделенных разновидностей грунтов. При глубине до 6 м опыты ведутся в котлованах и шурфах. При больших глубинах применяются скважинные способы испытаний. В штольнях и туннелях опыты проводятся на поверхности забоя, стенок или оснований выработки. В некоторых случаях для изучения грунтов, залегающих на некотором расстоянии от основной выработки, создают боковые штреки и колодцы.

После выбора точки испытаний проходится опытный шурф, создается котлован или бурится специальная скважина. Сечение котлована или шурфа по дну должно быть не менее $1,5 \times 1,5$ м. Глубина шурфа (глубина заложения первой от поверхности площадки испытаний) определяется глубиной заложения фундамента сооружения.

Для скважинных испытаний бурится (без промывки) скважина диаметром не менее 325 мм. Применение вибрационного и ударного бурения нежелательно. При проходке в дисперсных грунтах скважина сразу же обсаживается. В процессе создания котлована, шурфа или проходки скважины из 20—30-сантиметрового слоя грунта, залегающего непосредственно над площадкой испытания, отбирается монолит для лабораторных исследований.

Для правильной постановки опыта важное значение имеет тщательная подготовка поверхности площадки, на которую устанавливается штамп. Необходимо, чтобы поверхность площадки была ровной и строго горизонтальной или вертикальной (для исключения перекоса штампа). С этой целью ее тщательно выравнивают специальными ножами и скребками. В скважинах забой выравнивают с помощью специальной ложки.

Для скальных пород применяются отбойные молотки и долота.

Для равномерной передачи нагрузки от штампа на грунт и улучшения дренажа воды под штампом часто на поверхности площадки или забоя скважины делается подсыпка (2—5 см) из сухого средне- и мелкозернистого песка. Окончательное выравнивание поверхности площадки на скальных грунтах достигается путем создания тонкой цементной подушки точно по размеру штампа. Иногда для этих целей применяются плоские домкраты, которые подкладываются под штамп. Опыты показывают, что без соблюдения этих требований к подготовке поверхности грунта погрешности измерений могут возрастать более чем в четыре раза по сравнению с результатами, получаемыми на подготовленных поверхностях.

При подготовке площадки для штамповых испытаний следует обращать внимание на сохранение естественного сложения, плотности и влажности исследуемого грунта. С этой целью испытания необходимо начинать сразу после подготовки выработки, с тем чтобы время между окончанием подготовки площадки и началом испытания не превышало 5 ч. Кроме того, в процессе подготовки выработки и при проведении опыта необходимо принять меры для защиты ее от дополнительного увлажнения, высыхания, промораживания или других повреждений.

Монтаж установки и проведение испытаний. На подготовленную площадку устанавливается штамп, и производится монтаж всей установки. При установке штампа недопустимы даже малейшие перекосы. Монтаж установки начинается с устройства анкеров, несущая способность которых во многом определяет качество всего опыта. Затем собирают остальные узлы установки и приступают к проведению опыта.

Нагрузка штампа производится ступенями давлений, величина которых зависит от типа грунта и его состояния: у дисперсных грунтов они изменяются от 0,01 до 0,1 МПа (ГОСТ 12374—77), а у скальных грунтов может составлять единицы и даже десятки мегапаскалей. При задании определенной ступени нагрузки давление на штамп желательно передавать не мгновенно, а постепенно, с тем чтобы скорость погружения штампа в момент его нагрузки не превышала 2,5 мм/мин. Первая ступень нагрузки должна включать вес штампа и установки. Общее число ступеней после давления, соответствующего природному на отметке испытаний, должно быть не менее четырех.

Каждая ступень нагрузки выдерживается до так называемой условной стабилизации грунта. Стабилизация считается достигнутой, если осадка штампа не превышает 0,1 мм в течение 0,5 ч для скальных и крупнообломочных грунтов, а также крупных песков и в течение 1—3 ч — для всех других грунтов. В том случае, когда ставится задача изучения ползучести грунтов,

штамп выдерживают под какой-либо постоянной нагрузкой от нескольких дней до 25 сут.

После приложения каждой ступени нагрузки наблюдают за осадкой штампа, снимая отсчеты с показаний индикаторов, прогибомеров и экстензометров. Точность измерения осадок должна быть не менее 0,1 мм. При испытании большинства скальных, крупнообломочных и песчаных грунтов отсчеты берутся через каждые 10 мин в течение первого получаса, через каждые 15 мин в течение второго получаса и далее через 30 мин до условной стабилизации осадки. При испытании глинистых грунтов в зависимости от продолжительности наблюдений отсчеты берутся через 15, 30 и 60 мин соответственно в первые и вторые полчаса и далее до условной стабилизации (ГОСТ 12374—77).

При исследованиях дисперсных грунтов нужно получить полную картину развития деформации грунта вплоть до его разрушения. Поэтому необходимо, чтобы конечная ступень нагрузки превышала критическую нагрузку, т. е. нагрузку, при которой достигается предел несущей способности грунта. Переход через критическую нагрузку фиксируется по следующим признакам: а) резкому увеличению осадки штампа при небольшом повышении нагрузки; б) незатухающему деформированию грунта при постоянной нагрузке (идет процесс течения грунта); в) появлению валика выпирания или образованию трещин вокруг штампа (при испытаниях на небольшой глубине).

Очень часто при штамповых испытаниях получают данные не только об общей деформируемости грунта, но и о доли упругих (обратимых) деформаций. Для этого после приложения нескольких ступеней нагрузки штамп постепенно (ступенями) разгружают и регистрируют показания датчиков. Иногда в ходе испытаний проводится до трех разгрузок, затем нагрузку на штамп доводят до разрушающей. После завершения испытаний установка демонтируется и отбирается монолит грунта из-под штампа для лабораторных исследований.

Все результаты опыта заносятся в специальный журнал. В нем содержатся также подробное описание грунта, геологическая колонка исследуемого участка и схема испытаний. Полученные в результате опыта данные представляются в виде двух графиков: зависимости осадки штампа от каждой ступени нагрузки во времени (рис. 79) и кривой суммарной осадки штампа от действующих нагрузок (рис. 80).

Обработка полученных данных

Распределение напряжений под штампом. Напряжения от штампа распространяются в некотором объеме грунта, залегающем под штампом и имеющем вид эллипсоида (луковица напряжений) (рис. 81). Размер активной зоны зависит от площади штампа и возрастает с увеличением послед-

него. Помимо размера штампа на параметры активной зоны влияют состав пород и строение участка исследований, свойства пород, положение уровня грунтовых вод и т. п. При грубых расчетах глубина активной зоны принимается равной двойной-тройной ширине штампа. Поскольку точная мощность сжимаемого слоя грунта неизвестна, при обработке результатов испы-

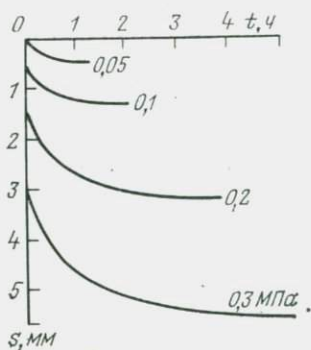


Рис. 79. График зависимости осадки штампа от времени при различных ступенях давлений

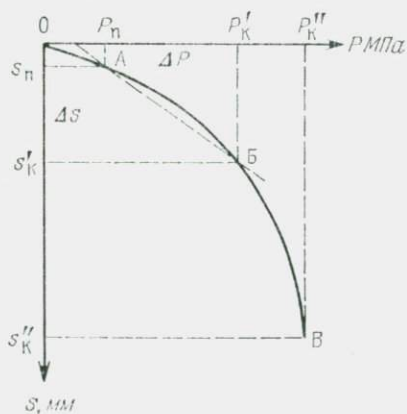


Рис. 80. График зависимости осадки штампа от действующего давления P_n — природное давление; $P'_к$ — критическое давление; $P''_к$ — предел критического давления

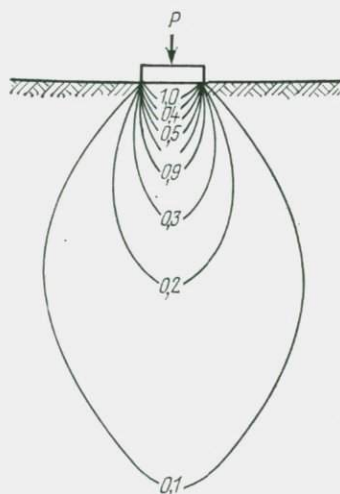


Рис. 81. Распределение напряжений в грунте под штампом (изобары напряжений)

таний используется величина суммарной осадки грунта под штампом S , зависящая как от величины действующей нагрузки и деформационных свойств грунта, так и от размеров активной зоны грунта под штампом.

Определение модуля деформации и расчет осадки сооружений. При доведении испытания до разрушения грунта на деформационном графике (см. рис. 80) можно выделить несколько участков, соответствующих различ-

ным стадиям деформирования грунта; ОА — стадия уплотнения при нагрузках ниже природной, АБ — стадия уплотнения при нагрузках выше природной, БВ — стадия сдвигов. Второй участок характеризуется зависимостью близкой к линейной между напряжениями и деформациями и поэтому используется для нахождения общего модуля деформации грунта E . В основу расчета берется теория упругого деформируемого изотропного полупространства, исходя из которой модуль общей деформации рассчитывается по следующему уравнению

$$E = (1 - \mu^2) \omega d \frac{\Delta P}{\Delta S}, \quad (15.1)$$

где μ — коэффициент Пуассона (для скальных грунтов $\mu = 0,15-0,25$, для крупнообломочных — $0,27$, для песков — $0,30$, супесей — $0,35$, глин — $0,42$); ω — безразмерный коэффициент, равный $0,79$; d — диаметр штампа; ΔP — приращение давления на штамп, равное $P_k' - P_n$ (см. рис. 80); ΔS — приращение осадки штампа, соответствующее ΔP .

При испытаниях скальных грунтов помимо общего модуля деформации находится модуль упругости и модуль при разгрузке. Все эти модули рассчитывают по формуле (15.1), но в расчеты берутся различные значения ΔP и ΔS . Для расчета модуля упругости берутся ΔP и ΔS , соответствующие небольшому участку пропорциональной зависимости между P и S ; для расчета общего модуля деформации берутся ΔP и ΔS , соответствующие всему диапазону нагрузки испытаний, а для расчета модуля при разгрузке используются ΔP и ΔS , получаемые на ветви разгрузки деформационного графика.

При изучении деформационных свойств скальных грунтов методом напорных камер модуль деформации можно найти из следующего выражения [16]:

$$E = \frac{Pa^3(1 + \mu)}{r\Delta r}, \quad (15.2)$$

где P — давление в камере; a — радиус окружности камеры; r — радиус в точке измерения; Δr — изменение радиуса.

Полученные данные по деформации грунта под штампом могут быть использованы для расчета осадки фундаментов сооружений с использованием расчетной схемы линейно-деформируемого полупространства. К. Терцаги и Пек в 1958 г. предложили следующую эмпирическую формулу для такого расчета применительно к пескам и глинам:

$$\frac{S_B}{S_1} = \left(\frac{2B}{B + 0,3} \right)^2, \quad (15.3)$$

где S_1 — осадка грунта под квадратным штампом шириной $0,3$ м; S_B — осадка фундамента при той же нагрузке, что и взятая осадка штампа; B — ширина фундамента.

В общем виде зависимость между осадкой штампа и осадкой фундамента при взятой нагрузке выражается следующей зависимостью:

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^\alpha, \quad (15.4)$$

где S_1 и B_1 — соответственно осадка штампа и его ширина; S_2 и B_2 — соответственно осадка и ширина фундамента; α — параметр, зависящий от размера штампа (α изменяется от 0,30 до 0,80). Для штампа шириной 0,3 м, использованного для получения выражения (15.3), $\alpha=0,4$.

Определение несущей способности грунта. Помимо общего модуля деформации по данным штамповых испытаний можно определить несущую способность грунта, т. е. критическую нагрузку, выше которой в грунте наряду с деформацией сжатия начинают развиваться локальные сдвиги. На рис. 81 этой нагрузке соответствует точка Б. Развитие сдвигов приводит к тому, что осадка штампа резко интенсифицируется, нарушается линейность зависимости между напряжением и деформацией, грунт переходит в состояние предельного равновесия. Дальнейшее, даже незначительное увеличение нагрузки приводит к разрушению грунта и потере им прочности. Несмотря на постоянство нагрузки, деформирование грунта на этой стадии прогрессирует с непрерывно возрастающей скоростью. Величина нагрузки, при которой происходит разрушение грунта (P''_k на рис. 80), получила название предела несущей способности грунта.

Знание несущей способности грунта имеет важное практическое значение, так как позволяет оценить область напряжений, в пределах которой грунт находится в устойчивом состоянии и его деформирование под нагрузкой идет с затуханием.

Определение относительной просадочности лёссов при замачивании

Штамповые испытания широко используются для определения относительной просадочности лёссов при их замачивании под штампом. Чаще всего такие испытания проводятся в шурфах и котлованах со штампом площадью 5000 см². Существует две методики испытаний для оценки просадочности лёссов: по «одной кривой» и по «двум кривым». Первая методика применяется в том случае, когда необходимо определить модуль деформации при естественной влажности лёсса и относительную просадочность при одной величине заданного давления. Схема «двух кривых» используется при необходимости получения всех характеристик просадочности лёссов: модулей деформации грунта при естественной влажности и в водонасыщенном состоянии, начального просадочного давления и относительной просадочности при различных нагрузках.

При проведении испытаний по схеме «одной кривой» нагрузка на штамп задается ступенями до давления P_3 , равного 0,2—0,4 МПа (рис. 82, а). Величина P_3 берется с учетом предполагаемого суммарного давления от сооружения и природной нагрузки от водонасыщенного грунта на отметке испытаний. После достижения условной стабилизации под нагрузкой P_3 грунт в основании штампа замачивают путем заливки непосредственно в шурф или котлован воды, уровень которой в процессе замачивания и проведения опыта поддерживается на 5—10 см выше поверхности песчаной подушки под штампом. В процессе замачивания ведется наблюдение за осадкой штампа: первоначаль-

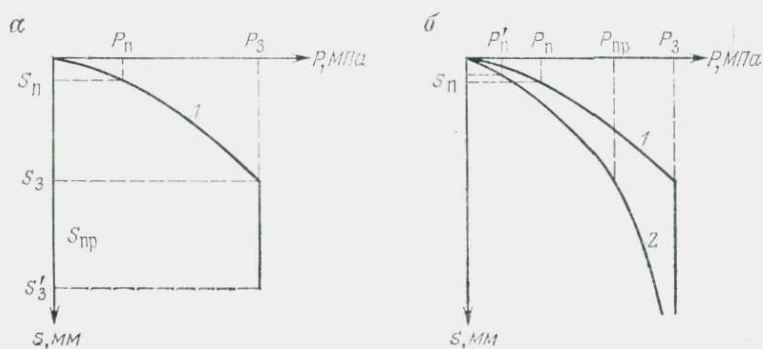


Рис. 82. Графики зависимости деформации грунта от давления при штамповом испытании лёссов с замачиванием, полученные по методам «одной кривой» (а) и «двух кривых» (б):

1 — деформационная кривая лёсса уплотненного, а затем замоченного; 2 — то же, лёсса замоченного до опыта; P_n — природное давление; $P_{пр}$ — начальное просадочное давление; P_3 — давление, при котором производилось замачивание грунта

начально отсчеты с измерительных приборов берутся через каждые 20 мин, а по мере затухания просадки и вплоть до ее полной стабилизации — с интервалом в 1 ч. За условную стабилизацию просадки берется приращение осадки штампа, равное 0,1 мм за 2 ч (ГОСТ 12374—77). По данным измерений строится график $S=f(P)$, исходя из которого рассчитывается модуль общей деформации для лёсса естественного сложения и влажности (для давления $\Delta P = P_3 - P_n$). Расчет модуля ведется по формуле (15.1). Относительная просадочность $\delta_{пр}$ вычисляется по формуле

$$\delta_{пр} = S_{пр}/h_{дф}, \quad (15.5)$$

где $S_{пр}$ — приращение осадки штампа при замачивании грунта под постоянной нагрузкой P_3 ; $h_{дф}$ — величина деформируемой зоны грунта под штампом, принимаемая в зависимости от давления P равной от 0,4 до 2,0 диаметров штампа (ГОСТ 12374—77).

Изучение просадочности лёссов по методу «двух кривых» следует проводить в двух шурфах одинаковой глубины, отстоящих один от другого на 5—6 м. В одном шурфе испытания ведут по методике, аналогичной методу «одной кривой». Во втором шурфе опыт начинается после полного промачивания грунта в шурфе. Затем при непрерывном замачивании грунта осуществляют нагрузку штампа ступенями до давления P_3 . Обе деформационные кривые наносятся на один график (см. рис. 82, б). По результатам испытаний для давления $\Delta P = P_3 - P_{II}$ (кривая 1 на рис. 82, б) определяется модуль общей деформации лёсса до водонасыщения, а по деформационной кривой, полученной после замачивания (кривая 2 на рис. 82, б), находятся модули общей деформации водонасыщенного лёсса: один модуль для давления $\Delta P = P_{III} - P_{II}$, а другой — для давления $\Delta P = P_3 - P_{III}$. Начальное просадочное давление P_{III} определяется по перегибу кривой осадки штампа, полученной для водонасыщенного лёсса.

Относительную просадочность лёсса для необходимой нагрузки можно определять как отношение разности осадок штампа на грунте в водонасыщенном состоянии и на грунте естественного сложения и влажности к величине деформируемой зоны грунта h_{df} . Считается, что значение относительной просадочности, полученное таким образом, соответствует среднему давлению в деформируемой зоне, определяемому по формуле

$$P_{zcp} = (P + P_{III})/2, \quad (15.6)$$

где P — давление по подошве штампа.

Определение осадки мерзлого грунта при оттаивании

В районах развития многолетнемерзлых пород штамповые испытания проводятся для оценки деформационных свойств грунтов не только в мерзлом состоянии, но и после их оттаивания. Для этого после установки штампа и достижения условной стабилизации его осадки при природной нагрузке производят протаивание грунта под штампом. Протаивание осуществляется электронагревателями или циркулирующей горячей водой, обеспечивающими равномерный нагрев дна штампа. Кроме того, вокруг штампа устанавливается внешнее обогревающее устройство, позволяющее расширить зону оттаивания грунта под штампом. Для контроля глубины оттаивания грунта по краям штампа бурятся две скважины диаметром 3—4 см и глубиной 80 см, в которых размещаются температурные датчики с интервалом в 10 см. Оттаивание грунта под штампом проводится на глубину, составляющую 0,5 диаметра штампа (примерно 40 см при использовании квадратного штампа площадью 5000 см²). После стабилизации оттаявшего грунта под природным давлением штамп загружается (ступени давления по 0,05—0,2 МПа).

Под каждой нагрузкой штамп выдерживается до условной стабилизации осадки (приращения осадки не более 0,05 мм за 1 ч).

По величине приращения осадки штампа для каждой степени нагрузки ΔS_i и мощности оттаявшего под штампом грунта H_i находится относительная осадка $\Delta \delta_i$ для отдельных ступеней нагрузки и полная осадка δ штампа:

$$\Delta \delta_i = \Delta S_i / H_i; \quad \delta = \delta_{i-1} + \Delta \delta_i. \quad (15.7)$$

Полученные данные выражаются в виде графика (рис. 83).

По графику находят основные деформационные показатели оттаивающих грунтов — коэффициенты оттаивания A и сжимаемости a . Коэффициент A численно равен отрезку, отсекаемому усредняющей прямой осадки на оси ординат (см. рис. 83). Коэффициент сжимаемости рассчитывается по формуле

$$a = K \frac{\Delta \delta}{\Delta P},$$

где K — безразмерный коэффициент (для крупнообломочных и выветрелых скальных грунтов $K=1,35$, для песков и супесей — 1,30, для суглинков — 1,20, глин — 1); $\Delta \delta$ — определяемое по графику значение приращения относительной осадки оттаявшего грунта, соответствующее интервалу давления ΔP .

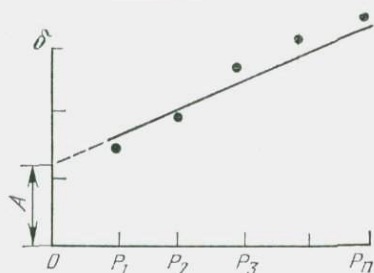


Рис. 83. График зависимости относительной осадки оттаявшего грунта от нагрузки на штамп

Сравнительная оценка модулей деформации по данным полевых и лабораторных методов

Показатели деформационных свойств грунтов, получаемые при штамповых испытаниях, могут существенно отличаться от аналогичных данных, полученных лабораторными методами $E_{л.}$. Поскольку при инженерных изысканиях применяются как те, так и другие методы, важное практическое значение имеет изучение соотношения $E_{шт}$ и $E_{л.}$. Следует сказать, что у скальных и дисперсных грунтов оно может быть различным. У скальных грунтов влияние масштабного эффекта в основном связано с неоднородностью грунта (прежде всего с его трещиноватостью), которая возрастает с увеличением исследуемого объема грунта. Поэтому при испытании однородных (нетрещиноватых) грунтов величины общего модуля, и особенно модуля упругости, полученные по данным штамповых и лабораторных испытаний, могут иметь близкие значения. При увеличении неоднородности скальных грунтов значения модуля упругости и модуля общей деформации, полученные при штамповых испыта-

ниях, заметно меньше величин модулей, полученных в лаборатории. По этой причине установление постоянных соотношений между значениями $E_{шт}$ и $E_{л}$ для скальных грунтов не представляется возможным. Очевидно, что в каждом конкретном случае эти соотношения будут иметь свои значения, при этом величина $E_{шт}/E_{л}$ может быть меньше единицы.

Для дисперсных грунтов характер отношения $E_{шт}/E_{л}$ существенно меняется. По данным ряда авторов, значение модуля общей деформации, полученное при компрессионных испытаниях, для всех дисперсных грунтов заметно ниже по сравнению со штамповыми испытаниями. Значение переходного коэффициента $E_{шт}/E_{л}$ больше единицы и изменяется от 1,5 до 6, возрастая с увеличением связности грунта. По мнению О. И. Игнатовой, несоответствие значений $E_{шт}/E_{л}$ обусловлено несколькими причинами: 1) частичным нарушением естественного сложения при отборе и подготовке образца к компрессионным испытаниям; 2) различиями в характере напряженного состояния грунта в компрессионном приборе и под штампом; 3) несоответствием условий оттока воды из грунта в компрессионном приборе и под штампом; 4) приближенной оценкой коэффициента Пуассона при расчете $E_{шт}$; 5) невозможностью точного определения мощности и деформируемой зоны при штамповых испытаниях.

15.2. ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ПРЕССИОМЕТРОВ

Прессиометрия, или испытание пород прессиометрами, заключается в принудительном расширении части ствола буровой скважины равномерно распределенным давлением. К стенкам скважины это давление передается через специальный зонд, имеющий эластичную (чаще резиновую) оболочку и датчик перемещений. Давление, создаваемое в зонде с помощью сжатого воздуха, повышают заданными ступенями. На каждой ступени измеряют само давление P и диаметр скважины d . Результаты этих измерений служат основой для построения графика прессиометрических испытаний, сходного по виду и смыслу с графиками других испытаний пород на сжимаемость.

В настоящее время для проведения прессиометрических испытаний используются одиночные скважины. Но по аналогии с опытно-фильтрационными исследованиями эти испытания могут проводиться как в одной центральной скважине, так и с измерением деформаций пород датчиками, установленными в ряде наблюдательных скважин (рис. 84). По результатам таких измерений могут быть построены дополнительные графики в координатах «расстояние от оси центральной скважины — деформация».

При построении графика прессиометрических испытаний обычно вместо диаметра d выбирают его приращение Δd или

приращение радиуса скважины Δr . На графике $\Delta r = f(P)$ (рис. 85) выделяют три участка: обжатия стенок скважины OA , уплотнения AB и сдвигов BC . С помощью наибольшей ординаты первого участка определяют начальный радиус скважины r_0 . Второй участок является почти линейным. По его наклону к осям координат оценивают сжимаемость породы, поэтому его считают основным. С помощью третьего криволинейного участка можно оценить прочностные свойства породы.

Методом прессиометрии могут быть опробованы как рыхлые, так и скальные породы на глубине до нескольких десяти-

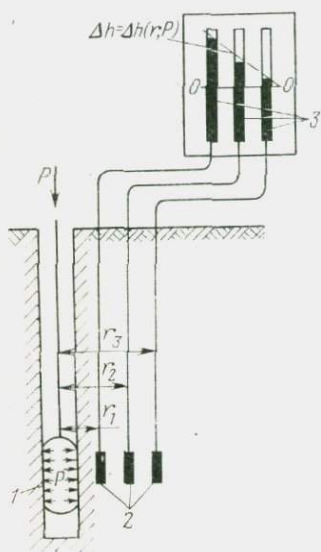
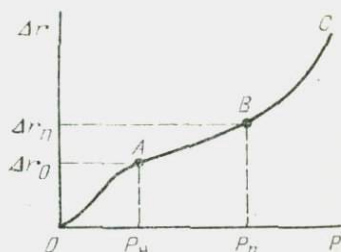


Рис. 84. Схема испытаний пород прессиометром:

1 — скважинный зонд прессиометра; 2 — датчики деформометров; 3 — водомерные трубки

Рис. 85. График прессиометрических испытаний



ков метров. В зависимости от режимов испытаний метод принимается в двух модификациях — как экспрессный (при региональных исследованиях) и как длительный (при изучении пород в основаниях различных сооружений). Наибольший опыт проведения прессиометрических испытаний накоплен при исследованиях нескальных пород для строительства. В этой области метод регламентирован стандартом (ГОСТ 20276—74).

Теоретическое обоснование

Основной (второй) участок графика $\Delta r = f(P)$ является почти линейным, поэтому при его интерпретации используется аппарат классической теории упругости. Соответственно в качестве деформационных констант породы как изотропного тела рассматривают модуль общей деформации E и коэффициент Пуассона μ .

С геометрических позиций буровая скважина в горном массиве представляет собой аналог трубы с бесконечно большой

толщиной стенок. В рамках теории упругости задача деформирования такой трубы решена французским инженером Ляме. В соответствии с этим решением изменение напряжений, радиальных перемещений и деформаций породы характеризуют следующим образом:

$$\sigma_r = -\Delta P \left(\frac{r_0}{r} \right)^2; \quad \sigma_t = \Delta P \left(\frac{r_0}{r} \right)^2; \quad u = \Delta r \frac{r_0}{r}; \quad (15.8)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = -\frac{\Delta r}{r_0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2; \quad \varepsilon_t = \frac{u}{r} = \frac{\Delta r}{r_0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2, \quad (15.9)$$

где σ_r и σ_t — соответственно радиальные и окружные напряжения; ΔP — приращение давления на участке уплотнения породы; r_0 — начальный радиус буровой скважины; r — расстояние рассматриваемой точки от оси буровой скважины; u — радиальные перемещения на удалении r ; Δr — приращение радиуса r_0 при увеличении давления на величину ΔP ; ε_r и ε_t — соответственно радиальные и окружные деформации.

Решая уравнения (15.8) и (15.9) совместно с физическим, получаем

$$E = (1 + \mu) r_0 \frac{\Delta P}{\Delta r}. \quad (15.10)$$

После проведения прессиометрических испытаний по графику $\Delta r = f(P)$ устанавливают r_0 , ΔP и Δr , поэтому для оценки модуля деформации E по формуле (15.10) остается выбрать вторую константу породы — μ ; обычно ее выбирают по таблице в зависимости от типа породы.

Сопоставительные испытания показывают, что модули деформации, рассчитанные по формуле (15.10), чаще оказываются в два-три раза меньше, чем полученные в результате испытаний стандартным штамповым методом. Поэтому в ГОСТ 20276—74 формула (15.10) представлена в виде:

$$E = K r_0 \frac{\Delta P}{\Delta r}, \quad (15.11)$$

где K — корректирующий коэффициент.

Происхождение коэффициента K объясняется такими причинами, как завышение предела пропорциональности при выборе его по графику $\Delta r = f(P)$, анизотропия пород, их разуплотнение при бурении и т. п. Вместе с тем в ходе экспериментов обнаружены и другие причины, затрагивающие теоретические основы метода. В. С. Христофоров и Г. А. Задворнев измеряли напряжения при испытаниях песчаной породы в лотке диаметром 1000 мм, в центре которого находилась скважина с начальным диаметром 60 мм. Исследования показали, в частности, что при всех давлениях на стенки скважины как окружные напряжения σ_t , так и радиальные σ_r являются сжимаю-

щими. По формулам (15.8) напряжения σ_t должны быть растягивающими.

С. Л. Кореновой и С. Е. Снеговой в 1976 г. измерены объемные деформации глинистых пород в натуральных условиях по схеме, показанной на рис. 84. Измерения проводились с помощью датчиков, сходных по устройству с зондами прессиометров гидравлического действия. В результате обнаружено, что при расширении буровой скважины вокруг ее ствола образуется зона объемного сжатия пород. Причем она формируется и тогда, когда деформирование пород является обратимым, т. е. упругим. По формулам (15.9) деформирование пород должно происходить без образования этой зоны, так как согласно этим формулам $\epsilon_r + \epsilon_t = 0$.

Теоретические разработки, позволяющие объяснить всестороннее сжатие пород, прилегающих к зонду прессиометра, приведены в работе [22]. Основу их составляет тот же исходный аппарат, что и в решении Г. Ляме, но дополненный построениями, которые направлены на соблюдение закона упругости в следующей формулировке: каковы напряжения в уравнении статики, таковы и деформации в уравнении совместности.

Обычно напряжения σ_r и σ_t при составлении уравнения статики задают растягивающими, а деформации ϵ_r и ϵ_t при составлении уравнения совместности — по характеру неопределенными. Эта неопределенность и снимается дополнительными построениями. В результате применительно к прессиометрии выявляются следующие закономерности:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\Delta P \left(\frac{r}{r_0} \right)^a \cos \left(b \ln \frac{r}{r_0} \right); \\ \sigma_t &= -\Delta P \left(\frac{r}{r_0} \right)^a \cos \left(b \ln \frac{r}{r_0} + \alpha \right); \\ u &= \Delta r \left(\frac{r}{r_0} \right)^{1+a} \cos \left(b \ln \frac{r}{r_0} \right),\end{aligned}\quad (15.12)$$

где a , b и α — константы, зависящие от коэффициента Пуассона и равные соответственно:

$$a = -\frac{1-2\mu}{1-\mu}; \quad b = \frac{\sqrt{1-2\mu}}{1-\mu}; \quad \alpha = \arctg \frac{\sqrt{1-2\mu}}{\mu}. \quad (15.13)$$

Совместное решение уравнений (15.12) с физическим уравнением при учете представлений об уровнях отсчета напряжений и перемещений [22] ведет к получению формулы (15.11), в которой корректирующий коэффициент может быть выражен двояко: 1) при выборе радиальных напряжений и перемещений с разными знаками

$$K_1 = (1 + \mu) \sqrt{1 - 2\mu} e^{\frac{\pi}{2} \sqrt{1 - 2\mu}}; \quad (15.14)$$

2) при выборе радиальных напряжений и перемещений с одинаковыми знаками

$$K_2 = (1 + \mu) \sqrt{1 - 2\mu} e^{\frac{\pi\mu}{2\sqrt{1-2\mu}}}, \quad (15.15)$$

где $e = 2,72$.

Из коэффициентов K_1 и K_2 теоретически более строгим является первый. С увеличением μ до 0,5 K_1 уменьшается до нуля, как при компрессионном сжатии. Коэффициент K_2 с увеличением μ до 0,5 возрастает до бесконечности. При этом модули деформации, вычисленные по формуле (15.11) и полученные штамповым методом, сближаются.

Формулы (15.12) указывают на возможность экспериментального определения второй константы сжимаемости пород — коэффициента Пуассона μ . Для этого удобна связь между объемными деформациями и коэффициентом Пуассона. В такой постановке исследований прессиометрические испытания должны проводиться с измерением объемных деформаций θ с помощью датчиков, установленных в наблюдательных скважинах.

Если наблюдения за объемными деформациями проводить в трех-четыре точки (см. рис. 84), то по ним можно построить экспериментальный график $\theta = \theta(r)$ при выбранных ΔP , r_0 и Δr . Этот график позволяет найти радиус r_q , где объемные деформации θ_q равны нулю. Тогда μ можно определить по формуле

$$\operatorname{ctg} \left(b \ln \frac{r_q}{r_0} \right) = \sqrt{1 - 2\mu}. \quad (15.16)$$

Если наблюдения за деформациями вести в одной точке, то μ можно определять на основе формулы

$$\theta_x \frac{r_0}{\Delta r} = \frac{1}{1 - \mu} \left(\frac{r_x}{r_0} \right)^a \left[\cos \left(b \ln \frac{r_x}{r_0} \right) - \sqrt{1 - 2\mu} \sin \left(b \ln \frac{r_x}{r_0} \right) \right], \quad (15.17)$$

где θ_x — объемные деформации в точке наблюдений, удаленной от оси возбуждающей скважины на расстояние r_x .

Опыт испытания пород с наблюдениями за объемными деформациями в массиве пока еще невелик, поэтому представленные формулы для определения коэффициента Пуассона могут претерпеть некоторые изменения.

По формулам (15.12) и вытекающим из них зависимостям деформирования пород в зоне влияния прессиометра в существенной мере определяется коэффициентом Пуассона. Причем доминирующее влияние на поведение пород оказывает величина $1 - 2\mu$, т. е. отличительный показатель потенциальной энергии деформации, характеризующей изменение объема. Соответственно представляет интерес предельный случай, когда $\mu = 0,5$. Из формул (15.12) и (15.13) следует, что в этом случае напря-

жения изменяются по гидростатическому закону, а коэффициент K_1 в формуле (15.11) равен нулю. Это значит, что упругие деформации при $\mu=0,5$ невозможны; вместе с тем известно, что при $\mu=0,5$ происходит разрушение пород. Следовательно, по мере увеличения нагрузки на породу коэффициент Пуассона также возрастает, что и приводит к некоторому нарушению линейности графиков $\Delta r = \Delta r(P)$. Интенсивное нарушение этой линейности начинается, видимо, тогда, когда в какой-либо части объема породы коэффициент Пуассона становится равным 0,5. Такое состояние породы уместно связать с пределом пропорциональности, поэтому известны попытки использовать нелинейный (третий) участок графика $\Delta r = \Delta r(P)$ для оценки прочностных свойств пород. Интересные построения такого рода представлены в работе [43], где в качестве основы рассматривается решение смешанной задачи с использованием формул (15.8). В несколько ином плане предложены построения в работе [22], основанные на формулах (15.12). Однако представительного объема сопоставительных опытов по оценке прочностных свойств пород методом прессиометрии исследователями пока не получено. Поэтому основным назначением этого метода остается изучение деформационных свойств пород.

Приборы для прессиометрических испытаний

Приборы бокового давления — прессиометры состоят из трех основных узлов: скважинного зонда, наземного измерительного блока и линии связи между ними (рис. 86).

Наземный измерительный блок содержит устройства для создания и измерения давления в скважинном зонде, а также приборы для регистрации радиальных перемещений стенок скважины.

Скважинный зонд представляет собой металлическую трубу, окруженную резиновой или резиноканевой оболочкой, которая для создания герметичности зонда охватывается сверху и снизу жесткими фланцами. Чтобы сохранить целостность резиновой оболочки, зонд прессиометра иногда опоясывают укрепляющими поясами, благодаря которым оболочка равномерно растягивается по всему объему. Диаметр зонда определяется размером скважины, в которой предполагается проведение испытаний. В нашей стране чаще применяются прессиометры с диаметром зонда 89, 108, 127 мм. За рубежом наиболее употребимы зонды диаметром 32, 44, 58, 70, 95 и 115 мм. Длина зонда устанавливается из теоретических посылок и должна составлять не менее четырех его диаметров.

По способу передачи давления на породу прессиометры разделяются на две группы — гидравлического и пневматического действия. В приборах первой группы камера зонда и трубопровод, соединенный с ней, заполняются жидкостью, а в приборах второй группы — воздухом. Избыточное давление в обоих слу-

чаях создается сжатом газом. Различия в принципе действия приборов определили и их конструктивные особенности.

В прессномерах гидравлического действия скважинный зонд состоит из трех камер: центральная камера является рабочей, а две другие — вспомогательными. Назначение камер состоит в том, чтобы поддерживать вокруг рабочей камеры равномерное цилиндрическое поле напряжений. Рабочая камера через

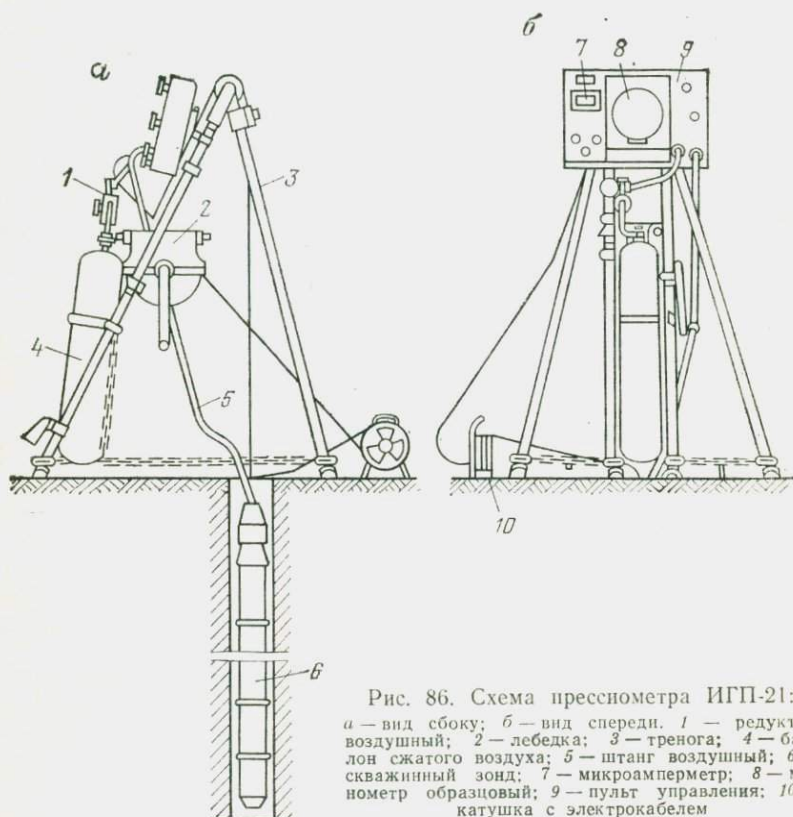


Рис. 86. Схема прессномера ИГП-21:

а — вид сбоку; *б* — вид спереди. 1 — редуктор воздушный; 2 — лебедка; 3 — тренога; 4 — баллон сжатого воздуха; 5 — штанг воздушный; 6 — скважинный зонд; 7 — микроамперметр; 8 — манометр образцовый; 9 — пульт управления; 10 — катушка с электрокабелем

соединительные штанги связана с мерным цилиндром, установленным над устьем скважины. Перед испытаниями зонд, соединительные штанги и мерный цилиндр заполняют до нулевой отметки водой, а затем с помощью сжатого газа, поступающего через редуктор в мерный цилиндр, во всех камерах создают одинаковое рабочее давление. По падению уровня воды в цилиндре в процессе опыта определяют изменение объема рабочей камеры ΔV , а затем, отнеся ΔV к начальному объему V_0 , получают соотношение
$$\frac{\Delta V}{V_0} = 2 \frac{\Delta r}{r_0}.$$

Отличительной особенностью пневмоэлектрических прессиометров является то, что они содержат одну рабочую камеру, заполняемую воздухом, а радиальные перемещения измеряются электромеханическими деформометрами, датчики которых во избежание влияния «концевого эффекта» устанавливаются в центральной части зонда. Регистрирующие электрические устройства, расположенные на поверхности земли, соединяются с датчиками зонда с помощью электрокабелей. Выходными приборами этих устройств являются микроамперметры, шкалы которых прокалиброваны в единицах измерения диаметра зонда. Сжатый воздух подается по шлангам от баллонов высокого давления или от насосов разных конструкций.

Технические характеристики некоторых из прессиометров, разработанных рядом научно-исследовательских организаций, приведены в табл. 28. Из этих приборов наиболее широкое распространение получили прессиометры гидравлического действия ДТ-76 и П-89. За рубежом широко применяются гидравлические

Таблица 28

Технические характеристики прессиометров

Марка прибора	Диаметр рабочей камеры, мм	Предельное давление на породу, МПа	Максимальная глубина испытания, м	Абсолютная погрешность измерения деформаций, мм	Масса прибора, кг	Примечание
<i>Прессиометры пневмоэлектрического действия</i>						
ПФ-3	90—100	0,7	25,0	$\pm 0,1$	50	Конструкция ГПИ Фундамент- проект
ЭВ-90/127	90—127	1,0	15,0	$\pm 0,1—0,15$	35	Конструкция УПИ им. Кирова
ИГП-21	100	2,4	25,0	1,0—3,0	85	Конструкция СКБ
ПС-2	96	0,7	30,0	$\pm 0,1$	25	ВСЕГИНГЕО Конструкция ГПИ Фундамент- проект
<i>Прессиометры гидравлического действия</i>						
П-89	89	1,0	5,0	$\pm 0,15$	20—25	Конструкция УПИ им. Кирова
ПС-1	90	0,8	15,0	$\pm 1,0$	35—40	Конструкции ГПИ Фундамент- проект
ДТ-76	76	25,0	Испытания проводят из горных выработок	$\pm 0,0003$	3,6	Конструкции НИИОСП

прессиометры конструкции Л. Менара, которые существуют в двух модификациях — для скальных и для рыхлых пород.

Опыт работы с прессиометрами гидравлического и пневматического действия показал, что, хотя пневматические приборы более сложны по устройству, они обладают рядом серьезных преимуществ: более компактны, не требуют дополнительного времени для монтажа и демонтажа, пригодны для работы в любое время года.

В последние годы, помимо скважинных приборов бокового давления, появились прессиометры, не требующие бурения скважины. Они оснащены специальными лидирующими устройствами (водоструйное устройство, вращающееся долото), обеспечивающими погружение прибора в массив, и предназначены для исследования водонасыщенных песков и глин.

Примерно теми же достоинствами обладают прессиометры, рабочая поверхность которых плоская (как у обычного штампа). Их погружают на заданную глубину установкой статического зондирования.

При проведении испытаний по схеме, изображенной на рис. 84, необходимы измерители объемных деформаций. В качестве простейшего измерителя может служить металлическая трубка, нижний конец которой перфорирован и закрыт эластичной оболочкой длиной 20—30 см. После установки в наблюдательную скважину полость этой трубки заполняется жидкостью и соединяется шлангом со стеклянной водомерной трубкой. Для удобства наблюдений жидкость в водомерной трубке можно подкрасить.

Подготовка и проведение испытаний

Требования к бурению скважин. Перед началом бурения скважин для прессиометрических испытаний необходимо иметь достаточно полное представление о геологическом строении изучаемой территории. Если в разрезе преобладают устойчивые породы, то скважину бурят до заданной глубины, а затем консервируют или тут же опробуют прессиометром. В первом случае разрыв во времени между окончанием проходки скважины и проведением испытаний не должен превышать 2 сут. Чтобы избежать деформирования ствола скважины и обеспечить свободное движение зонда в ней, рекомендуется опробование от забоя к устью скважины.

Если в геологическом строении района преобладают слабые породы или сыпучие пески, то опробование скважины выполняют вместе с бурением. Последовательность работ при этом следующая. Скважину проходят на глубину, отвечающую назначенному интервалу опробования, и закрепляют обсадными трубами. Затем в нее опускают зонд прессиометра, обсадные трубы приподнимают на высоту зонда и проводят испытания. При проходке сыпучих песков иногда бывает удобна конструкция из

двух колонн обсадных труб. Первую колонну опускают на глубину, соответствующую началу интервала опробования, а вторую — располагают в интервале, намеченном для испытаний. После спуска зонда на заданную глубину вторую колонну обсадных труб поднимают на высоту снаряда и затем проводят испытания.

Проходка скважин для проведения прессиометрических испытаний может осуществляться как механическим, так и ручным бурением. Основное требование к способу бурения состоит в том, чтобы он обеспечил максимальное сохранение природного сложения и влажности пород в стенках скважин. Согласно ГОСТ 20276—74 ударно-канатное и шнековое бурение следует прекращать не доходя до интервала 1 м, на котором будут проводиться испытания. Для проходки намеченных интервалов опробования рекомендуется медленное вращательное бурение ложковыми бурами. При бурении слабоувлажненных глинистых пород подливать воду в скважину не следует, так как даже незначительное количество воды может вызвать повышение липкости пород в стенках скважины, что существенно затруднит извлечение зонда после завершения испытаний. При бурении скважины в водонасыщенных глинистых породах можно использовать глинистый раствор, обеспечивающий устойчивость стенок скважины без осадки труб.

В целях исключения осложнений при спуске и подъеме зонда буровая скважина должна быть вертикальной. Допустимое расхождение между диаметром скважины и диаметром снаряда зонда не должно превышать 15—25 мм, так как в противном случае эластичная оболочка зонда может разорваться, не коснувшись стенок скважины.

Дополнительные наблюдения за объемными деформациями следует проводить так, чтобы положение точек наблюдения было известным, а нарушение природного состояния пород — минимальным. Точки наблюдения целесообразно выбирать в зоне, где ожидаемая величина деформаций значительна, а рассеяние создаваемых напряжений невелико. Для этого наблюдательные скважины располагают на расстоянии не более 50 см от оси возбуждающей скважины. При небольших глубинах (до 4 м) их удобно бурить вручную забивкой стаканов из газовых труб диаметром $\frac{1}{2}$ — $\frac{3}{4}$ ". При этом важно задать всем скважинам, в том числе и возбуждающей, одинаковое вертикальное направление. Сразу после бурения на намеченной для проведения испытаний глубине наблюдательных скважин устанавливаются датчики, полости которых тут же заливаются жидкостью. После этого водомерные трубки, связанные с датчиками, можно оставить открытыми. Однако для лучшего воссоздания природного состояния в массиве к свободным концам водомерных трубок целесообразно присоединить баллон сжатого воздуха с тем, чтобы эластичными оболочками датчиков создавать давление на породе, равное природному.

Градуировка измерительных устройств. Давление, создаваемое в прессиометре, обычно измеряют на входе прибора образцовыми манометрами. Это давление расходуется на деформирование породы и эластичной оболочки.

Под действием давления деформируются такие элементы, как соединительные шланги, разделительные мембраны и др. У прессиометров гидравлического действия измеряемое изменение объема ΔV состоит из двух частей: одна связана с деформированием пород, а другая — с деформированием элементов прибора. Для выделения первой прессиометры гидравлического действия градуируют по давлению и по деформациям.

Градуировка прессиометров по давлению и деформациям производится одновременно. Выполняется она на поверхности с помощью трех-четырёх калиброванных отрезков стальных обсадных труб размером не менее длины всего зонда прессиометра. Наименьший диаметр трубы выбирается по диаметру зонда, а наибольший — примерно в 1,5 раза больше. Градуировка осуществляется в следующем порядке. Зонд прессиометра помещают в трубу наименьшего диаметра и подключают к устройству для создания давления и измерения деформаций таким же образом, как и при испытаниях пород. Затем его нагружают ступенями давления (не более 0,25 МПа) и измеряют деформации. Подобное погружение зонда производят во всех выбранных трубах, причем в трубах каждого диаметра проводят не менее трех градуировочных испытаний. Вычислив затем значение деформаций при одинаковом давлении, строят градуировочные кривые в координатах «давление — приращение радиуса» или «давление — снижение мениска в водомерной трубке». Начальные ветви градуировочных кривых, построенных для разных труб, объединяют общим графиком, характеризующим потери давления на свободное расширение камеры прессиометра. Эти потери и являются поправкой, исключаемой из общего измеряемого давления. Поправка к деформациям определяется наклоном градуировочных кривых, построенных по калиброванным трубам (рис. 87).

Одновременно с градуировочными испытаниями проверяют герметичность отдельных частей прессиометра и зонда. Эту проверку выполняют как при максимальных, так и при минимальных давлениях, указанных в паспорте прибора. При малых давлениях выявляют дефекты эластичной оболочки зонда, для этого к нему подсоединяют баллон со сжатым воздухом и повышают давление с таким расчетом, чтобы диаметр зонда увеличился в 1,3—1,5 раза. Затем зонд опускают в емкость, заполненную водой, и наблюдают за поверхностью воды. При наличии дефектов в оболочке зонда газ в виде пузырьков будет выходить из воды.

Герметичность прессиометра при максимальных давлениях проверяют для выявления качества всех соединений. Для этого зонд помещают в калибровочную трубу наименьшего диаметра

и создают в нем максимальное давление. После этого зонд отсоединяют от баллона со сжатым воздухом и, если в системе давление будет неизменным в течение нескольких часов, можно считать, что система герметична.

Режимы испытаний. В соответствии с целевым назначением инженерно-геологических исследований различают две методики проведения прессиометрических испытаний — ускоренную и длительную.

Ускоренная методика предполагает быстрое ступенчатое повышение давления в скважинном зонде. В соответствии с требованиями ГОСТ 20276—74 измерения деформаций на каждой ступени нагружения при исследовании песчаных пород проводят через каждую минуту в течение первых трех минут, а далее через три минуты до стабилизации деформаций. При исследовании глинистых пород перемещения на каждой ступени давления измеряют каждые две минуты в течение первых шести минут, а затем каждые шесть минут до условной стабилизации деформаций.

Преимуществом ускоренной методики является то, что общая продолжительность одного испытания составляет 15—25 мин. Однако эти испытания несут в себе существенные погрешности методического плана. В частности, при их проведении в водонасыщенных породах возникает высоко поровое давление, искажающее результаты испытаний, поэтому в Советском Союзе область применения ускоренных испытаний ограничена региональными инженерно-геологическими исследованиями. При детальной разведке (ГОСТ 20276—74) их можно проводить только в том случае, если предварительно выполнены сопоставительные испытания пород при быстром и медленном режимах нагружения.

Длительные испытания, как и ускоренные, предполагают ступенчатое возрастание давления в прессиометре. Величина ступени нагружения зависит от консистенции глинистых пород и пористости песчаных отложений и торфов (табл. 29).

Опыт работ показал, что в глинах твердой консистенции степень давления может быть увеличена до 0,2 МПа, а в глинах полутвердой консистенции — до 0,1 МПа. При исследовании крупнообломочных пород степень давления может быть принята равной 0,1 МПа, тогда как при исследовании илов и торфов степень давления не должна превышать 0,01 МПа.

Каждую ступень давления выдерживают до условной стабилизации. В соответствии с ГОСТом за условную стабилизацию

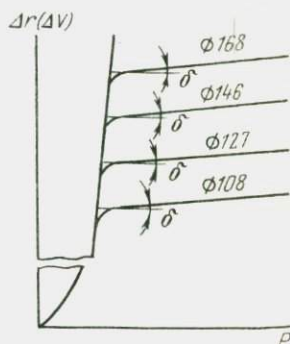


Рис. 87. График градуировки прессиометра

цию принимают приращение радиуса скважины, не превышающее 0,1 мм за время, указанное в табл. 30.

Отсчеты по приборам для измерения перемещений на каждой ступени давления при испытании песчаных пород выполняют через каждые 5 мин в течение первых 15 мин, далее че-

Таблица 29

Ступени давления при длительных испытаниях

Грунты	Ступень давления, МПа
Песчаные	0,1
плотные $\varepsilon < 0,55$	
средней плотности $0,55 < \varepsilon < 0,75$	0,05
рыхлые $\varepsilon > 0,75$	0,025
Глинистые	
$0 < I_L < 0,5$	0,05
$0,5 < I_L < 1,0$	0,025

рез 15 мин до условной стабилизации деформаций. При испытании глинистых пород отсчеты по приборам снимают через каждые 10 мин в течение первых 30 мин, а затем через 30 мин до условной стабилизации деформаций.

Таблица 30

Время условной стабилизации давления при различных режимах испытаний

Грунты	Режим испытания	Время условной стабилизации, мин
Песчаные	Медленный	15
	»	30
неводонасыщенные	Быстрый	3
Глинистые	Медленный	30
	»	60
$I_L \leq 0,25$	Быстрый	6
$I_L > 0,25$		

Опыт, проведенный по методике медленного нагружения, считают законченным, если деформации от предыдущей ступени давления в два (или более) раза меньше, чем деформации от последующей ступени нагружения. Продолжительность одного испытания, проведенного при медленном режиме, составляет 6—8 ч.

При наличии наблюдательных скважин в процессе испытаний регистрируют положение уровней в водомерных трубах деформометров. Регистрация по мерной шкале производится од-

новременно с измерением перемещений стенок возбуждающей скважины.

Обработка результатов испытаний

Обработка данных полевых испытаний проводится в два этапа. На первом этапе получают график $\Delta r = \Delta r(P)$, а на втором — проводят оценку модуля общей деформации E . Если при испытаниях наблюдают за объемными деформациями θ в других точках массива, расположенных на глубине испытаний, то на первом этапе дополнительно строят графики $\theta = \theta(P)$ и $\theta = \theta(r)$, а на втором — определяют коэффициент Пуассона μ и модуль деформации E . Все исходные графики строят по результатам измерений, соответствующим условной стабилизации деформаций.

Операции первого этапа обработки результатов испытаний пород пневмоэлектрическими пресснометрами выполняют в следующем порядке: 1) по данным полевых измерений строят предварительный график $\Delta r = \Delta r(P_{\text{пр}})$ в координатах «давление в приборе — приращение радиуса зонда»; 2) по данным градуировки прибора строят еще один график в тех же координатах; 3) по разности абсцисс экспериментальных точек графика и соответствующих точек градуировочной кривой определяют величину давления зонда на породу P ; 4) по величинам P и Δr для опытных точек строят график $\Delta r = \Delta r(P)$ и выделяют на нем участки, показанные на рис. 85.

Если испытания проведены гидравлическим пресснометром, то операции первого этапа обработки выполняют следующим образом:

1) для каждой точки измерений определяют давление в приборе $P_{\text{пр}}$ на глубине испытаний H как сумму измеренного давления $P_{\text{изм}}$ и гидростатического давления $P_{\text{г}}$ в линии связи, т. е. находят $P_{\text{пр}} = P_{\text{изм}} + P_{\text{г}} = P_{\text{изм}} + \gamma H$ (где γ — объемная масса рабочей жидкости); 2) строят предварительный график $\Delta V_{\text{пр}} = \Delta V_{\text{пр}}(P_{\text{пр}})$ в координатах «давление в приборе — измеренное изменение объема жидкости»; 3) по данным градуировки строят еще один график в тех же координатах; 4) по разности абсцисс экспериментальных точек графика и градуировочной кривой находят давление зонда на породу P ; 5) по значениям P для точек измерения и углу δ (см. рис. 87) устанавливают поправку $\Delta V_{\text{ш}}$ на деформирование шлангов $\Delta V_{\text{ш}} = P \operatorname{tg} \delta$; 6) для опытных точек предварительного графика определяют приращение объема рабочей камеры $\Delta V = \Delta V_{\text{пр}} - \Delta V_{\text{ш}}$; 7) по значениям P и ΔV для одних и тех же опытных точек строят график $\Delta V = \Delta V(P)$ с выделением тех же участков, что и на графике $\Delta r = \Delta r(P)$ (см. рис. 85).

В начале второго этапа обработки определяют значения r_0 , Δr и ΔP , входящие в формулу (15.11), или V_0 , ΔV и ΔP . Для определения радиуса r_0 через начальную точку участка уплот-

нения (см. рис. 85) проводят линию, параллельную оси давлений, и находят величину Δr_0 . Зная радиус зонда $r_{св}$ и значение Δr_0 , устанавливают $r_0 = r_{св} + \Delta r_0$. Величины Δr и ΔP по рис. 85 получают соответственно как $\Delta r = \Delta r_n - \Delta r_n$ и $\Delta P = P_n - P_n$. Аналогичным образом находят значения V_0 , ΔV и ΔP с помощью графика $\Delta V = \Delta V(P)$ и начального объема рабочей камеры гидравлического прессиометра. Так как $\Delta V : V_0 = 2\Delta r : r_0$, то в дальнейшем графики $\Delta r = \Delta r(P)$ и $\Delta V = \Delta V(P)$ рассматривают как идентичные.

После нахождения величин r_0 , Δr и ΔP выбирают корректирующий коэффициент K к формуле (15.11). Выбор этот может производиться в соответствии с разными рекомендациями. Одни из них изложены в ГОСТ 20276—74, в соответствии с которым величина K , как правило, должна определяться по результатам сопоставительных испытаний пород штампом (ГОСТ 12374—77) и прессиометром. Для проектирования оснований зданий и сооружений II—IV классов величину K при медленном режиме испытаний можно принимать (по ГОСТ 20276—74) для песчаных и глинистых пород четвертичного возраста в зависимости от глубины испытаний следующим образом: при 5 м $K=3$, при 5—10 м $K=2$, при 10—15 м $K=1,5$.

Другие рекомендации выбора коэффициента K к формуле (15.11) выражены формулами (15.14)—(15.15), согласно которым коэффициенты K зависят только от коэффициента Пуассона μ . Величину μ обычно рекомендуют принимать следующей: для песков 0,20—0,25; для супесей и суглинков 0,30—0,35; для глин 0,42.

Экспериментально значение μ может быть установлено с помощью результатов измерения объемных деформаций θ . В случае применения гидравлических деформометров величина θ в каждой точке измерений определяется как $\theta = m\Delta h$ (где Δh — изменение положения уровня жидкости в водомерной трубке; m — постоянная деформометра, равная $m = \left(\frac{d_m}{D}\right)^2 \frac{l}{l}$, d_m — внутренний диаметр водомерной трубки; D — диаметр наблюдательной скважины; l — длина эластичной оболочки датчика деформометра).

Результаты измерения величин Δh обрабатываются так: 1) для каждого деформометра выделяют величину Δh_0 , соответствующую исправленному значению давления в возбуждающей скважине, равному нулю; 2) по результатам измерений $\Delta h_{изм}$ находят приращения высоты уровня жидкости $\Delta h = \Delta h_{изм} - \Delta h_0$; 3) пользуясь исправленными значениями давления P в возбуждающей скважине и соответствующими им приращениями высоты уровня жидкости Δh , для каждой наблюдательной скважины строят графики $\Delta h = \Delta h(P)$; 4) на графиках $\Delta h = \Delta h(P)$ выделяют точки, соответствующие давлениям P_n и P_n (см. рис. 85); 5) с помощью ординат выделенных точек определяют величину Δh , соответствующую разности $\Delta P = P_n - P_n$; 6) по

формуле $\theta = m\Delta h$ вычисляют величину объемных деформаций, соответствующих участку уплотнения.

Если наблюдения за деформациями θ велись в трех-четырех и более точках, то, пользуясь полученными значениями θ для каждого деформометра, строят график $\theta = \theta(r)$ в координатах «расстояние от оси возбуждающей скважины — объемные деформации». При этом за величину r принимают расстояние между осями возбуждающей и наблюдательной скважин, измеренное на поверхности. Далее по пересечению графика $\theta = \theta(r)$ с осью абсцисс находят радиус r_q , где $\theta_q = 0$. Величину коэффициента Пуассона μ определяют из формулы (15.16), для чего следует построить график $\frac{r_0}{r_q} = \frac{r_0}{r_q}(\mu)$.

Если наблюдения за объемными деформациями велись в одной скважине, то по величинам θ и Δr , соответствующим участку уплотнения, коэффициент Пуассона определяют с помощью формулы (15.17). Для этого целесообразно построить графики $\theta = \theta\left(\frac{r_0}{\Delta r}\right)$ при $\mu = \text{const}$ и $r_x = \text{const}$.

После определения μ по формулам (15.14) и (15.15) находят коэффициенты K_1 и K_2 к формуле (15.11). Для этого также удобно построить графики $K_1 = K_1(\mu)$ и $K_2 = K_2(\mu)$.

Коэффициент K_1 следует выбирать в случае сопоставления модулей деформации, полученных методами прессиометрии и компрессионного сжатия. Коэффициент K_2 корректирует значения E , приближая их к модулям деформации, получаемым стандартным штамповым методом. После выбора коэффициента K при установленных значениях r_0 , ΔP и Δr определяют модуль общей деформации E по формуле (15.11).

Опыт определения коэффициентов Пуассона по результатам прессиометрии, а вместе с тем и применения коэффициентов K_1 и K_2 пока мал. Однако можно ожидать, что наблюдения за деформациями пород в зоне влияния прессиометра позволят создать достаточно строгую картину поведения этих пород под нагрузкой, что, в свою очередь, даст возможность полнее раскрыть сущность коэффициентов типа K_1 и K_2 .

15.3. ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

При проектировании часто возникает необходимость рассчитать деформации горных пород в основании того или иного сооружения, обусловленные его весом. Выполнить такой расчет можно с помощью модуля деформации E_0 , представляющего собой коэффициент пропорциональности между действующим напряжением σ и вызванной им деформацией

$$\sigma = E_0 \epsilon_0. \quad (15.18)$$

Различие между модулем упругости E и модулем деформации E_0 состоит в том, что первый описывает поведение породы

следуемой породе. Различаются они между собой лишь масштабом измерений, зависящим, в свою очередь, от частот используемых колебаний. В сейсмическом методе используются колебания частотой в десятки герц, а базы измерений составляют десятки метров. При ультразвуковом методе наблюдения ведутся на частотах в десятки и первые сотни килогерц, что позволяет измерять скорости на базах в единицы или в лучшем случае в десятки сантиметров. Это приводит к тому, что в сейсмическом методе на измеренные значения скоростей оказывают влияние все системы трещин — от микроскопических до самых крупных, а в ультразвуковом — только самые мелкие. Отсюда ясно, что при оценке модуля деформации следует использовать преимущественно данные сейсморазведки или ультразвуковые наблюдения на максимальных базах. Поскольку техника определения модуля деформации по значениям скоростей одинакова как для сейсмического, так и для ультразвукового методов, в дальнейшем условимся говорить только о сейсмическом методе оценки деформационных характеристик, имея в виду, что скорости могут быть измерены как в сейсмическом, так и в ультразвуковом диапазонах частот.

Сейсмический метод по сравнению со штамповыми испытаниями обладает рядом существенных преимуществ: 1) позволяет охарактеризовать любой объем породы — от долей метра до соизмеримого с площадью сооружения; 2) дает возможность достаточно быстро и с небольшими затратами покрыть съемкой большую площадь и построить карту или графики распределения значений модуля деформации по площади или в сечениях-разрезах; 3) условия определения E_0 унифицированы и не оказывают влияния на получаемые значения параметра; 4) позволяет оценить влияние масштабного фактора на величину модуля деформации.

Физические предпосылки для использования скоростей распространения упругих волн с целью определения деформационных характеристик горных пород следующие. В настоящее время не вызывает сомнений, что между значениями динамического E_d и статического E_c модулей упругости существует устойчивая связь. Анализ данных деформационных испытаний показывает, что величины статического модуля упругости и модуля деформации взаимосвязаны, если для их вычисления использован один график деформации. Порода с большими значениями модуля упругости всегда характеризуется и более высоким модулем деформации, и наоборот. А поскольку, как установлено, между значениями E_d и E_c существует связь, она должна существовать также и между E_d и E_0 . Следовательно, сейсмический и ультразвуковой методы можно применять для косвенного нахождения значений модуля деформации.

Особенностью связи между динамическими и статическими упругими характеристиками является возможность описать эту связь единым уравнением. Применительно к связи $E_0 = f(E_d)$

сделать этого нельзя. Как показал опыт, для разных типов горных пород, равно как и для различных участков строительства, существуют свои соотношения этой связи.

В настоящее время накоплен достаточно большой материал о соотношениях $E_0=f(E_d)$ для различных горных пород, обобщенный А. И. Савичем и З. Г. Ященко [37].

На начальном этапе исследований первую прикидку значений E_d по материалам сейсмических исследований можно сделать, подобрав среди известных уже соотношений породу-аналог, наиболее близкую по типу, составу и возрасту к исследуемой, и пользоваться соответствующим ей графиком связи. При отсутствии такой породы-аналога, а также для более точного определения деформативных характеристик необходимо для данных конкретных условий составить корреляционный график $E_0=f(E_d)$ или $E_0=f(v_p)$.

Решение задачи возможно несколькими путями. Различие заключается в способе отыскания корреляционного соотношения.

Сейсмические методы определения модуля деформации

Способ прямой корреляции. Он заключается в непосредственном сопоставлении величин динамического модуля упругости, вычисленного по результатам измерения сейсмических скоростей на участке штольни, где размещены штампы деформационных испытаний, и модуля деформации, определенного по этим штампам. Иногда с модулем деформации сопоставляется величина скорости продольных волн. Основной недостаток этого способа — несоблюдение требований равной масштабности определений, обусловленное несоизмеримостью объемов породы, вовлекаемых в работу при деформационных испытаниях и при распространении сейсмической волны. В соответствии с существующими представлениями, сейсмическая волна, распространяющаяся вдоль свободной границы, захватывает слой породы, равный примерно четверти длины волны. Длины же продольных сейсмических волн, распространяющихся в скальных грунтах, обычно измеряются десятками метров. Это значит, что масштабность определений двумя рассматриваемыми способами различается не менее чем на порядок. При наличии достаточного числа штамповых опытов на изучаемом участке штольни это затруднение можно в известной степени обойти, если для участка штольни с постоянным значением скорости использовать при сопоставлении среднее значение из общего числа определений модуля деформации, приходящихся на данный интервал.

Способ косвенной корреляции. В этом способе связь между динамическим модулем упругости и модулем деформации устанавливается через промежуточный параметр — статический модуль упругости E_c . При решении этой задачи вначале находятся два независимых соотношения $E_c=$

$=f(E_d)$ и $E_0=f(E_c)$. Путем совместного их решения и исключения параметра E_c получается выражение $E_0=f(E_d)$, устанавливающее непосредственную связь рассматриваемых величин. Смысл такого преобразования заключается в том, что непосредственному сопоставлению подвергаются величины E_d и E_c , E_c и E_0 , определяемые экспериментально с соблюдением всех требований о равной масштабности парных измерений. Действительно, каждая пара значений E_0 и E_c также найдена по общему графику деформации, построенному по результатам натурных штамповых испытаний.

Единственное затруднение в способе косвенной корреляции — это выделение по графикам деформации величины модуля упругости, названного А. И. Савичем модулем идеальной упругости $E_{ид}$ и являющегося по своей физической сущности аналогом статического модуля упругости при испытаниях на образцах. Сущность этой операции заключается в разделении упругой деформации на идеально упругую и релаксационную части или, иначе, в исключении влияния фактора времени на значение статического модуля упругости. Дело в том, что в объемах породы, испытывающих деформацию при штамповых испытаниях, всегда присутствует определенное число мелких трещин, на поверхности которых возникают области с концентрацией напряжений. В пределах этих областей для некоторых кристаллов предел упругости может оказаться превышенным и они начинают «течь», т. е. испытывать пластические деформации. Переход в область пластических деформаций осуществляется для различных частиц при разных величинах напряжений. Следовательно, пока напряжения не достигли некоторого предела $\sigma_{кр}$, горная порода ведет себя как идеально упругое тело. При превышении $\sigma_{кр}$ все большее число частиц будет «течь». Соответственно изменяется скорость деформации, и график деформации приобретает криволинейную форму. При дальнейшем росте напряжений часть трещин закрывается и сокращается площадь участков, где возможна концентрация напряжений. Это приводит к уменьшению скорости деформации: крутизна графика деформации увеличивается. После снятия нагрузки в кристаллах, предел упругости которых не был превзойден, возникнут напряжения обратного знака и они будут стремиться принять свои первоначальные формы и размеры. Этому будут препятствовать частицы, испытывшие пластические деформации, — под влиянием упруго сжатых частиц они «потекут», но уже в обратном направлении. Начнется постепенное восстановление формы, которое будет продолжаться до тех пор, пока в пластически деформированных частицах напряжения не окажутся ниже критических.

Для определения $E_{иу}$ А. И. Савичем предложен следующий прием: 1) через начальную и конечную точки кривой разгрузки заданного цикла нагружений (точки A и B на рис. 88) проводится прямая, угловой коэффициент которой пропорционален

модулю упругости E_c ; 2) параллельно AB проводят прямую CD , усредняющую точки центральной части ветви разгрузки, 3) точки A и C соединяют прямой, тангенс угла наклона которой пропорционален модулю упругости $E_{иу}$.

Найденная таким образом величина $E_{иу}$ сопоставляется с общим модулем деформации E_0 , полученным по тому же графику деформации. Как видно из описания, выделение величин $E_{иу}$ носит определенный элемент субъективизма, что в известной степени усложняет реализацию способа косвенной корреляции.

Сравнение соотношений $E_d = f(E_0)$, полученных с соблюдением всех необходимых требований методами прямой и косвенной корреляции для одной серии опытов, показало вполне удовлетворительное их совпадение. Поэтому, учитывая достоинства и недостатки каждого из методов, с равным успехом можно применять каждый из них.

После того как для данного участка исследований или типа породы найден вид связи $E_0 = f(E_d)$ или $E_0 = f(v_p)$ и построены соответствующие им графики, они в дальнейшем могут быть использованы для определения величин E_0 в любом месте, где проведены сейсмические наблюдения (в штольне, скважине или на дневной поверхности).

В качестве примера на рис. 89 приведены усредненные графики связи $E_0 = f(E_d)$ и $E_0 = f(v_p)$ для карбонатных, метаморфических и изверженных пород. Их можно использовать на начальных стадиях изысканий для первоначальной, самой грубой оценки ожидаемых значений деформационных характеристик.

Способ А. И. Ваксара и О. К. Воронкова. Этот способ позволяет оценить величину E_0 непосредственно по измеренным величинам скоростей, т. е. минуя промежуточный этап составления корреляционных соотношений.

Анализируя результаты совместных определений модуля деформации и общей пустотности породы, А. И. Ваксар и О. К. Воронков пришли к выводу о тесной связи этих двух параметров. Исходным материалом послужили результаты определения E_0 методом плоских штампов диаметром 0,8—1,0 м по первому циклу нагружения. Максимальные давления в опытах достигали 8 МПа. Общая пустотность породы определялась по значениям скоростей упругих волн в шпурах, пробуренных в районе штампов. Анализ данных определения пустотности n и модуля деформации E_0 в породах различных типов, характеризующихся невысокой (до 3 %) пористостью, при общей пустотности, достигающей 15 %, показал, что между значениями названных параметров существует достаточно тесная связь, выражающаяся соотношением

$$E_0 = E_{d_{\max}} \left(\frac{1-n}{150n+1} \right), \quad (15.19)$$

где $E_{d_{\max}}$ — максимальная величина динамического модуля упругости для данного типа породы. Корреляционное соотношение

ние характеризуется высокой теснотой связи (коэффициент корреляции $r=0,91 \pm 0,05$).

Решая уравнение (15.19) совместно с уравнением среднего времени и исключая параметр n , можно получить следующее выражение

$$E_0 = E_{д\max} \frac{\frac{v_{ск}}{v_3} - \frac{v_{ск}}{\bar{v}}}{150 \left(\frac{v_{ск}}{\bar{v}} - 1 \right) + \frac{v_{ск}}{v_3} - 1}, \quad (15.20)$$

где $v_{ск}$ — скорость продольных волн в скелете породы, т. е. при

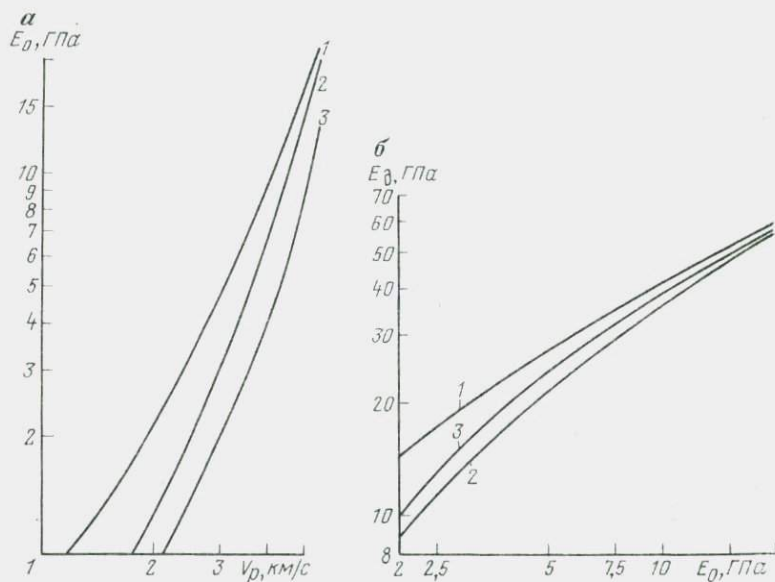


Рис. 89. Усредненные графики связи между скоростью продольных волн и модулем общей деформации (а) и между динамическим модулем упругости и модулем общей деформации (б) (по А. И. Савичу):

1 — карбонатные породы; 2 — изверженные породы; 3 — метаморфические породы

$n=0$; \bar{v} — измеренная скорость; v_3 — скорость в заполнителе пор и трещин.

Иными словами, формула (15.20) дает выражение модуля деформации непосредственно через величину измеренной скорости \bar{v} .

Для пород, изученных А. И. Ваксаром и О. К. Воронковым, величина $E_{д\max} = 120$ ГПа. В прочих случаях оценку $E_{д\max}$ следует производить по значениям $v_{p\max}$ и корреляционному графику $E_{д} = f(v_p)$ для соответствующего типа породы.

Достоинство последнего способа оценки модуля деформации заключается в возможности непосредственного нахождения E_0

по измеренным в процессе геофизических наблюдений величинам скоростей. Его недостаток — необходимость при вычислениях задаваться значениями параметров $v_{ск}$, v_3 и E_d , непосредственно не измеряемых при наблюдениях, что обуславливает определенную приближенность результатов. Тем не менее практика показала, что расчет значений E_0 по формуле (15.20) для некоторых типов горных пород, не изучавшихся А. И. Ваксаром и О. К. Воронковым, и сопоставление их с величинами E_0 , определенными по соответствующим корреляционным графикам, дает удовлетворительную сходимость. Поэтому для предварительной оценки значений модуля деформации вполне можно пользоваться формулой (15.20).

Таким образом, как следует из изложенного выше, сейсморазведка располагает достаточным числом разнообразных способов решения задачи оценки модуля деформации скальных грунтов в условиях их естественного залегания (выходящих на дневную поверхность и скрытых под чехлом рыхлых образований). В зависимости от конкретных условий оценка может быть сделана приближенно, или с точностью, удовлетворяющей требованиям проектирования.

Оценка анизотропности деформационных свойств массива методами сейсморазведки

Как известно, скальные массивы, сложенные породами с текстурными проявлениями (например, гнейсами, метаморфическими сланцами) или состоящие из тонкослоистых песчаников, алевролитов, известняков, равно как и сложенные изотропными, но разбитыми ориентированными системами трещин породами, характеризуются, как правило, анизотропией деформационных показателей. Причем в ряде случаев такая анизотропия может быть весьма существенной. Выявление анизотропности массива по деформационным показателям с помощью испытаний прямыми методами представляет собой нелегкую и трудоемкую задачу. В то же время незнание или недоучет анизотропных свойств массива при инженерных расчетах могут обернуться неприятными последствиями. Неоценимую помощь здесь может оказать комплекс сейсмических исследований, позволяющий оценить анизотропность породы по значениям скоростей как на уровне образца (ультразвуковое прозвучивание), так и в условиях массива. В последнем случае набор сейсмических методов достаточно широк и включает как ультразвуковые измерения в шпурах по методике профилирования и прозвучивания, так и различные виды сейсмических наблюдений на дневной поверхности и в горных выработках. От анизотропии по скоростям легко перейти к анизотропии деформационных показателей: модуль упругости пропорционален квадрату скорости. Поэтому считается, что если известна анизотропия породы по скоростям, то можно установить анизотропию по деформационным показателям.

Кратко рассмотрим основные способы оценки анизотропных свойств массива по скоростям.

1. Для тех или иных целей, в том числе и для определения упругих и деформационных показателей породы, в горных выработках бурят системы шпуров. Проводя ультразвуковое прозвучивание между двумя параллельными шпурами или сочетая профилирование и прозвучивание, можно получить в плоскости шпуров векторную диаграмму скоростей.

2. Для характеристики скоростной анизотропии больших блоков породы используют результаты сейсмического прозвучивания между скважинами или горными выработками. Базы прозвучивания составляют десятки метров. Получаемые круговые диаграммы или индикатрисы скоростей могут быть расположены как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости.

3. Для характеристики скоростной анизотропии верхней части массива могут быть использованы данные сейсмических наблюдений на дневной поверхности. С этой целью отрабатывают четыре—шесть пересекающихся в одной точке непротяженных сейсмических профилей. Наблюдения ведут по методике продольного или симметричного профилирования; в последнем случае сейсмоприемник и точка возбуждения колебаний одновременно и симметрично удаляются от общего центра установки. Наблюдения по методике симметричного профилирования выполняют с помощью одноканальной аппаратуры и с применением ударного способа возбуждения колебаний.

Оценка масштабного фактора при определении деформационных свойств породы

Как известно, скальные массивы всегда характеризуются большей или меньшей неоднородностью, обусловленной непостоянством соотношения минеральных компонентов в разных точках пространства, изменением пористости, трещиноватости, состава и количества заполнителя пор и трещин, прочностью цемента, различием напряженного состояния и т. д. Для неоднородных сред характерно проявление так называемого масштабного эффекта, заключающегося в зависимости той или иной характеристики от объема изучаемой породы. В частности, масштабный эффект присущ упругим и деформационным характеристикам, в том числе и скоростям распространения упругих волн. Обычно чем больший объем неоднородностей породы вовлечен в работу, тем меньше соответствующее значение модуля упругости или деформации. Объясняется это тем, что при увеличении объема на деформируемость породы влияет все большее число трещин различных порядков.

Характер изменения скорости в трещиноватой среде может быть проиллюстрирован результатами опыта, суть которого заключается в измерении скорости ультразвуковых волн по методике прозвучивания в образце, имитирующем трещиноватую

породу. Образец состоит из постепенно возрастающего числа цементных кубиков, тесно прижатых друг к другу. Скорость в таком образце при увеличении числа прозвучиваемых кубиков постепенно уменьшается от v_0 до v_∞ (где v_0 — скорость ультразвука в монолитной среде; v_∞ — то же, в блочной среде, состоящей из множества кубиков). Текущее значение скорости v_m определяется из соотношения

$$v_m = v_0 \frac{1}{1 - \frac{n-1}{n} \theta}, \quad (15.21)$$

где v_0 — скорость в материале кубиков; n — число кубиков при данной базе измерений; θ — время прохождения волной трещины.

Аналогичным образом изменяется скорость и при увеличении базы измерений в реальном горном массиве, когда в работу постепенно вовлекается все большее число блоков, разделенных трещинами разных порядков. Преимущество сейсмического метода по сравнению с методом пробных нагрузок заключается в данном случае в возможности неограниченно увеличивать базу измерений, доводя ее при желании до размеров, соизмеримых с габаритами сооружения. В методе пробных нагрузок предельная база практически никогда не превышает 1 м. Примеры, иллюстрирующие возможности сейсмического метода при оценке масштабных проявлений, приведены в разд. 11.3.

Проведенное рассмотрение показывает, что сейсмический метод не только позволяет оценить численное значение деформационных показателей для любого объема породы, но при этом автоматически учитывает их изменение в функции объема деформируемой среды. Ни один прямой метод не располагает такой возможностью.

Способы представления результатов определения деформационных характеристик

В отличие от прямых методов определения деформационных характеристик скальных грунтов, позволяющих получать величины E_0 в ограниченном числе точек массива, сейсмический метод дает возможность построения разрезов и карт распределения значений модуля деформации.

Сейсморазведочные наблюдения на дневной поверхности обычно выполняются по методике продольного профилирования, позволяющей представить данные обработки материалов наблюдений в виде разрезов. При этом, если скальный массив выходит на дневную поверхность или прикрыт мало-мощным рыхлым чехлом, сейсморазведка дает возможность оценить общую мощность, а в ряде случаев расчленить поверхностную зону выветривания на отдельные горизонты. Перейти

от значений скорости к значениям модуля деформации, используя описанные выше приемы, не представляет трудности. Если на участке работ имеются разведочные штольни, то сейсмические наблюдения выполняют по всей их длине от устья до забоя. Преобразуя графики зависимости скорости от расстояния $v=f(x)$ в графики $E_0=f(x)$ и обобщая их в пределах плоскости створа будущей плотины, строят обобщенный разрез, на котором выделены зоны с различными значениями модуля деформации. Если на участках проектируемых сооружений проводилась площадная сейсморазведка, то построенная по ее результатам карта распределения скоростей продольных волн по кровле скального массива или по подошве зоны выветривания представляет собой исходный материал для преобразования ее в карту значений модуля деформации (см. рис. 31).

Глава 16

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

16.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СКАЛЬНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ

Прочностные свойства массивов скальных горных пород необходимо учитывать при проектировании и строительстве различных ответственных наземных и подземных сооружений (плотины, карьеры, шахты, тоннели).

Массивы скальных грунтов, как любые физические тела, обладают прочностными свойствами, которые отражают их способность реагировать на те или иные нагрузки, вызываемые как инженерной деятельностью, так и природными факторами. Основными характеристиками, описывающими прочность скального массива, являются: прочность на сжатие, на разрыв и сдвиг, а также прочность при объемном напряженном состоянии. Прочность на сжатие предусматривает наличие одноосного напряженного состояния, возникающего в целиках горных пород при камерной обработке полезного ископаемого, в массивах между горными выработками и вокруг выработанного пространства. Представить прочность массива на разрыв значительно сложнее, тем не менее тот факт, что в массиве возникают свежие трещины разрыва, предполагает наличие растягивающих напряжений, которые превышают сопротивляемость пород растяжению. Напряженное состояние массива, соответствующее прочности при сдвиге, можно наблюдать на естественных склонах, в искусственных откосах, в основании плотин. И наконец, прочность при объемном напряженном состоянии является значительно более общим случаем, имеющим место в реальных горных массивах и объясняющим возникновение разрушений в земной коре.

В соответствии с экспериментальными данными показатели прочности в неоднородных и анизотропных средах зависят от размеров неоднородностей по отношению к исследуемой зоне или области воздействия сооружения, а также от направления действия нагрузки.

Неоднородность среды приводит к проявлению масштабного эффекта в отношении прочностных характеристик. В общем случае графики масштабного эффекта прочностных свойств, отражающие уменьшение показателей этих свойств с увеличением масштаба измерений аппроксимируются кусочно-гладкими кривыми, точки перегиба которых соответствуют границам блоков различных порядков. Из этого следует, что установленные опытным путем характеристики прочностных свойств справедливы лишь для масштаба измерений, для которого они определены. Если при переходе к более крупным объемам породы качество дефектов и других элементов неоднородности не изменилось, то можно ожидать, что показатели прочности не подвергнутся значительным изменениям. Если же переход к более крупным объемам породы сопровождается качественным изменением ее состава, строения и состояния, то изменятся и показатели прочности.

Прочностные свойства массивов горных пород определяются двумя группами факторов. К первой группе относятся: генезис, минеральный состав, структурные и текстурные особенности слагающих их пород или ассоциаций, характер и степень первичной трещиноватости, неоднородности и анизотропности. Вторая группа включает характеристики состояния пород в массиве: вторичную трещиноватость, выветрелость, изменчивость, обводненность, специфику проявления естественных напряжений, температурный режим, вторичную неоднородность и анизотропность. Наибольшие сложности возникают при учете влияния факторов второй группы, которым часто принадлежит определяющая роль в формировании прочностных свойств массивов [30].

Методы определения прочностных свойств в натуральных условиях можно подразделить на четыре основные группы [33]. К первой группе относятся методы, основанные на искусственном нагружении некоторых участков массива пород и регистрации усилий, при которых происходит их разрушение. Во вторую группу входят методы, связанные с опытными горными работами, приводящими к разрушению крупных частей массива (целиков). Методы третьей группы предусматривают точечное, сосредоточенное нагружение пород в массиве различными портативными приборами. И наконец, четвертую группу составляют приближенные корреляционные методы, предусматривающие оценку прочностных свойств реальных массивов любых объемов с учетом их трещиноватости, обводненности, неоднородности, анизотропности и напряженного состояния на основании измерения в условиях естественного залегания физи-

ческих характеристик, связанных с показателями прочности корреляционными зависимостями.

Методы искусственного нагружения участков массивов

Эти методы представляют собой крупномасштабные опыты, которые позволяют учесть масштабный эффект. Испытание крупных блоков породы связано с определенными техническими трудностями. Этим объясняется ограниченное применение их и отсутствие общепринятых методик натуральных исследований. В зависимости от целей исследований подобные натурные испытания, как правило, проводятся для решения конкретных вопросов, например, для определения несущей способности целиков при подземной отработке некоторых месторождений полезных ископаемых или их участков, для выполнения расчетов устойчивости бортов глубоких карьеров или устойчивости отдельных элементов ответственных гидротехнических сооружений и т. д.

Обычная схема таких испытаний состоит в следующем. Характерный участок массива оконтуривают в виде прямоугольной призмы с нескольких сторон, сохраняя связь с остальным массивом лишь по одной или двум плоскостям. Для нарезки (обуривания) призм используют врубную машину (в слабых породах) или буровые скважины и алмазные дисковые щелеобразователи (в крепких породах). При этом следует иметь в виду, что размеры нагружаемых участков массива должны превышать характерные размеры структурных неоднородностей не менее чем в 10 раз.

Для получения достоверных результатов необходимо стремиться к предохранению опытных призм от разгрузки и разуплотнения, что требует максимального приближения испытаний к проходке подземных выработок, в которых располагаются призмы. Перед началом испытаний проводятся детальное описание и зарисовка всех неоднородностей опытной призмы.

В настоящее время применяется несколько способов определения прочностных (а одновременно нередко и деформационных) свойств скальных пород непосредственно в массиве. Среди них наиболее известны схемы испытаний, разработанные преимущественно в связи с задачами промышленного освоения угольных месторождений и строительства крупных гидротехнических объектов на скальных основаниях. Краткое описание этих схем приведено ниже.

Определение прочности на сжатие. На выровненную поверхность призмы через стальные плиты с помощью гидравлических домкратов или иных нагрузочных устройств подается нагрузка вплоть до разрушения призмы. Одна из схем такого нагружения показана на рис. 90. Расчет прочности массива на сжатие проводится по формуле $R_c = P/S$ (где P — раз-

рушающая нагрузка; S — площадь поперечного сечения призмы). Наряду с описанным методом применяют схему нагружения двоякозащемленных или консольных балок. Наиболее часто в горном деле используются призмы размером 0,25—1,00 м.

Определение прочности на сдвиг методом ВНИМИ. Схема испытаний, предложенная Г. Л. Фисенко [45], предусматривает возможность определения сдвиговых характеристик пород непосредственно в массиве по контактам, отдельным слоям, прослоям или трещинам. В пределах изучаемого объекта (горная выработка, участок основания строящегося сооружения и пр.) на специально подготовленную призму трапецевидной формы, опирающуюся на исследуемый контакт,

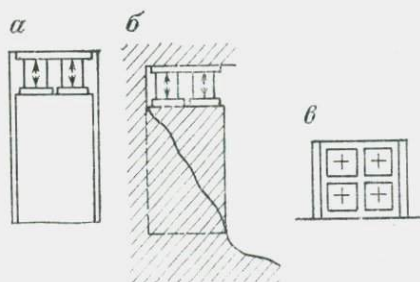


Рис. 90. Схема определения прочности на сжатие и деформируемости породных призм при нагружении гидравлическими домкратами в натуральных условиях:

a — призма, подготовленная к испытаниям; b — боковая проекция призмы; v — план призмы с установленными домкратами

одной нагрузкой (домкратом) создаются нормальная и сдвигающая силы (рис. 91). Размеры призмы могут быть от десятков сантиметров до 2 м. В момент сдвига призмы по заданной плоскости уравнение равновесия имеет следующий вид:

$$P \sin \alpha - (P \cos \alpha + g) \operatorname{tg} \varphi - cS = 0, \quad (16.1)$$

где P — предельная нагрузка; α — угол между направлением приложения нагрузки и плоскостью сдвига призмы; g — вес призмы; c и φ — соответственно сцепление и угол трения в плоскости сдвига; S — плоскость сдвига призмы.

Решение уравнения (16.1) относительно одной из характеристик (c и φ) изучаемого контакта пород в массиве при прочих известных показателях позволяет определить искомую величину. В связи с тем, что подобные сдвиговые испытания проводятся обычно при двух различных углах α (45 и 60 °С), совместное решение соответствующих уравнений позволяет определить значения c и φ .

Определение прочности на сдвиг с отдельным заданием нормальной и сдвигающей нагрузок. Для этой цели обуривают или вырезают целики в виде прямоугольных призм, которые сохраняют контакт с массивом только по основанию. Испытания обычно проводят в специальных подземных галереях или штольнях, проходку которых следует осуществлять без применения взрывчатки. Для передачи

на целик вертикальной и горизонтальной нагрузок и их распределения по всей площади контакта опытный целик одевают в железобетонную рубашку.

Вертикальную нагрузку прикладывают с помощью гидравлических домкратов, стальных плит и катков между ними для обеспечения возможности касательного смещения целика. Сдвигающую нагрузку также прикладывают с помощью гидравлических домкратов, как правило, под некоторым углом к поверхности сдвига для ликвидации момента сдвигающей силы относительно центра тяжести сечения плоскости сдвига.

Испытания проводятся для характерных участков массива на целиках, содержащих трещины и слабые прослои, либо без

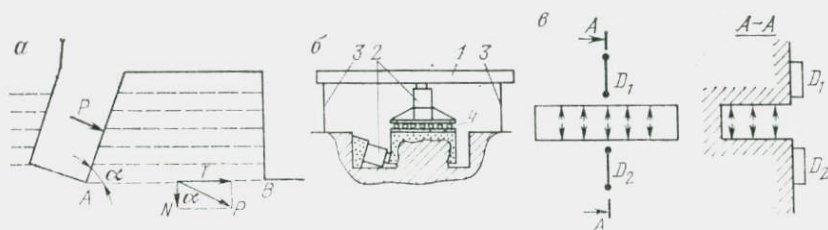


Рис. 91. Схемы сдвиговых испытаний:

a — сдвиг одной нагрузкой; *б* — сдвиг с независимыми нормальной и сдвигающей нагрузками; *в* — схема нагружения щели в массиве. 1 — упорная балка; 2 — домкрат; 3 — анкер; 4 — роликовая постель D_1 и D_2 — деформометры

них. Прочность на сдвиг определяется величиной $\tau = \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi$ (где τ — касательное напряжение в образце; σ — нормальное напряжение в образце; $\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент трения).

Для особо важных сооружений часто проводят испытания больших целиков, площадь сдвига которых измеряется несколькими квадратными метрами, а иногда и десятками метров. Так, при сооружении плотины Братской ГЭС на р. Ангаре было проведено испытание целика скальной породы размером в плане 7×7 м и высотой 5,5—6 м, вырезанного в створе плотины. При изысканиях под плотину Красноярской ГЭС был осуществлен сдвиг гранитных целиков размером $8 \times 12 \times 7$ м. В Японии был осуществлен сдвиг скального целика объемом 30 м^3 .

Определение прочности на сдвиг при измерении напряженного состояния массива. Широко применяется на практике схема натуральных испытаний, при которой нагружающее устройство помещается в специально подготовленную в стенке массива щель или нишу (см. рис. 91). По такой схеме обычно одновременно проводятся измерения напряженного состояния массива методом компенсации и определение прочности пород. Испытания выполняются в такой последовательности: до начала подготовки щели на стенке массива устанавливаются деформометры, которые при вырезании щели фиксируют изменение напряженного состояния прилега-

ющих к ней частей массива. При передаче нагружающим устройством давления на стенки щели происходит восстановление первоначального напряженного состояния массива, которое регистрируется вплоть до возвращения показаний деформометров в исходное положение. Разность конечных и исходных показаний деформометров позволяет оценить величину напряженного состояния массива. Дальнейший рост нагрузки на стенки щели в конечном итоге приводит к разрушению частиц массива.

Проведенные по этой схеме сопоставительные испытания прочности пород в массиве и в образцах показали, что получаемые при таких испытаниях значения прочности массива в 1,5—2,5 раза меньше, чем при испытании образцов, и частично зависят от способа нагружения массива.

По этой схеме под руководством Я. А. Бича проводились длительные определения прочности угля и силвинита с выдерживанием заданных нагрузок в массиве до 30 сут. При этом было установлено, что в силвините необратимые деформации в случае проведения обычных испытаний начинались при давлении 13—15 МПа, а при длительном выдерживании давления — при 8—10 МПа.

Величину длительной прочности скальных массивов необходимо знать для расчетов устойчивости горных выработок, имеющих длительные сроки службы (борта глубоких карьеров, стенки подземных сооружений и т. д.). Значения длительной прочности заметно различаются для разных типов горных пород и оцениваются коэффициентом длительной прочности.

Определение прочности на разрыв по схеме испытаний Е. И. Ильницкой [19]. По этой схеме прочность пород на разрыв в массиве определяется путем выдергивания из пород анкера, упирающегося в забой скважины (рис. 92). Прочность на растяжение R_t в этом случае рассчитывается по формуле

$$R_t = \frac{P}{r_1^2 - r_2^2}, \quad (16.2)$$

где P — усилие выдергивания анкера; r_1 и r_2 — радиусы (см. рис. 92). Глубина заложения анкера в массив может достигать 0,75 м, усилие выдергивания — 1500 МПа [19].

С целью проведения прочностных испытаний в скальных массивах разработана серия нагружающих установок различной мощности и для разных условий применения, гидравлических домкратов, насосов, гидравлических аккумуляторов и измерительных приспособлений. Механическая обработка скальных массивов для проведения натуральных испытаний, подготовка соответствующих призм, целиков, щелей и ниш и специальных испытательных скважин производится с помощью серийно выпускаемых буровых установок, перфораторов, алмазных погружных и цепных пил и пр. В связи с техническими трудно-

стями и необходимостью использования довольно сложного оборудования и приборов натурные испытания в скальных массивах проводятся ограниченно и только специализированными подразделениями научно-исследовательских и проектных организаций. Этим объясняется также стремление заменить натурные испытания различными приближенными оценками прочностных свойств скальных массивов и использование косвенных методов их определения.

Прочность скальных массивов, как известно, зависит от состава слагающих горных пород, условий их залегания, трещиноватости и блочности пород, напряженного состояния и ряда других факторов.

В связи с этим прочностные характеристики скальных массивов всегда значительно ниже, чем аналогичные характеристики, определяемые в лабораторных условиях на соответствующих образцах горных пород. Отношение минимальной прочности пород в массиве к прочности образца, определенной в лабораторных условиях, принято называть коэффициентом структурного ослабления $K_{ст}$.

Анализ результатов лабораторных и натуральных определений прочностных характеристик скальных пород, проведенных за ряд лет, позволил приближенно оценить значения $K_{ст}$ с учетом прочности различных типов горных пород и характера трещиноватости массивов (табл. 31).

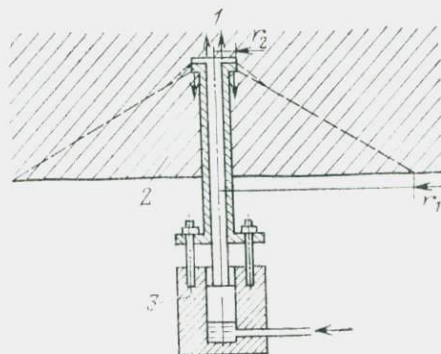


Рис. 92. Схема определения прочности массива на разрыв:

1 — забой скважины; 2 — массив; 3 — нагружающее устройство

Т а б л и ц а 31

Приближенные значения $K_{ст}$

Характеристика массива	$K_{ст}$ при прочности пород на сжатие в образце (в МПа)			
	<20	20—10	10—10	>40
Породы без четко видимой трещиноватости	0,9	0,7	0,6	0,5
Породы плотного сложения с нормальносекующей трещиноватостью	0,5	0,4	0,35	0,3
Породы плотного сложения с прерывистыми косесекущими трещинами	0,3	0,25	0,2	0,15
Породы с нарушенной структурой	0,1	0,08	0,06	0,03

Из табл. 31 следует, что $K_{ст}$ изменяется в весьма широких пределах от 0,03 до 0,9, причем эти значения, очевидно, не предельные. Недостаточно четко определяются структурно-текстурные особенности выделенных в таблице типов скальных массивов, и в частности характеристика их трещиноватости. Несмотря на это, даже такие ориентировочные оценки $K_{ст}$ дают возможность судить о прочностных свойствах скальных массивов, что в ряде случаев позволяет избежать трудоемких и длительных натурных испытаний.

Определение прочностных свойств массивов на основе опытных горных работ

Сущность этих методов, основанных на использовании обратного расчета [33], состоит в том, что с помощью горных работ исследуемый элемент массива (целик, группа целиков, кровля выработки) деформируют вплоть до разрушения. При этом фиксируют смещения, деформации и изменения напряжений, происходящие в изучаемом участке массива. Для правильного определения механических свойств пород в натуральных условиях необходимо, чтобы аналитические зависимости, используемые в расчетах, отражали действительный механизм процессов в исследуемой части массива [27, 30].

Метод раздавливания и обрушения целиков (конструктивные элементы систем разработки полезного ископаемого). Этот метод основан на предположении, что целики находятся в условиях одноосного сжатия, а вертикальные напряжения сжатия по любому горизонтальному сечению целика распределены равномерно. Вторым предположением является представление о восприятии целиком веса P всей толщи налегающих пород в пределах площади выработанного пространства, т. е.

$$P = SH\rho = S \sum^n \rho h, \quad (16.3)$$

где S — площадь выработанного пространства; H — глубина разработки от земной поверхности; ρ — плотность слоев пород над целиками; h — мощность слоев пород.

Опыт состоит в нагружении вплоть до раздавливания целика (или группы межкамерных целиков) при выемке смежных с ним целиков (рис. 93). Прочность массива определяется по формуле $R_c = P/S$.

Следует подчеркнуть, что методы определения механических свойств на основе опытных горных работ дороги, отличаются высокой трудоемкостью и сложностью организации работ. Поэтому их применяют сравнительно редко. Поскольку возможное число таких опытов крайне ограничено, особое внимание следует обращать на представительность участков опытных работ по инженерно-геологическим и горнотехническим условиям.

Методы точечного нагружения массива. Эти методы получили развитие главным образом в связи с задачами оценки свойств пород при бурении разведочных, нефтяных и газовых скважин. Они основаны, как правило, на статическом или динамическом внедрении индикатора в массив и определении усилий внедрения на заданную глубину или глубины и площади внедрения индикатора при дозированном усилии. Известны также методы и соответствующие конструкции приборов для оценки свойств пород по значению усилия в момент разрушения породы, по значению энергии при внедрении индикатора на заданную глубину или по деформации вдавливания при дозированной энергии; методы, основанные на определении показателей сверления (вращательного бурения) пород при стандартных режимах сверления. Все эти методы отличаются малой точностью, однако они позволяют непосредственно в условиях естественного залегания быстро оценить прочность горных пород. Методы точечных испытаний не позволяют учесть масштабный эффект, к тому же и точность их очень низка, поэтому их следует рассматривать только как средства приблизительной и быстрой оценки свойств пород без отбора образцов.

Необходимо отметить, что при использовании этих методов в глубоких скважинах на определяемые показатели существенно влияет уровень естественных напряжений горных пород.

Корреляционные методы

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике оценка прочностных свойств массивов производится на основании определения показателей этих свойств в отдельных характерных точках среды с последующей интерполяцией полученных данных на весь исследуемый массив с учетом его геологоструктурных особенностей и характеристик состояния. Одним из наиболее широко распространенных подходов для интерполяции результатов точечных определений являются корреляционные методы, использующие косвенные физические характеристики изучаемой среды, связанные корреляционными зависимостями с прочностными показателями. Среди них прежде всего следует отметить сейсмоакустический метод, использующий скорости распространения упругих волн, связанные с показателями прочности горных пород. Этот метод, основанный

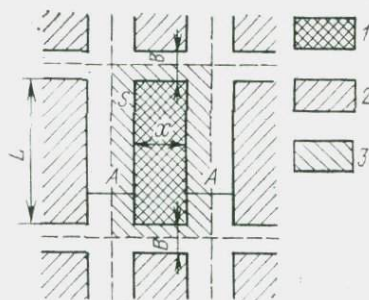


Рис. 93. Схема определения прочности на сжатие методом обрушения столбчатых целиков:

1 — целлик, нагруженный до разрушения; 2, 3 — опорные целики пород

на применении разночастотных модификаций сейсмоакустики (ультразвука, акустики и сеймики), позволяет оценивать массивы разных объемов, начиная от объемов, сопоставимых с размерами образца, до объемов области воздействия инженерного сооружения, с учетом их реального состояния (трещиноватости, неоднородности, анизотропности, обводненности, напряженного состояния и т. д.). Сущность метода состоит в следующем [42].

1. Устанавливают физически обоснованные корреляционные связи между показателями прочности и скоростями упругих волн по результатам совместных определений этих параметров в опорных точках массива для ограниченных объемов породы (обычно для образцов, реже — крупномасштабных опытов *in situ*). В настоящее время по этому вопросу имеется большое количество фактических данных, сводка которых приведена в работе [34] (рис. 94).

Л. В. Шаумян предложила обобщенный вид зависимости между показателями прочности и скоростью распространения упругих волн для различных типов пород и разных масштабов опробования (образцов и натуральных опытов), который описывается следующим уравнением (см. рис. 94, б):

$$\left(1 - \frac{R_c}{R_{c_{\max}}}\right)^2 = 1 - \left(\frac{v_p - v_{p_0}}{v_{p_{\max}} - v_{p_0}}\right)^2, \quad (16.4)$$

где R_c — определяемое значение прочности; $R_{c_{\max}}$ — максимальное значение прочности для данного типа пород; v_p — значение скорости для данного объема породы; v_{p_0} — значение скорости, при которой прочность породы равна 0; $v_{p_{\max}}$ — максимальное значение скорости для данного типа пород.

2. Оценивают масштабный фактор с помощью масштабных кривых, представляющих собой графики $v_p = f(W)$ в системе координат v_p или $v_{p_{\text{mod}}}$ и ω (где v_p и $v_{p_{\text{mod}}}$ соответственно среднее и модальное значения скорости продольных волн; W — объем исследуемых пород, приблизительно равный $0,2l\lambda^2$; l — база опробования; λ — длина волны).

Для построения масштабных кривых используют средние или модальные значения скоростей упругих волн, свойственные одному и тому же массиву пород, но при разной детальности (масштабности) исследований.

Получение информативных графиков предусматривает проведение сейсмоакустических наблюдений с использованием упругих волн различных диапазонов частот (ультразвуковых, акустических, сейсмических) и измерение скоростей на равных базах.

3. Оценивают различие в значениях скоростей упругих волн, измеренных в массиве и в образцах, отобранных из этого массива, с соблюдением равномасштабности исследований. Для этой цели применяются поправочные коэффициенты, представ-

ляющие собой отношение скоростей упругих волн, замеренных в образце и в массиве $K = v_{обр}/v_{мас}$. Поправочные коэффициенты отражают различие трещиноватости, обводненности, напряженного состояния и др.

4. Существование четких корреляционных зависимостей между показателями прочности горных пород и скоростью упругих волн, полученными как на образцах, так и при крупномас-

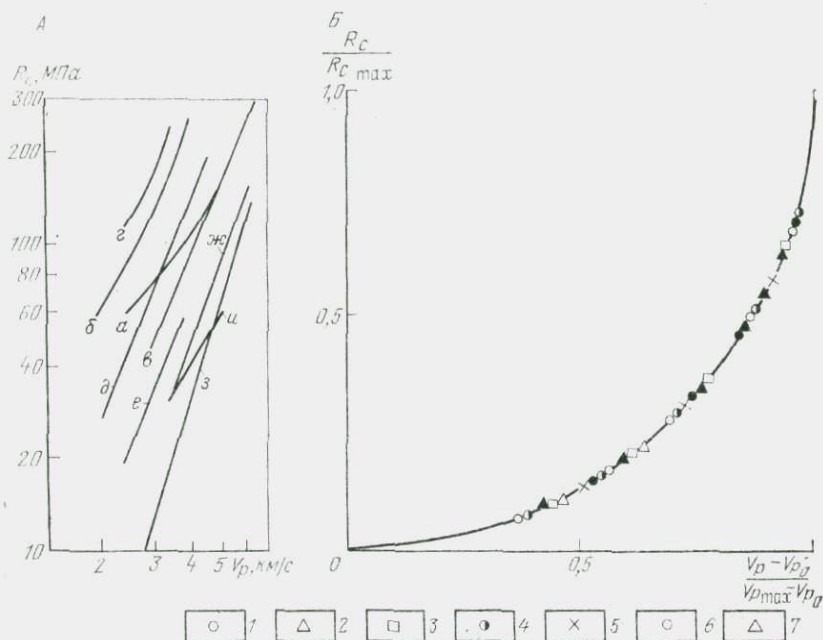


Рис. 94. Графики зависимости величины прочности на сжатие (А) и относительной прочности (Б) от скорости распространения упругих волн для пород различного состава:

α — граниты (Колмыская ГЭС); β — граниты (Саянская ГЭС); γ — базальты (Норильск); δ — кремнистые известняки (Киргизия); ϵ — глинистые сланцы (Киргизия); ζ — песчаники (Якутия); η — песчаники (Донбасс); θ — карбонатные породы; ι — известняки (Норильск); κ — песчаники; 2 — базальты; 3 — роговики; 4 — известняки; 5 — пиррогин-халькопиритовые руды; 6 — габбро-долериты; 7 — гранитогнейсы

штабных натуральных опытах, наличие масштабных кривых скорости распространения упругих волн для исследуемых массивов и поправочных коэффициентов на различие свойств в образце и массиве позволяют оценить прочностные свойства последнего в необходимом объеме. Оценка прочностных свойств проводится следующим образом: масштабные кривые, полученные для скорости распространения упругих волн, с помощью установленных корреляционных зависимостей пересчитываются в аналогичные графики для прочностных показателей. После введения поправок на трещиноватость, обводненность и напряженное состояние, т. е. на различие свойств в образце и мас-

сиве, они служат основой для оценки прочностных свойств массивов в нужном объеме.

Достоинством предлагаемой методики является достаточно простой и объективный учет реально существующих характеристик свойств и состояния массива горных пород и возможность оценки прочностных свойств массивов любых заданных объемов.

На рис. 95 приведены результаты оценки прочностных свойств массивов базальтов 1, 2, габбро-долеритов 3 и пирротин-халькопиритовых руд 4 одного из рудных узлов.

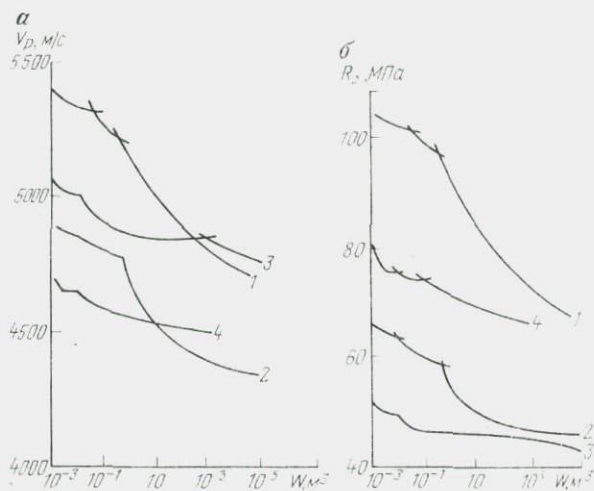


Рис. 95. Масштабные кривые скорости продольных волн (а) и прочности на сжатие (б) для различных типов массивов

16.2. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ СДВИГА

Среди полевых методов определения прочности дисперсных пород наибольшее распространение получили испытания на сдвиг. Они проводятся без нарушения естественного сложения и влажности породы и позволяют исключить влияние мелких неоднородностей грунта на результаты испытаний, что существенно повышает достоверность получаемых значений φ и c по сравнению с результатами лабораторных определений. Кроме того, полевые опыты на сдвиг можно проводить с учетом строения и состояния грунта в массиве: сдвиг по контакту двух слоев, по направлению преобладающего развития трещин, по ослабленным прослоям грунта и т. д. Все это обуславливает заметные преимущества полевых методов испытаний прочности пород на сдвиг по сравнению с лабораторными исследованиями.

В настоящее время в практике инженерно-геологических работ применяется несколько разновидностей полевых испытаний дисперсных пород на сдвиг: 1) метод плоскостного среза целиков грунта в горных выработках, 2) испытания в скважинах методом кольцевого среза, 3) испытания в скважинах методом поступательного среза. Кроме того, в некоторых случаях применяются методы обрушения целиков, выпирания призм и др., описанные выше. Однако для дисперсных пород их применение носит ограниченный характер. Поэтому ниже будут рассмотрены только первые три метода.

Метод плоскостного среза целиков грунта в горных выработках

Испытание этим методом заключается в определении сопротивления на сдвиг целика грунта цилиндрической формы, вырезанного на дне горной выработки (котлована или шурфа) и сдвигаемого по его основанию. Целик сдвигают, прикладывая постепенно возрастающую касательную нагрузку при одновременной передаче на целик нагрузки, нормальной к плоскости сдвига. Для получения значений φ и c необходимо срезать не менее трех целиков исследуемого грунта при различных нормальных нагрузках. Минимальное нормальное давление должно быть не менее природного давления на отметке заложения фундамента, а максимальное — на 0,1—0,2 МПа выше давления сооружения.

Метод плоскостного среза целиков применим для выявления прочности песчано-глинистых и в некоторых случаях крупно-обломочных грунтов. Он не может быть использован для грунтов, в которых нельзя вырезать целик ненарушенного сложения или которые выдавливаются в процессе испытания в зазор между кольцом и поверхностью выработки. Кроме того, при определении прочностных характеристик с помощью этого метода корректные значения показателей сдвига могут быть получены лишь в тех случаях, когда при движении обоймы грунт в любой точке заключенного внутри нее целика перемещается от начала и до конца опыта на одинаковые расстояния, равные перемещению самой обоймы. При достаточно больших размерах обоймы это условие выполняется для грунтов, обладающих структурной прочностью, достаточной для передачи равных сдвигающих усилий по всей площади сдвига. В противном случае вместо ожидаемого сдвига могут произойти частичное уплотнение и смятие грунта в обойме со стороны приложения нагрузки, а также образование зазора между обоймой и целиком со стороны направления сдвига.

Прочностные характеристики в зависимости от вида грунта можно определять по схеме как консолидированного, так и неконсолидированного среза (ГОСТ 23741—79). Из выработки на отметке испытания необходимо отобрать монолит грунта

для определения его физических характеристик в лабораторных условиях.

Оборудование для испытаний. В настоящее время в практике инженерно-геологических изысканий используется большое число установок для испытания грунтов на сдвиг, из которых можно выделить две, принципиально разные по способу создания вертикального давления конструкции: установки, созданные институтом фундаментпроект и Уралтиссизом.

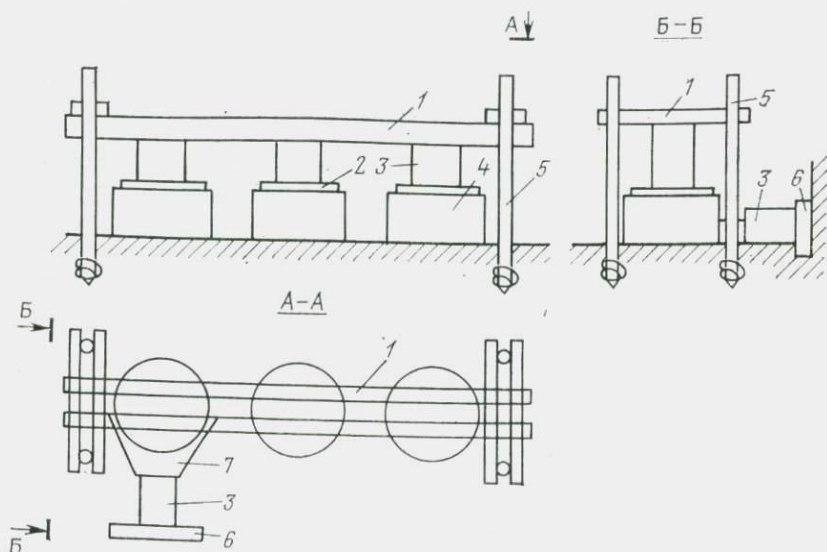


Рис. 96. Схема установки для плоскостного среза останца грунта на дне котлованов:

1 — упорные балки; 2 — штамп; 3 — гидравлический домкрат; 4 — кольцо-обойма; 5 — винтовые анкерные сваи; 6 — опорная плита; 7 — съемный упор

Первая установка (рис. 96) предназначена для проведения опытов в больших по площади выработках (карьерах, котлованах) и позволяет последовательно произвести сдвиг трех останцов (при различных нормальных нагрузках), не демонтируя установку. Прибор состоит из трех колец-обойм, гидравлического домкрата для передачи сдвигаемого усилия, опорной плиты и съемного упора. Устройство для задания нормальной нагрузки на грунт включает три штампа, загружаемых гидравлическими домкратами грузоподъемностью по $5 \cdot 10^3$ кг, упорных балок и четырех винтовых анкерных свай, закручиваемых в грунт.

Кольца-обоймы предназначены для вырезания целиков грунта и представляют собой стальные цилиндры диаметром 426 мм, высотой 200 мм с режущим нижним краем. Штамп площадью 1200 см^2 имеет круглую в плане форму и предназна-

чен для равномерного распределения вертикальной нагрузки по всей плоскости целика грунта.

Целик грунта, заключенный в кольцо-обойму, сдвигают гидравлическим домкратом, расположенным между опорной плитой и съемным упором. Для перемещения образца грунта под действием горизонтального усилия и сохранения постоянной величины усилия, действующего нормально при сдвиге, используют специальную каретку с роликами, устанавливаемую между домкратом и штампом. Для измерения давления в домкратах применяют манометры, а для измерения перемещений — прогибомеры.

Сдвиговая установка конструкции Уралтисиза (рис. 97) предназначена для проведения сдвиговых испытаний в шурфах. Упорная балка крепится с помощью двух распорных щитов с ножами, упирающихся в стенки шурфа и воспринимающих усилия при создании нормальной нагрузки на целик грунта. В отличие от предыдущей эта установка позволяет сдвигать только один целик, после чего необходимо ее демонтировать, углубить или продлить шурф и повторить опыт при другой нормальной нагрузке и т. д.

Для создания вертикального и горизонтального давлений на кольцо-обойму площадью 1200 см^2 в установке Уралтисиза используют винтовые домкраты. Величину давления измеряют динамометрами. Сдвигающее усилие передается с помощью тросика.

Проведение испытаний. Подготовку целика грунта к испытанию на срез проводят следующим образом. После подготовки останца грунта с диаметром, превышающим диаметр кольца-обоймы на 5—10 см, вырезают целик грунта, постепенно вдавливая в останец кольцо (вручную или с помощью домкрата) и подрезая грунт вокруг него. После установки кольца на тщательно выровненную поверхность целика насыпают песчаную подушку толщиной 1—2 см для глинистых и 3 см для крупнообломочных грунтов.

На эту подушку устанавливают штамп, а затем монтируют устройство для передачи нормальной и касательной нагрузок (винтовые или гидравлические домкраты, упорные балки и анкеры). После этого размещают измерительную систему, состоящую из манометров (динамометров) и прогибомеров.

Перед началом испытаний проводят детальное описание исследуемого разреза, отбирают пробы для определения естест-

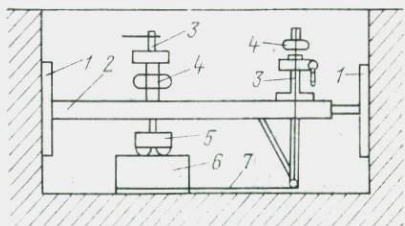


Рис. 97. Схема установки для плоскостного среза останца грунта в шурфе:

1 — распорные щиты с ножами; 2 — упорная балка; 3 — домкраты; 4 — динамометры; 5 — каретка; 6 — кольцо-обойма с грунтом; 7 — стальной трос

венной влажности ω и плотности грунта ρ и монолит для лабораторного изучения.

Испытания по методу консолидированного среза начинают с обжатия целика грунта заданной вертикальной нагрузкой. Ступени давления и время консолидации грунта под каждой ступенью давления изменяются соответственно от 0,025 до 0,1 МПа и от 5 до 30 мин в зависимости от вида грунта (ГОСТ 23741—79). Вертикальную нагрузку, доведенную до заданной величины, поддерживают постоянной до конца опыта. После предварительного уплотнения грунта нормальными давлениями целик грунта срезают при ступенчатом или плавном увеличении величины касательной нагрузки.

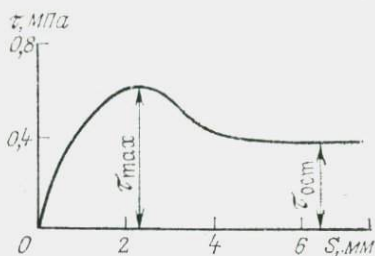


Рис. 98. График зависимости сопротивления сдвигу (τ) грунта от горизонтального перемещения (S) обоймы

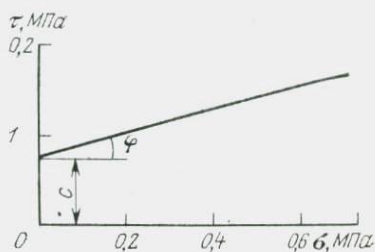


Рис. 99. График зависимости $\tau = f(\sigma)$ при сдвиговых испытаниях грунта

Считается, что сдвиг образца произошел, если приложение очередной ступени касательной нагрузки приводит к мгновенному срезу одной части грунта по отношению к другой или если по достижении максимальной касательной нагрузки происходит некоторое ее снижение. В обоих случаях испытание следует считать законченным, если общая величина деформации среза превысит 50 мм.

После испытания каждого образца поверхность сдвига тщательно осматривают, для того чтобы выявить включения, слоистость, трещиноватость и другие факторы, влияющие на величину сдвигающего усилия. Кроме того, из зоны сдвига отбирают пробы грунта для определения влажности.

При испытании по методу неконсолидированного сдвига сдвигающее давление передают сразу же за приложением вертикального давления, которую следует прикладывать ступенями 0,05; 0,1 и 0,15 МПа. В процессе испытания ведут журнал, в который записывают показания приборов, характеризующие величины усилий и деформаций.

Обработка результатов. Для каждого испытания строят график изменения сопротивления сдвигу τ в зависимости от величины деформации S (рис. 98). За величину τ принимают максимальное значение прочности τ_{max} , определенное

по графику $\tau=f(S)$. По значениям сопротивления грунта срезу τ_{\max} , определенным для различных нормальных давлений σ , строится график зависимости $\tau=f(\sigma)$ (рис. 99).

Параметры сдвига — угол внутреннего трения φ и сцепление c определяют по графику зависимости $\tau=f(\sigma)$, где c — отрезок, отсекаемый прямой $\tau=f(\sigma)$ на оси ординат, а $\operatorname{tg} \varphi$ равен тангенсу наклона прямой к оси абсцисс.

Нормативные и расчетные значения φ и c для каждого инженерно-геологического элемента определяют в соответствии с требованиями ГОСТ 20522—75.

Метод кольцевого среза в скважине

Этот метод заключается в проведении вращательного среза в стенках скважины при различных нормальных нагрузках, создаваемых путем распора стенок скважины (рис. 100). Кольцевой срез позволяет проводить испытания на сдвиг при нескольких значениях нормальной нагрузки и таким образом определять в полевых условиях прочностные характеристики грунта φ и c . Опыты проводят в скважине выше уровня грунтовых вод. Метод применим для глинистых грунтов слабой и средней степени литификации (показатель консистенции от 0 до 0,75), обогащенных органикой (в том числе заторфованных) и содержащих в небольшом количестве (не более 15% по массе) мелкий гравий и дресву.

Метод кольцевого среза намного проще и оперативнее, чем срез целиков; он позволяет вести сдвиговые испытания в интервале глубин от 0,5 до 10 м и таким образом оценивать неоднородность грунта в разрезе. Вместе с тем он обладает рядом недостатков: метод применим только для глинистых грунтов определенной консистенции, дает значения сопротивления грунтов сдвигу вкрест напластования слоев, практически неприменим для токслоистых и неоднородных толщ из-за плохой воспроизводимости результатов, не позволяет оценивать прочностные свойства грунтов ниже уровня грунтовых вод.

Оборудование для испытаний. Для проведения кольцевого среза в скважинах применяют специальные установки, включающие несколько основных узлов: 1) рабочий наконечник (зонд) прибора, состоящий из распорного цилиндрического штампа с жесткими продольными лопастями; 2) устройство для создания и измерения нормального давления; 3) приспособление для создания и измерения крутящего момента; 4) аппаратура для измерения деформации при уплотнении грунта нормальной нагрузкой и его вращательном срезе.

Для измерений применяется рабочий наконечник высотой 20—30 см с распорным штампом, изменяющим диаметр от 87 до 146 мм. Продольные лопасти наконечника изготавливаются из тонкого металла и имеют ширину до 10 мм. Для передачи давления на распорный штамп применяется специальное ус-

ройство пневматического или гидравлического типа, позволяющее создавать нормальные давления до 0,6 МПа.

Грунт срезают с помощью устройства механического или гидравлического типа, позволяющего создавать крутящий момент не менее 20 кН·см.

В качестве аппаратуры, измеряющей деформации грунта при уплотнении и срезе, могут использоваться электротензометрические системы и индикаторы угла поворота наконечника. Рабочий наконечник связан с наземными частями установки колонной металлических штанг.

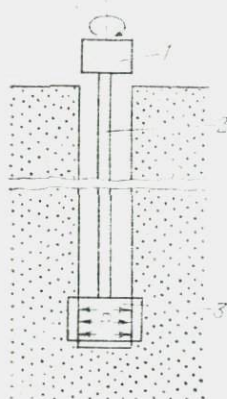


Рис. 100. Схема установки для кольцевого среза грунта в скважине: 1 — головка для создания крутящего момента, измерения нормального давления на грунт и деформации грунта при уплотнении и срезе; 2 — штанги; 3 — рабочий наконечник

Перед испытанием все узлы прибора тщательно проверяют в соответствии с инструкцией и проводят тарировку измерительной аппаратуры. Устройство для измерения крутящего момента тарируют, прикладывая к головке прибора различные крутящие моменты M (при фиксированном положении рабочего наконечника) и снимая показания N с измерительного устройства. По полученным значениям строится тарировочный график и находится постоянная характеристика измерительного устройства: $n = M/N$.

Аналогичным образом делают тарировку устройства для измерения нормального давления на грунт, по результатам которой получают зависимость показаний измерительного устройства от нормальной нагрузки.

Методика испытаний. Подготовка скважины для проведения кольцевого среза является одним из наиболее ответственных и сложных моментов проведения испытаний. Измерения проводят в скважинах диаметром 108—146 мм. В интервале опробования (1 м выше и ниже точки испытаний) скважины следует бурить с минимальным нарушением естественного сложения грунта, применяя тонкостенный стакан, который погружается в грунт методом задавливания или ударно-канатным (забивным) способом. Стакан должен иметь режущий башмак, наружный диаметр которого на 2—3 мм больше, а внутренний — на 1—2 мм меньше соответствующих диаметров основного корпуса стакана. В некоторых случаях допускается проходка исследуемого интервала грунта вращательным (колонковым) способом при небольших оборотах и давлении на забой. Скважина бурится на 0,8—1,0 м глубже точки проведения испытаний, после чего монтируют сдвиговую установку и сдвигают грунт. Затем скважину углубляют и проводят испытание на следующей глубине и т. д.

В том случае, когда исследуемый инженерно-геологический элемент или слой имеет мощность менее 1 м, для получения зависимости $\tau = f(\sigma)$ необходимо подготовить не менее трех идентичных скважин на расстоянии 1—3 м одна от другой и провести в каждой скважине сдвиг исследуемого слоя грунта при различных нормальных напряжениях. При бурении скважины с глубины, соответствующей отметке испытания, отбирают монолит грунта для лабораторного определения плотности, влажности, консистенции грунта и т. д.

Монтаж установки и проведение испытаний начинают сразу после окончания бурения скважины. Для этого в скважину на глубину отметки испытания на колонне штанг опускают рабочий наконечник прибора. Верх колонны штанг закрепляется в головке устройства для передачи крутящего момента наконечнику, а распорный штамп соединяется с устройством для передачи нормального давления на грунт. Производится монтаж измерительной аппаратуры: устройства для измерения нормального давления и крутящего момента, приборов для регистрации деформации грунта при уплотнении и сдвиге; после этого приступают к измерениям. Первоначально на распорный штамп подают ступени давлений по 0,01—0,02 МПа для того, чтобы прижать его к стенкам скважины. После этого штамп загружается нормальным давлением σ_1 и осуществляется предварительное уплотнение грунта.

Грунт в стенках скважины можно срезать по схеме консолидированного и неконсолидированного сдвига. В первом случае срез производится после предварительного уплотнения грунта под нормальной нагрузкой. Каждая ступень нагрузки при предварительном уплотнении выдерживается не менее 5 мин для песков и 30 мин для глинистых грунтов. Уплотнение под последней ступенью нагрузки выдерживается до условной стабилизации, под которой принимается приращение деформации грунта под нормальной нагрузкой σ , не превышающей 0,1 мм за 1 ч (полутвердые глины) и 2 ч (тугопластичные и мягкопластичные глины) (ГОСТ 21719—80). Сдвигающее усилие при консолидированном сдвиге передается ступенчато или путем непрерывно нарастающего давления. В первом случае деформации фиксируются до условной стабилизации при приложении первой ступени Δg_1 , после чего прилагается следующая ступень сдвигающей нагрузки Δg_2 , и так далее до полного среза грунта. Время условной стабилизации сдвиговой деформации принимается от 1 до 5 мин в зависимости от влажности и консистенции грунта. Во втором случае скорость деформации должна быть постоянной и не превышать 0,5 мм/мин.

При испытании по схеме неконсолидированного сдвига срез начинается сразу после приложения нормальной нагрузки на грунт без предварительного уплотнения. Сдвигающее напряжение передается ступенчато или в виде непрерывно возрастаю-

щей нагрузки. При этом каждая последующая ступень нагрузки прикладывается без достижения условной стабилизации деформации грунта от предыдущей ступени, а скорость сдвига при непрерывном возрастании сдвигающего усилия составляет 5—20 мм/мин.

Обработка результатов. По результатам испытаний рассчитывают максимальный крутящий момент M_{\max} , соответствующий максимальному срезающему усилию

$$M_{\max} = nN_{\max}, \quad (16.5)$$

где n — постоянная измерительного устройства вращательного момента, N_{\max} — показания измерительного устройства, соответствующие максимальному срезающему усилию.

Затем находится внешний диаметр D срезаемого грунта

$$D = D_0 + 2m, \quad (16.6)$$

где D_0 — диаметр скважины после предварительного уплотнения; m — ширина лопасти рабочего наконечника.

Сопротивление сдвигу τ для каждого нормального давления σ вычисляется по формуле

$$\tau = \frac{2M_{\max}}{\pi D^2 H}, \quad (16.7)$$

где H — высота распорного штампа.

Зная величину τ для нескольких нормальных нагрузок, строят график зависимости $\tau = f(\sigma)$ (см. рис. 99), с помощью которого определяют значения φ и c . Значение φ находят как тангенс угла наклона графика к оси абсцисс, а c — по величине отрезка, отсекаемого графиком $\tau = f(\sigma)$ на оси ординат.

Метод поступательного среза в скважине

Этот метод заключается в определении прочности пород на срез вдоль стенок скважины при различных нормальных нагрузках, создаваемых путем распора стенок скважины (рис. 101). Метод поступательного среза, так же как и описанные выше методы, позволяет получать зависимость $\tau = f(\sigma)$ и по ней находить основные параметры сопротивления грунтов сдвигу φ и c .

Метод применим для песчаных и глинистых грунтов (за исключением текучей и текучепластичной консистенции), включая глинистые грунты с примесью органического вещества, заторфованные грунты и глинистые грунты с включением мелкого гравия и дресвы в количестве не более 15 % по массе (ГОСТ 21719—80).

Он отличается рядом преимуществ по сравнению с методом среза целиков: обладает высокой производительностью и нетрудоемок, позволяет проводить испытание грунта на сдвиг по разрезу на глубинах от 0,5 до 20 м. К числу недостатков

следует отнести то, что, подобно методу вращательного среза, он дает возможность определять сопротивление грунтов сдвигу только вкрест напластования, практически неприменим при работе на тонкослонистых и неоднородных грунтах, а также ниже уровня грунтовых вод.

Оборудование для испытаний. Для осуществления поступательного среза грунта в скважинах применяется оборудование, включающее: 1) рабочий наконечник, состоящий из распорного штампа с поперечными лопастями (или зубьями); 2) штанги или трос; 3) устройство для создания и измерения нормального давления; 4) устройство для создания и измерения срезающего давления; 5) аппаратуру для измерения деформации грунта при уплотнении и сдвиге.

Рабочий наконечник прибора представляет собой распорный цилиндрический штамп высотой 24—32 см, диаметр которого может изменяться от 87 до 146 мм. На внешней поверхности штампа имеет 6—7 горизонтальных лопастей высотой 5—10 мм (см. рис. 101) или 25—30 рядов пилообразных выступов (зубьев) высотой 3—4 мм. Для измерения порового давления при консолидации грунта и в момент среза с внешней стороны штампа наклеивается пористая керамика с датчиком порового давления. При поджиме распорного штампа к стенкам скважины горизонтальные лопасти или зубья входят в грунт и при подъеме рабочего наконечника вверх по скважине производят срез цилиндрического слоя грунта толщиной, равной высоте.

Рабочий наконечник прибора соединен с наземным пультом установки колонной штанг или тросом, с помощью которых он опускается на отметку измерений, а при срезе — поднимается вверх по скважине. В наземном пульте прибора монтируется устройство гидравлического или механического типа для создания и измерения срезающего и нормального давления. Там же устанавливается аппаратура для измерения порового давления деформации сжатия и среза грунта.

Перед испытанием все измерительные приборы, предназначенные для регистрации напряжений и деформаций, тарируются. Методика тарирования аналогична тарировке измерительной аппаратуры установки кольцевого среза. В результате тарирования для каждого регистрирующего устройства находится его постоянная характеристика n .

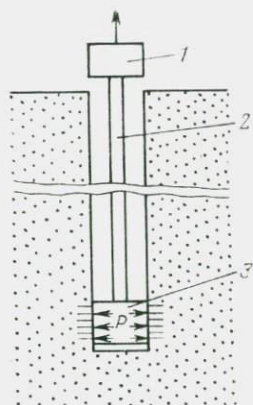


Рис. 101. Схема установки для поступательного среза грунта в скважине:

1 — головка для создания нормального давления на грунт, передачи поступательного движения рабочему наконечнику при вертикальном срезе грунта, а также измерения деформации грунта при сжатии и срезе; 2 — штанги; 3 — рабочий наконечник

Методика испытаний. Для проведения испытаний грунта методом поступательного среза необходима скважина диаметром 87—146 мм. К приходу скважины предъявляется ряд специальных требований, точно таких же, как при проведении испытания методом кольцевого среза, а именно: скважина должна быть пробурена на 1—1,2 м глубже отметки испытаний, бурение интервала скважины на 1 м выше и ниже отметки испытаний должно выполняться с минимальным нарушением строения грунта, проведение опыта должно начинаться сразу после окончания бурения.

Если необходимо опробовать несколько точек по разрезу, то испытание ведется «сверху вниз» путем последовательного проведения испытаний и бурения скважины до соответствующих отметок испытаний. Для каждого инженерно-геологического элемента следует проводить сдвиг не менее чем в трех точках при различных нормальных нагрузках. При небольшой мощности инженерно-геологического элемента бурят несколько скважин и проводят испытания на одной глубине при разных нормальных нагрузках.

В зависимости от типа грунта и задач исследований испытания проводятся по схеме неконсолидированного или консолидированного сдвига: требование к проведению сдвига являются точно такими же, как и при кольцевом срезе в скважине. Полученные результаты заносят в журнал.

Обработка результатов. По полученным результатам для каждой нормальной нагрузки рассчитывают значение сопротивления грунта вертикальному срезу τ (ГОСТ 21719—80)

$$\tau = \frac{0,95Q}{S}, \quad (16.8)$$

где Q — максимальное сопротивление грунта вертикальному срезу с учетом массы распорного штампа; S — площадь поверхности среза; 0,95 — коэффициент, учитывающий сопротивление грунта перед верхней поперечной лопастью.

По данным значений τ , найденным для различных величин нормальной нагрузки, строится график зависимости $\tau = f(\sigma)$, по которому находятся значения прочностных показателей грунта ϕ и c .

16.3. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СЛАБЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ЛОПАСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Лопастные испытания заключаются в срезе некоторого объема породы по поверхности цилиндра путем поворота пластинчатого (лопастного) наконечника, называемого крыльчаткой. Иначе их называют испытаниями пород вращательным срезом, или срезом крыльчаткой.

Крыльчатка как наконечник, воздействующий на породу, обычно содержит четыре тонкие пластины, укрепленные кресто-

образно на тонком стержне. При вращении вокруг оси стержня лопасти образуют цилиндр диаметром d и высотой h . Соотношение $d:h$ чаще выбирают равным 1:2. На глубину испытаний крыльчатку погружают поступательным движением. При этом в силу малой площади поперечного сечения лопастей и стержня

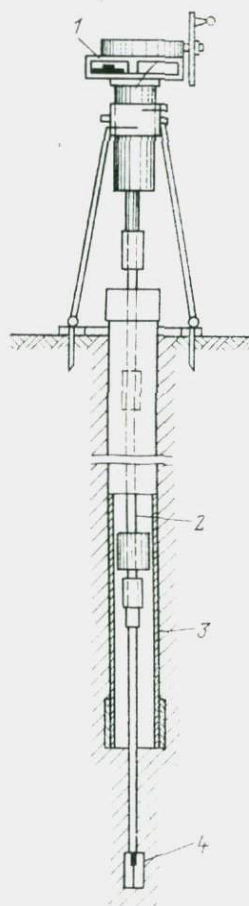
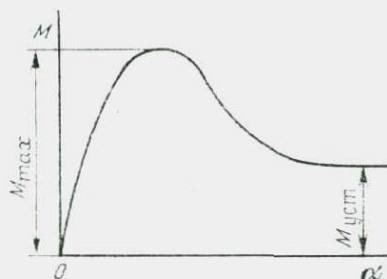


Рис. 102. Схема прибора вращательного среза:

1 — оперативный столик; 2 — штанги; 3 — обсадные трубы; 4 — рабочий наконечник (крыльчатка)

Рис. 103. График зависимости крутящего момента M крыльчатки от угла ее поворота α



по сравнению с площадью поверхностей среза природное сложение породы существенно не нарушается. Поэтому считают, что испытаниям по методу вращательного среза подвергаются породы ненарушенной структуры.

К настоящему времени наибольшее развитие получили испытания пород крыльчатками в буровых скважинах (рис. 102), при которых крыльчатку погружают в породу, а затем, вращают с помощью поворотных штанг. В стволе скважины эти штанги центрируются с помощью скользящих опор или располагаются

свободно (при малой глубине испытаний), поэтому трение штанг при вращении оказывается практически равным нулю.

В процессе поворота крыльчатки измеряют приложенный крутящий момент M и угол поворота верхнего конца штанг $\alpha_{пт}$. Затем путем исключения поправки на закручивание штанг и стержня определяют угол поворота крыльчатки α . По результатам испытаний строят график $M=f(\alpha)$ (рис. 103). Начальную линейную часть этого графика связывают с фазой уплотнения пород, наибольший крутящий момент M_{\max} — с разрушением (срезом) породы ненарушенной структуры, а наименьший после среза $M_{уст}$ — с вращением срезанного объема породы в массиве.

Область применения вращательного среза обусловлена техническими возможностями и теоретическим обоснованием метода. Обычно его используют при испытаниях текучих и мягкопластичных глин на глубинах не более 15 м.

Наибольший опыт испытания пород крыльчатками накоплен при изысканиях для строительства различных сооружений, где метод регламентирован стандартом (ГОСТ 21719—80). В соответствии с этим стандартом испытания пород этим методом должны проводиться в сочетании с другими видами исследования прочности пород [2, 26].

Теоретическое обоснование. При анализе участков графика, изображенного на рис. 103, по первому из них пытаются оценить деформационные свойства породы. Но опыт такой оценки пока мал, поэтому основное внимание уделяют двум другим участкам, связывая их с прочностными показателями пород. При этом обычно ограничиваются выбором двух характерных экспериментальных величин — максимального M_{\max} и минимального $M_{уст}$ (установившегося после среза) крутящих моментов.

Свойства пород по результатам измерения крутящих моментов оценивают на основе условий равновесия срезанного цилиндрического столбика породы. Это условие записывают с помощью двух схем. По одной из них срезаемый объем породы принимают как сплошной цилиндр, а по другой — как цилиндр, состоящий из нескольких частей, равных числу лопастей крыльчатки.

Принимая срезаемый цилиндрический столбик породы сплошным, а распределение касательных напряжений τ на его поверхностях равномерным, условие равновесия записывают в виде

$$M = B\tau, \quad (16.9)$$

где B — постоянная данной крыльчатки, равная

$$B = \frac{\pi d^2 h}{2} \left(1 + \frac{d}{3h} \right).$$

В ГОСТ 21719—80 формула (16.9) рассматривается как основная. Распространяя ее на крутящий момент M_{\max} , получают величину сопротивления породы сдвигу τ . При этом найти основные показатели прочности пород — сцепление c и угол внутреннего трения φ — невозможно, что является важнейшим недостатком метода.

В работе [22] основное внимание уделено равновесию цилиндрического столбика, состоящего из нескольких частей, на которые испытываемая порода разрезается поступательным движением крыльчатки, т. е. до проведения опыта. Смещение этих частей как твердых тел рассматривается в зависимости от сдвигающих сил, возникающих на поверхности каждой лопасти при повороте. В результате получены уравнения, которые могут быть сведены к формуле (16.9). В простейшем, практически приемлемом случае они позволяют получить

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\max}}{B} = c + \sigma_c \operatorname{tg} \varphi, \quad (16.10)$$

где σ_c — средние нормальные напряжения в поверхностях среза, равные

$$\sigma_c = n\tau_{\max} + p_v, \quad (16.11)$$

здесь p_v — природное вертикальное давление на глубине испытаний; n — коэффициент давления, равный (при числе лопастей крыльчатки $i \geq 4$)

$$n = \frac{\sin^3 \frac{2\pi}{i}}{1 - \cos^3 \frac{2\pi}{i}}. \quad (16.12)$$

Из формул (16.10)—(16.12) следует, что крутящий момент M_{\max} зависит от числа i лопастей крыльчатки, причем с увеличением i величина M_{\max} уменьшается. Отсюда вытекает одна из возможностей определения параметров c и φ , основанная на проведении парных испытаний, т. е. испытаний на одной глубине двумя крыльчатками с разным числом лопастей, например при $i_1 = 4$ и $i_2 = 6$. Но в силу изменчивости свойств пород, а также упрощений, принятых при записи уравнения (16.10), такой подход к оценке параметров сдвига требует значительного увеличения числа опытов. Поэтому более предпочтительно допущение, по которому принимается, что вращение срезанного столбика породы в массиве протекает в условиях $c = 0$. Тогда в дополнение к выражению (16.10) можно записать

$$\tau_{\text{уст}} = \frac{M_{\text{уст}}}{B} = \sigma_\varphi \operatorname{tg} \varphi, \quad (16.13)$$

где $\sigma_\varphi = n\tau_{\text{уст}} + p_v$.

Отсюда для четырехлопастной крыльчатки, когда $n=1$, следует, что

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{1 + (\rho_B / \tau_{уст})}. \quad (16.14)$$

Испытания разных пород, проведенные четырехлопастными крыльчатками, показывают, что при глубинах более 3 м параметры сдвига, получаемые по формулам (16.10) и (16.14), близки к получаемым с помощью сдвиговых приборов по методике быстрого сдвига неконсолидированных пород. Поэтому можно ожидать, что по мере накопления опыта формулы вида (16.10) и (16.14) окажутся приемлемыми для формулирования окончательных рекомендаций.

По способу погружения рабочего наконечника в породу приборы вращательного среза разделяются на две группы. Первая группа приборов рассчитана на погружение крыльчатки с забоя буровой скважины (см. рис. 102), вторая — путем задавливания ее в массив без бурения скважин. Среди приборов, предназначенных для проведения испытаний с забоя буровой скважины, наиболее широкое распространение получили приборы, разработанные ЦНИИС Минтрансстроя и Фундаментпроектом. Основные технические данные этих приборов приведены в табл. 32.

Прибор УИГС ЦНИИС-2 рассчитан на визуальную регистрацию крутящих моментов и углов поворота крыльчатки. Головка прибора со штангами и крыльчаткой подвешена на специальном штативе. Реактивные усилия воспринимаются оттяжками из тонкого троса, концы которого крепятся в земле с по-

мощью костылей. Чувствительным элементом прибора являются сменные цилиндрические пружины растяжения. Поворотные штанги оснащены центрирующими кольцами.

Среди приборов, предназначенных для испытания пород без бурения скважин, довольно широко применяется прибор, созданный в Калининском политехническом институте. Поворотные штанги этого прибора снабжены устройством для отключения крыльчатки, что позволяет измерять крутящий момент, затрачиваемый на трение штанг о породу. Прибор выпускается в комплекте с установкой для задавливания и пенетрометром, дающим возможность проводить статическое зондирование.

Среди установок вращательного среза (см. табл. 32) преобладают приборы с визуальной регистрацией крутящего момента и угла поворота штанг, хотя имеются отдельные разработки, предусматривающие автоматическую запись результатов. Так, например, прибор конструкции ВСЕГИНГЕО снабжен самописцем, производящим запись графиков испытаний. Прибор имеет дисковый вращатель штанг, ручную лебедку, пружинный динамометр, верньерный механизм и барабан записи. При испытании барабан с миллиметровкой вращается синхронно с верхним концом штанг, а перо самописца совершает вдоль барабана возвратно-поступательное движение. Величина отклонения пера от начального положения пропорциональна крутящему моменту штанг.

В последние годы в практику изысканий входят комбинированные установки, которые наряду с вращательным срезом позволяют производить зондирование пород конусом, прессио-

Технические характеристики приборов

Приборы	Технические дан			
	Глубина испытаний, м	Максимальный вращающий момент, Н·м	Размеры крыльчаток, мм	Скорость вращения крыльчаток, с ⁻¹
УИГС ЦНИИС-2	25	2,4	100×200; 75×200; 75×150; 65×130; 55×110	0,1—0,2
СП-52	15	1,8	20×200; 80×160; 60×120	0,1—0,2
ЛГС-2	15	1,5	75×150; 75×100	—
СК-8	10	1,5	75×100; 54×100	—
ВСЕГИНГЕО	15	2,5	100×200; 75×150; 60×130; 55×110; 75×75	0,2—5,0

вращательного среза

ные приборов				
Диаметр штанг, мм	Регистрация измеряемых величин	Способ вращения штанг	Габариты установки, см	Масса измерительной головки, кг
33,5	Визуальная	Через понижающий редуктор	100×60	—
24	»	То же	51×98,5	22,8
22; 28; 34	»	»	30×150	278
22	»	С помощью поворотных рычагов	—	3,7
33,5 42	Самописцем	—	100×80	40,7

Таблица 32

метрию, испытания статическими нагрузками. Такова, например, полевая лаборатория ЛСГ-2 конструкции ПНИИС и Калининского политехнического института. Весьма перспективны испытания пород методом вращательного среза в сочетании со статическим или динамическим зондированием, так как в этом случае исключается такая трудоемкая операция, как бурение скважин.

Подготовка и проведение испытаний. Приборы вращательного среза имеют устройства, предназначенные для измерения крутящего момента и угла поворота верхнего конца штанг. Эти устройства содержат стрелочные индикаторы, показания которых записывают в полевой журнал. Для дальнейшей интерпретации результатов испытаний необходимо перейти от показаний индикаторов к величинам крутящих моментов и углу поворота верхнего конца штанг, соединенных с крыльчаткой, что достигается градуировкой измерительных устройств.

Градуировку приборов по углам поворота обычно выполняют в заводских условиях, поскольку показания индикатора углов поворота определяются кинематической схемой измерительного устройства, которая остается неизменной в течение всего периода эксплуатации прибора. Наиболее важной частью градуировочных испытаний, выполняемых в производственных условиях, является градуировка устройств, предназначенных для измерения крутящих моментов. Поскольку чувствительным элементом этих устройств являются пружины, основу градуировки составляет испытание их жесткости, т. е. выявление зависимости деформаций пружин от приложенной нагрузки.

На рис. 104 показана схема наиболее универсального устройства, с помощью которого можно выполнить градуировку индикатора крутящих моментов. Оно включает поворотный диск и нагрузочное приспособление, состоящее из дисковой гирь известной массы, подвесной тарелки, тросика и отклоняющего ролика. Диск и отклоняющий ролик закрепляются на станине посредством радиальных шариковых подшипников. На время градуировки вращатель прибора соосно соединяют с поворотным диском, а крутящие моменты создают путем подвешивания гирь. При градуировке прибора тарелку для гирь устанавливают на землю и вращением приводной ручки прибора выбирают натяжение тросика. После этого на тарелку укладывают гири определенной массы и вращают приводную ручку прибора. В результате вращатель и диск устройства поворачиваются, поднимая тарелку с гирями. При этом на вращателе создается крутящий момент $M=0,5DQ$ (D — диаметр диска; Q — масса гирь с тарелкой) и стрелка индикатора крутящих моментов отклоняется от начального положения. Число подъемов гирь разной массы выбирают равным 10—15. Градуировку повторяют не менее трех раз и получают набор крутящих моментов и соответствующих им отсчетов по индикатору. С помощью этих данных строят график $M=M(n_{cp})$, где n_{cp} —

средние показания индикатора. Поверки срезной установки необходимо выполнять при получении ее с завода и перед выездом на полевые работы.

Испытания пород вращательным срезом могут проводиться как в буровых скважинах, так и путем погружения крыльчатки непосредственно в массив.

Скважины обычно бурят всухую вращательным, задавливающим или ударным способом. Наиболее предпочтительно вращательное бурение буровыми ложками и спиральными бурами. При бурении с креплением стенок скважины колонну обсадных труб составляют таким образом, чтобы высота оголовка позволяла установить над устьем скважины оперативный столик прибора вращательного среза.

При проведении испытаний в скважинах необходимо следить за тем, чтобы при бурении не произошло искривления ствола скважины и максимально сохранять природное сложение грунта на глубине, намеченной для проведения опыта. Эти требования легко выполняются при бурении глинистых пород, не требующих крепления стенок скважин. Наиболее сложно эти условия выполнить при опробовании песчаных пород, образующих при бурении пробки. В этом случае предпочтительнее испытания без бурения скважин.

Испытания пород ниже забоя скважин проводят в следующем порядке. Приняв в расчет глубину спуска рабочего наконечника и высоту оперативного столика, подбирают поворотные штанги и соединяют их с крыльчаткой. При каждом спуске наконечника проверяют центрирующие кольца штанг, обеспечивая их свободное вращение в опорах. Если глубина испытания незначительна, то штанги могут опускаться без центрирующих колец. Крыльчатку выбирают с учетом прочности породы: при испытании слабых пород выбирают крыльчатки больших размеров, а при испытании прочных пород — малых размеров.

После сборки штанговую колонну опускают в скважину и погружают крыльчатку на заданную глубину. В слабых породах погружение происходит под действием веса штанги, а в более прочных породах крыльчатку задавливают вагой или подвижным вращателем бурового станка. Крыльчатку можно забивать только при испытании весьма прочных пород и при высокой жесткости штанговой колонны. Глубину погружения крыльчатки ниже забоя выбирают в зависимости от прочности испытываемого грунта: в прочных породах глубина погружения

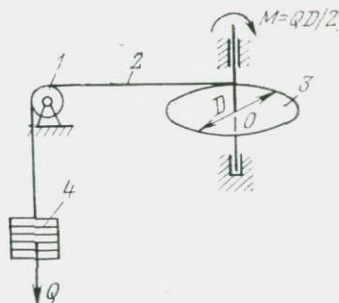


Рис. 104. Схема градуировочного устройства:

1 — отклоняющий ролик; 2 — тросик; 3 — поворотный диск; 4 — гири

составляет 0,1—0,3 м, в слабых — 0,3—0,5 м (ГОСТ 21719—80).

При установке над устьем скважины оперативного столика обеспечивают его жесткую анкеровку и подбирают пружины той или иной жесткости в зависимости от прочности исследуемых пород: чем прочнее последние, тем жестче должны быть пружины.

Заключив подготовку прибора, приступают к проведению испытаний, которые начинают с фиксации начального положения стрелки индикаторов крутящих моментов и углов поворота. Вращая приводную ручку оперативного столика, вызывают поворот штанг и крыльчатки. Вращение крыльчатки в начале опыта выполняют со скоростью (0,2—0,3) с⁻¹, при повороте крыльчатки на угол, равный 90°, скорость ее вращения повышают до (2—3) с⁻¹. В начале опыта, когда крутящий момент возрастает, угол поворота крыльчатки фиксируют через каждый 1—2°, а после среза — через 2—3°. Состояние среза устанавливают по началу падения крутящего момента. Вращение крыльчатки прекращают при полной стабилизации крутящих моментов после двух-трех полных оборотов ее в массиве.

Испытания пород вращательным срезом без бурения скважин выполняют с помощью погружного зонда, состоящего из незащищенных поворотных штанг и крыльчатки. При этом виде испытаний возникают большие искажения, вызываемые трением штанг о породы, поэтому для выделения полезной информации проводят дополнительные опыты по определению трения штанг и стержня крыльчатки. Существует две схемы такого определения. По первой схеме момент сил трения устанавливают путем вращения штанг после отключения их от крыльчатки, по второй — двойными испытаниями грунта на одной глубине — с крыльчаткой и без нее. В результате получают два графика изменения крутящих моментов зонда в зависимости от угла поворота при одинаковой скорости вращения. Один из них характеризует изменение сил трения штанг и стержня крыльчатки о породу, другой — изменение общего крутящего момента. Совмещение графиков позволяет установить изменение крутящего момента крыльчатки в зависимости от угла ее поворота.

При испытаниях пород в скважинах можно не учитывать трение штанг и крутящий момент за счет их трения M_0 принимать равным нулю.

Обработка результатов испытаний. В процессе основного полевого опыта измеряют крутящие моменты $M_{шт}$ и углы поворота верхнего конца штанг $\alpha_{шт}$. По этим данным строят несправленный график $M_{шт} = M_{шт}(\alpha_{шт})$, который по виду не отличается от изображенного на рис. 103. Дальнейшая обработка результатов зависит от цели испытаний.

Если намечается выделить только крутящие моменты M_{max} и $M_{уст}$, то ограничиваются выявлением поправок на трение

штанг $M_{0_{\max}}$ и $M_{0_{\text{уст}}}$. Тогда $M_{\max} = M_{\text{шт}_{\max}} - M_{0_{\max}}$ и $M_{\text{уст}} = M_{\text{шт}_{\text{уст}}} - M_{0_{\text{уст}}}$.

Для выявления поправок M_0 характерны три случая проведения испытаний: 1) в буровой скважине $M_0=0$; 2) без бурения скважины с последующим отключением крыльчатки $M_0=\text{const}$; 3) без бурения скважины с дополнительными наблюдениями за поворотом штанг без крыльчатки получают $M_0=M_0(\alpha_{\text{шт}})$, откуда как поправочные выбирают $M_{0_{\max}}$ и $M_{0_{\text{уст}}}$.

Если необходимо полное исследование процесса деформирования породы при повороте крыльчатки, то наряду с поправками M_0 исключают поправки $\Delta\alpha$ к углам поворота $\alpha_{\text{шт}}$. Эти поправки могут быть найдены с помощью формулы:

$$\Delta\alpha = \frac{M}{G} \left(\frac{l_1}{I_1} + \frac{l_2}{I_2} \right), \quad (16.15)$$

где G — модуль упругости стали при сдвиге; l_1 и l_2 — длина соответственно штанг и стержня крыльчатки; I_1 и I_2 — полярные моменты инерции поперечного сечения соответственно штанг и стержня крыльчатки.

После получения значений $\Delta\alpha$ находят $\alpha = \alpha_{\text{шт}} - \Delta\alpha$. В результате по исправленным значениям M и α строят график $M = M(\alpha)$, показанный на рис. 103.

Крутящие моменты M_{\max} и $M_{\text{уст}}$, выделенные в процессе предварительной обработки полевых результатов, используют для оценки прочностных свойств испытуемой породы. В соответствии с ГОСТ 21719—80 вычисляют сопротивление сдвигу породы естественного τ_{\max} и нарушенного $\tau_{\text{уст}}$ сложения

$$\tau_{\max} = M_{\max}/B; \quad \tau_{\text{уст}} = M_{\text{уст}}/B, \quad (16.16)$$

где B — постоянная крыльчатки.

Для текучих и мягкопластичных глин величину τ_{\max} иногда рекомендуют принимать равной удельному сцеплению c в предположении, что для них приемлемо условие $\varphi=0$.

Кроме значений τ_{\max} и $\tau_{\text{уст}}$ по ГОСТ 21719—80 определяют показатель структурной прочности, равный

$$P_c = \tau_{\max}/\tau_{\text{уст}}. \quad (16.17)$$

В зависимости от значений показателя P_c различают низкую, среднюю и высокую прочность структурных связей.

Показатель структурной прочности	Прочность структурных связей
$P_c = 1$	Отсутствует
$1 < P_c \leq 2$	Низкая
$2 < P_c \leq 5$	Средняя
$P_c > 5$	Высокая

Для расчета параметров сдвига пород c и φ по формулам (16.10)—(16.14) выполняют следующие операции: 1) определяют природное вертикальное давление p_v на глубине испыта-

ний H по формуле $p_n = \gamma H$ (где γ — объемная масса вышележащих пород); 2) по формуле (16.14) рассчитывают угол внутреннего трения φ ; 3) из выражения (16.11) находят средние нормальные напряжения в поверхностях среза; 4) с помощью формулы (16.10) определяют удельное сцепление c .

В случае применения формул (16.10)—(16.14) наибольшие погрешности могут иметь место при оценке угла внутреннего трения. Поэтому целесообразно контролировать его путем параллельных испытаний пород другими традиционными методами.

16.4. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОРОД МЕТОДОМ ОБРАТНЫХ РАСЧЕТОВ

Для изучения прочности неоднородных пород (зоны выветривания, делювиальных отложений и др.), когда прямые методы определений неприменимы (например, из-за невозможности отбора монолитов), может быть использован метод обратных расчетов. С его помощью определяют усредненное значение сопротивления сдвигу по поверхности скольжения, учитывая состояние пород в зоне разрушения. Применение этого метода возможно при условии возникновения в породах оползневых смещений.

Метод основан на предположении, что в момент начала движения оползневого тела сдвигающее усилие, обусловленное его весом, равно среднему значению минимального сопротивления пород сдвигу вдоль поверхности смещения. В основе расчетной схемы лежит математическая модель, описывающая равновесие твердого тела, опирающегося на одну или несколько наклонных плоскостей. Для решения задачи необходимы данные о параметрах и характере поверхностей смещения, их положении в пространстве, размерах и объемной массе смещающих пород. Обратные расчеты удается выполнить для оползней, которые произошли недавно, при условии, что существуют фототеодолитные и аэрофотоснимки склонов до и после оползневых смещений.

Формирование оползней на склонах, сложенных выветрелыми породами и рыхлыми отложениями различного генезиса, происходит по поверхностям ослабления, обусловленным геологическим строением массива: границами раздела пород различного состава или состояния, литогенетическими и тектоническими трещинами и т. д. Поверхности ослабления разделяются на поверхности скольжения, отрыва и отрыва с частичным трением. По поверхностям скольжения происходит смещение оползня. По поверхности отрыва в начале смещения оползневое тело полностью отчленено от массива или происходит разрыв еще сохранившихся связей. К поверхностям отрыва с частичным трением относятся субвертикальные поверхности с простираньем, совпадающим с направлением движения

оползня, способные при движении оползня препятствовать его смещению вниз по склону. При расчетах величина сопротивления сдвигу определяется только для поверхности скольжения; влияние, которое оказывают на скользящий блок поверхности отрыва и трения, обычно не учитываются, так как установить его можно только в отдельных случаях.

В зависимости от соотношения и вида поверхностей ослабления, отчленяющих тело оползня, различают три главные группы оползневых ниш. Ниши первой группы отличаются одной явно выраженной поверхностью скольжения; остальные являются поверхностями отрыва без трения и с трением. Вторая группа ниш характеризуется наличием двух поверхностей скольжения, падающих навстречу друг другу и вниз по склону, когда смещение оползневой массы происходит в направлении, совпадающем с их линией пересечения. К третьей группе относятся ниши отрыва с двумя и более поверхностями скольжения, среди которых всегда есть одна, наклон которой совпадает с направлением смещения оползня, а другие могут быть различно ориентированы. На рис. 105 приведены наиболее типичные сочетания поверхностей скольжения, отрыва и отрыва с частичным трением для случаев, когда общее число поверхностей ослабления не превышает четырех. Их может быть и больше, но увеличение их числа не ведет к новым типам соотношений и не влияет на принципиальные схемы расчета. Каждому типу оползневых ниш соответствуют расчетная схема и уравнение равновесия. При составлении расчетных схем принималось, что поверхности отрыва и трения не создают сопротивления оползающему блоку пород.

Проведение обратных расчетов возможно, если смещение оползня по поверхностям ослабления произошло одновременно, они сохранились и могут быть определены их размеры и пространственное положение, а также имеются данные для восстановления профиля склона до оползания, необходимого для определения объема оползня. Оползень мог смещаться как в виде монолитного блока, так и в состоянии значительной раздробленности. В том случае, когда смещение происходит по одной поверхности скольжения, оползающее тело целиком опирается на нее. Если смещение происходит по нескольким поверхностям, то вес оползня распределяется по всем поверхностям пропорционально их площадям с учетом наклона.

При инженерно-геологической съемке устанавливаются характер и роль поверхностей ослабления в формировании оползня, определяется приуроченность их к границам раздела или трещинам разного происхождения, изучаются вид и степень шероховатости поверхностей отчленения и смещения, а также состав, свойства и обводненность пород вдоль такой поверхности. По отдешифрированным фототеодолитным снимкам измеряются площади поверхностей скольжения и отрыва, их элементы залегания, восстанавливается профиль склона до

оползания и определяется объем оползневого тела и его частей.

Для восстановления профилей склона до оползания используются аэро- и фототеодолитные снимки разных лет, составляются планы оползневой ниши в масштабе 1:100—1:500 с сечением горизонталей 1—5 м как на горизонтальную, так и на вертикальную плоскость, а затем они сопоставляются с соседними участками, не затронутыми оползнями. Объем оползня на восстановленном склоне определяется методом сечений.

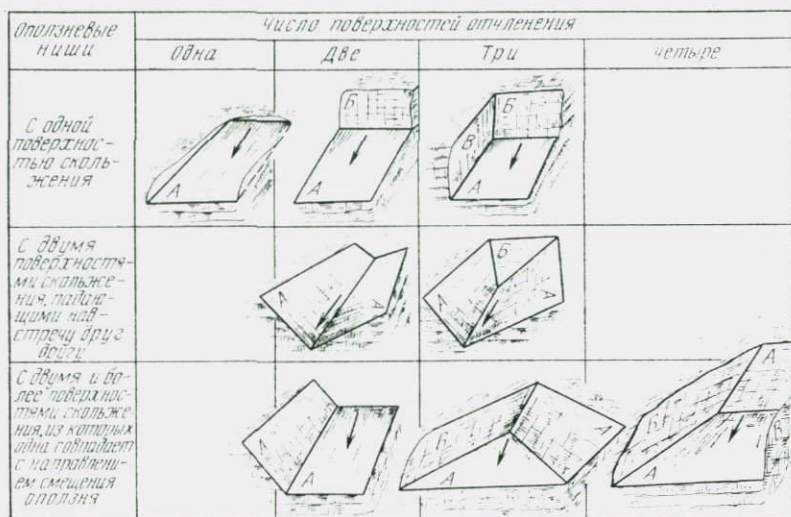


Рис. 105. Схемы возможных типов оползневых ниш на склонах, образованных плоскостями скольжения А, отрыва В и трения В

Элементы залегания и площади поверхностей скольжения, трения и отрыва определяются на стереоавтографе. Объемная масса пород оползневого тела в момент смещения может быть принята равной объемной массе аналогичных несмещенных пород, слагающих оползневой склон.

Расчет среднего сопротивления сдвигу для оползневых ниш с одной поверхностью скольжения. Формирование оползней с одной поверхностью скольжения чаще всего происходит на склонах с выветрелыми породами, или перекрытых чехлом делювиальных отложений, или сложенных моноклинально залегающими породами с хорошо выраженными трещинами напластования. В этом случае поверхность скольжения образуется по границе пород с различными свойствами или по напластованию, а отчленение сползающих блоков происходит по трещинам отдельности или по субвертикальным тектоническим трещинам. В некоторых слу-

чаях плоскость скольжения может быть обусловлена наклонной тектонической трещиной, падающей по склону. Оползни с одной поверхностью скольжения обычно имеют малые и средние размеры. В результате применения обратных расчетов для оползней этого типа определяется среднее сопротивление сдвигу вдоль поверхности скольжения по направлению ее падения (рис. 106, а) и нормальное напряжение, которое действовало на этой поверхности в момент смещения оползня, по формуле

$$\sigma = \frac{\rho g V}{S} \cos \alpha. \quad (16.18)$$

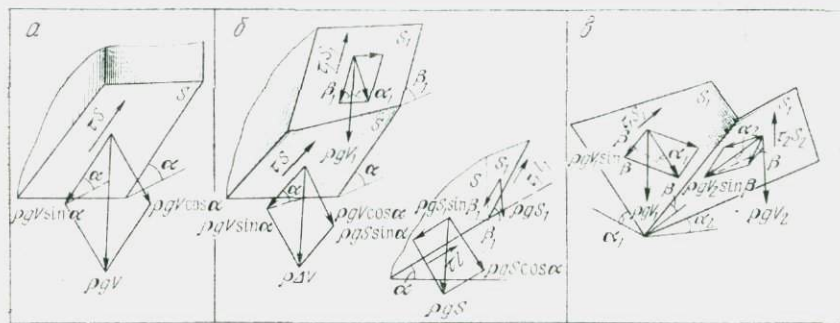


Рис. 106. Расчетные схемы и уравнения равновесия для основных типов оползневых ниш, сформированных на склонах:

V_i — объемы всего оползневого тела или его частей, опирающихся на соответствующие поверхности скольжения; S, S_i — площади поверхностей скольжения; α, α_i — углы падения основных поверхностей скольжения; β_i — углы наклона поверхностей скольжения в плоскости, совпадающей с направлением движения оползня; β — угол наклона линии пересечения поверхностей скольжения; ρ — плотность пород; τ, τ_i — среднее сопротивление сдвигу вдоль поверхностей скольжения; g — ускорение свободного падения.

$$\begin{aligned}
 \text{а} - \Delta V \sin \alpha &= SF; & \text{б} - \Delta V \sin \alpha - SF + \sum_{i=1}^n (\Delta V_i \sin \beta_i - S_i F_i) \cos (\beta_i - \alpha) &= 0; \\
 \text{в} - \Delta V \sin \beta &= S_1 F_1 + S_2 F_2
 \end{aligned}$$

При определении обратными расчетами угла внутреннего трения φ и величины сцепления пород c на практике обычно рассматривается несколько аналогичных по строению и условиям образования оползней, отличающихся размерами, для которых составляются уравнения равновесия с двумя неизвестными φ и c . Установить таким способом искомые величины практически невозможно, так как при составлении уравнений даже для геологически подобных оползней получается неопределимая система линейных уравнений.

Однако φ и c можно определить, если есть данные расчетов среднего сопротивления сдвигу, но при разных нормальных напряжениях для однотипных поверхностей скольжения по нескольким геологически подобным оползням. В этом случае, построив график зависимости показателей сопротивления сдвигу

от нормального напряжения, можно установить угол внутреннего трения и величину сцепления.

Методом обратных расчетов можно рассчитать сопротивление смещению оползня поверхностей отрыва с частичным трением, если имеются два аналогичных оползневых участка, на одном из которых смещение оползня произошло только по одной поверхности скольжения, а на втором в создании сопротивления участвовала также и поверхность отрыва с частичным трением. Если на одном из оползневых участков произошло смещение по одной поверхности скольжения с углом падения α_1 и площадью S_1 , а на другом движение произошло по аналогичной в геологическом отношении поверхности скольжения с углом падения α_2 и площадью S_2 , но одновременно оползневому смещению препятствовала вертикальная боковая поверхность площадью S_3 , уравнения равновесия примут следующий вид:

для первого участка

$$\rho g V_1 \sin \alpha_1 = \tau S_1,$$

для второго участка

$$\rho g V_2 \sin \alpha_2 = \tau S_2 + \tau^1 S_3, \quad (16.19)$$

где V_1 и V_2 — объемы оползневых блоков соответственно на первом и втором участке; τ — среднее сопротивление сдвигу вдоль однотипных поверхностей скольжения; τ^1 — среднее сопротивление, которое оказывала смещению вертикальная боковая поверхность.

В результате решения уравнений определяется среднее сопротивление сдвигу как вдоль поверхности скольжения, так и по боковой поверхности отрыва с частичным трением.

Расчет среднего сопротивления сдвигу для оползневых ниш с двумя поверхностями скольжения, наклонными друг к другу (см. рис. 106, в). Оползневая ниша образуется двумя поверхностями скольжения, обусловленными границами пород с различными свойствами, их напластованием или наклонными трещинами (тектоническими или отдельности), которые наклонены друг к другу и к основанию склона. Смещение оползневого блока происходит в направлении, совпадающем с линией пересечения поверхностей скольжения (см. рис. 105). Кроме двух поверхностей скольжения могут присутствовать поверхности отрыва, образованные вертикальными трещинами различного происхождения. Уравнение равновесия для этого случая приводится на рис. 106, а нормальное напряжение на каждой поверхности может быть приближенно оценено по формуле (16.18).

Для определения величин среднего сопротивления сдвигу вдоль поверхностей смещения в случае ниш отрыва с двумя поверхностями скольжения, падающими навстречу друг другу,

необходимо иметь данные о двух оползневых участках. На основании сведений, полученных при инженерно-геологическом изучении этих обвально-оползневых участков, составляются два уравнения равновесия с двумя неизвестными величинами среднего сопротивления сдвигу τ_1 и τ_2 для поверхностей скольжения, в результате решения которых определяются искомые величины.

Расчет среднего сопротивления сдвигу для оползневых ниш с двумя и более поверхностями скольжения, из которых одна основная. К оползневым нишам третьего типа относятся ниши с двумя и больше поверхностями скольжения, когда среди последних обязательно есть одна основная поверхность, падение которой совпадает с направлением движения оползня. Часто основная поверхность скольжения совпадает с границей раздела пород, отличающихся свойствами или с напластованием пород. Остальные поверхности скольжения, как правило, образованы наклонными тектоническими трещинами, падение которых может совпадать или не совпадать с направлением смещения оползневого блока. Могут присутствовать поверхности отрыва, обусловленные вертикальными трещинами, тектоническими отдельностями и т. д.

Уравнение равновесия для этого случая приведено на рис. 106, б. Нормальное напряжение оценивается приближенно. Если оползень смещается в виде единого блока, то нормальное напряжение, действующее на основной поверхности скольжения, вычисляется по формуле (16.18). Если при смещении произошло раздробление оползневого тела, то нормальное напряжение приближенно определяется по той же формуле, но дифференцированно для каждой поверхности скольжения.

Для определения среднего сопротивления сдвигу в случае, когда смещение оползня происходит по нескольким поверхностям скольжения, необходимо располагать данными по нескольким сходным по геологическому строению оползневым участкам, причем число оползневых участков должно быть не меньше, чем число поверхностей скольжения. В результате составления уравнений равновесия для всех оползней получается система линейных уравнений со столько же неизвестными, сколько одноименных плоскостей скольжения имеется на каждом участке. Решение этой системы линейных уравнений позволит определить среднее сопротивление сдвигу вдоль поверхностей скольжения по направлению смещения оползней.

Если оползневой блок двигался по одной или нескольким, следующим одна за другой по направлению смещения поверхностям, имеющим примерно одинаковое падение, но различные углы наклона, то объемная задача по определению среднего сопротивления сдвигу может быть сведена к плоской. При этом в уравнениях равновесия площадь каждой плоскости скольжения следует заменить ее длиной, а объем оползневого

тела — его площадь в плоскости рассматриваемого расчетного сечения. При решении задачи в плоскости могут быть определены среднее сопротивление сдвигу, нормальные напряжения, действующие на поверхностях смещения, а в отдельных случаях и прочностные показатели пород вдоль этих поверхностей. Например, когда оползневое тело сместилось по двум наклонным (под разными углами) поверхностям (см. рис. 106), уравнение равновесия примет следующий вид (при проекции на ось, совпадающую с одной из наклонных поверхностей):

$$\tau l + \tau_1 l_1 \cos(\beta_1 - \alpha) = \rho g S \sin \alpha + \rho g S_1 \sin \beta_1 \cos(\beta_1 - \alpha), \quad (16.20)$$

где τ и τ_1 — средние сопротивления сдвигу вдоль поверхностей смещения; l и l_1 — длина поверхностей смещения; α и β_1 — углы наклона поверхностей смещения в рассматриваемом сечении; S и S_1 — площади блоков оползневого тела, опирающихся на соответствующие поверхности смещения; ρ — плотность оползневых накоплений. Если в уравнении величины сопротивления сдвигу вдоль поверхностей смещения заменить значениями трения и сцепления пород из зоны скольжения, то получается

$$\begin{aligned} & \rho g S \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + cl + (\rho g S_1 \cos \beta_1 \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1 l_1) \times \\ & \times \cos(\beta_1 - \alpha) = \rho g S \sin \alpha + \rho g S_1 \sin \beta_1 \cos(\beta_1 - \alpha), \end{aligned} \quad (16.21)$$

где φ и φ_1 — углы внутреннего трения; c и c_1 — сцепление пород в зоне смещения. По одному объекту может быть составлено одно уравнение равновесия, которое при делении оползневого тела на два блока будет иметь одно неизвестное, если среднее сопротивление сдвигу по разным поверхностям смещения одинаково ($\tau = \tau_1$), два неизвестных при неравенстве средних значений сопротивления сдвигу ($\tau \neq \tau_1$) и четыре неизвестных, если требуется определить угол внутреннего трения и сцепление пород вдоль поверхностей смещения ($c, \varphi, c_1, \varphi_1$). Если считать, что углы внутреннего трения и сцепления для разных плоскостей смещения одинаковы, то число неизвестных сократится до двух (c, φ).

Таким образом, решение задачи по определению среднего сопротивления сдвигу крупнообломочных глинистых образований и трещиноватых выветрелых пород заключается в следующем.

1. Подбираются объекты, на которых произошли оползни в породах, прочностные свойства которых необходимо установить. Они должны иметь сходное геологическое строение, а оползни — одинаковый механизм образования. Число объектов должно быть не меньше искомым неизвестных.

2. На основе детального инженерно-геологического картирования, осуществляемого с использованием аэро- и фототеоодолитных снимков, устанавливается положение поверхностей отрыва и скольжения оползня и восстанавливается профиль

склона до оползня. Определяются площади (или длина в случае плоской задачи) и характер поверхности скольжения, их обводненность и углы наклона, объемы (или площади в случае плоской задачи) оползневого тела и его частей, опирающихся на каждую из плоскостей скольжения.

3. Опытным путем устанавливается объемная масса пород, вовлеченных в оползневое смещение.

4. По каждому объекту составляется уравнение равновесия, принимая коэффициент запаса равным единице. Система уравнений решается относительно неизвестных среднего сопротивления сдвигу или угла внутреннего трения и сцепления.

5. Определяется нормальное напряжение на поверхностях смещения, вызванное весом оползневого тела или его части.

Полученная при расчете величина среднего сопротивления сдвигу может быть отнесена только к поверхности данного генетического типа с характерным для нее рельефом, степенью увлажнения и при определенном значении нормального напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белый Л. Д.* Геологическая природа свойств скальных массивов как оснований и среды для инженерных сооружений.— В кн.: Инженерная геология скальных массивов М., Наука, 1976, с. 13—18.
2. *Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. И.* Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., Недра, 1967.
3. *Бондарик Г. К.* Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. М., Недра, 1971.
4. *Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. Изд. 2-е. М., Недра, 1979.
5. *Борисов Г. С., Негода А. П.* Новый метод выделения поровых растворов.— В кн.: Влияние поровых вод на физико-механические свойства пород. Киев, Наукова думка, 1974, с. 28—33.
6. *Ботвинкина Л. Н.* Методическое руководство по изучению слоистости. М., Недра, 1965.
7. *Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М., Высшая школа, 1973.
8. *Валях В. М., Чаповский Е. Г.* Аэрофотометоды при региональных инженерно-геологических исследованиях в аридных районах. М., Недра, 1977.
9. *Вара А. А.* Методические рекомендации по изучению мелкой трещиноватости скальных пород при изысканиях для гидротехнического строительства. М., Энергоиздат, 1981.
10. *Веригин Н. Н.* Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., Госстройиздат, 1962.
11. *Гастян А. Ш.* Ферментативная активность почв Армении. Ереван, Айастан, 1974.
12. *Гзовский М. В.* Основы тектонофизики. М., Наука, 1975.
13. *Голодковская Г. А., Шаумян Л. В.* К природе прочности массивов скальных горных пород. Вестник МГУ. Геология, 1974, № 1, с. 33—49.
14. *Грунтоведение/Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Р. С. Зиангиров и др.* М., Изд-во МГУ, 1983.
15. *Гудилин И. С., Комаров И. С.* Применение аэрометодов при региональных гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., Недра, 1978.
16. *Джегер Ч.* Механика горных пород и инженерные сооружения. М., Мир, 1975.
17. *Емельянов В. А.* Полевая радиометрия влажности и плотности почвогрунтов. М., Атомиздат, 1970.
18. *Изучение напряженного состояния массивов пород в инженерно-геологических целях.* М., Изд-во МГУ, 1968.
19. *Ильницкая Е. И.* Определение сопротивления угля отрыву от целика забоя.— В кн.: Труды института горного дела, т. 2, М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 90—100.
20. *Коломенский Н. В.* Общая методика инженерно-геологических исследований. М., Недра, 1968.
21. *Комаров И. С.* Накопление и обработка информации при инженерно-геологических исследованиях. М., Недра, 1972.
22. *Корчагин Г. П., Коренева С. Л.* Прессиметрия и вращательный срез в инженерной геологии. М., Недра, 1976.
23. *Крюков П. А.* Горные, почвенные и иловые растворы. Новосибирск, Наука, 1971.
24. *Кузнецов С. И., Романенко В. И.* Микробиологическое изучение внутренних водоемов. Лабораторное руководство, М., Изд-во АН СССР, 1963.

25. *Левшин А. Л., Горяинов Н. Н.* Распространение продольных сейсмических волн в песчаных породах. Изв. высш. учебн. заведений. Геология и разведка, 1962, № 4, с. 113—125.
26. *Ломтадзе В. Д.* Инженерная геология: Специальная инженерная геология. Л., Недра, 1978.
27. *Маслов Н. Н.* Механика грунтов в практике строительства (Оползни и борьба с ними). М., Стройиздат, 1977.
28. *Методические рекомендации по применению пенетрационного каротажа, обработка и интерпретации результатов.* М., ВСЕГИНГЕО, 1980.
29. *Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород.* Под ред. Е. М. Сергеева, С. Н. Максимова, Г. М. Березкиной. М., Изд-во МГУ, 1968.
30. *Методика инженерно-геологических исследований высоких обвальных и оползневых склонов/Под ред. Г. С. Золотарева, М. Яннича.* М., Изд-во МГУ, 1980.
31. *Методы почвенной микробиологии и биохимии/Под ред. Д. Г. Звягичева.* М., Изд-во МГУ, 1980.
32. *Нейштадт Л. И., Пирогов Н. А.* Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. М., Энергия, 1969.
33. *Нестеренко Г. Т., Матвеев Б. В.* Натурные методы изучения механических свойств структурно-нарушенного массива для управления горным давлением и сдвижением пород.— В кн.: Современные проблемы механики горных пород. Л., Наука, 1972 с. 210—220.
34. *Никитин В. Н.* Основы инженерной сейсмологии. М., Изд-во МГУ, 1981.
35. *Основы гидрогеологических расчетов/Ф. М. Бочевер, И. В. Гармонов, А. В. Лебедев и др.* М., Недра, 1969.
36. *Резников А. А., Муликовская Е. П., Соколов И. Ю.* Методы анализа природных вод. М., Недра, 1970.
37. *Савич А. И., Яценко З. Г.* Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М., Недра, 1979.
38. *Сергеев Е. М.* Инженерная геология. М., Изд-во МГУ, 1978.
39. *Склоновые процессы (фотограмметрический метод изучения склоновых процессов)/Ю. Ф. Книжников, Ф. В. Никулин, В. С. Федоренко и др.* М., Изд-во МГУ, 1977, вып. 2.
40. *Соколов Б. А.* К оценке слоистой текстуры грунтовой толщи.— Инженерная геология, 1980, № 6, с. 84—87.
41. *Солодухин М. А.* Инженерно-геологические изыскания для промышленного и гражданского строительства. М., Недра, 1975.
42. *Справочник по инженерной геологии.* Изд. 3-е. М., Недра, 1981.
43. *Трофименко Ю. Г., Воробков Л. Н.* Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. М., Стройиздат, 1981.
44. *Федоренко В. С.* Значение и возможности методов стереофотограмметрии при различных видах инженерно-геологических исследований. Вестн. Моск. ун-та, Геология, 1969, № 5, с. 66—70.
45. *Фисенко Г. Л.* Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., Недра, 1965.
46. *Черняк Г. Я., Мясковский О. М.* Радиоволновые методы исследований в гидрогеологии и инженерной геологии. М., Недра, 1973.
47. *Чаповский Е. Г.* Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М., Недра, 1975.
48. *Шаумян Л. В.* Физико-механические свойства массивов скальных горных пород. М., Наука, 1972.
49. *Ярг Л. А.* Моделирование процесса выветривания горных пород в условиях тропического климата.— Инженерная геология, 1980, № 6, с. 64—75.
50. *Ярг Л. А.* Влияние гидрохимических условий на направленность процесса выветривания горных пород. Изв. высш. учебн. заведений. Геология и разведка, 1982, № 5, с. 122—131.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Азотфиксация** 172
Активность биологическая 169
— ферментативная 171
Анализ газовый 160
Анизотропность 374
- Батометр** 159, 160
Бурение 14
- Влагомеры** 122, 124
Влагоплотномеры 124
Водопоглощение удельное 302, 313
Выветривание 288
- Газ растворенный** 154
Геологическая среда 7, 9
Глины 99, 220
Грохочение 233
Грунтоведение 5, 6, 104
Грунты глинистые 98
— крупнообломочные 97
— песчаные 97
Гумификация 104
Гумус 104
- Дернина** 104
Дешифрирование АФС 87
Диаграмма трещиноватости 285
- Естественная влажность грунта** 110
- Жесткость воды** 152
- Зольность** 105
Зона выветривания (гипергенеза) 228
Зондирование динамическое 224, 225, 265
— статическое 224, 225, 229, 265
- Инженерная геология** 5, 6
— геодинамика 6
- Интенсивность размокания** 328
— смыва 330, 331
— хемосинтеза 173
- Каротаж акустический** 202
— пенетрационный 265
— сейсмический 202, 205
— ультразвуковой 202, 205
— электрический 202, 205
Классификация трещин 273
Компаратор 139, 140
Кора выветривания 288
Коэффициент водопроницаемости 301
— волнового размыва 333
— длительной прочности 382
— оттаивания 351
— поперечной деформации 250
— пористости 265
— проницаемости 301
— пьезопроводности 302
— размываемости 334
— сжимаемости 351
— скорости выветривания 292
— сопротивляемости размыву 334
— трещинной пустотности 275
— уровнепроводности 302
— фильтрации 301, 314, 315, 319
— фильтрационной анизотропии 302
- Критерий Стьюдента** 73
Крыльчатка 298
- Макроструктура** 208
Макротекстура 208—213
Метод вакуумный 135
— вертикального электророндирования 139
— вызванной поляризации 129, 139
— гидроразрыва 258
— диэлектрический 127
— Звягинцева 168
— инженерной геологии 11

- историко-геологический 11, 12
- Иржи Конта 101
- ключевых участков 13
- кольцевого среза 393
- корреляционный 255, 285
 - напорных камер 341
- нейтронный 120, 265
- органических красителей 101
- отпрессовывания растворов 134
- отраженных волн 199
- Перфильева 166
- плоскостного среза 389
- поступательного среза 396
- преломленных волн 199
- раздавливания и обрушения целлюлоз 384
- регионально-генетический 11, 12
- режущего кольца 255
- Рутковского 238
- Сабанина 239
- сейсмический 369
- соосных скважин 251
- стереофотограмметрический 269, 299
- суммарной кривой 214
- Филатова 237
- шлифов 168
- Методы аналогий 12, 16
 - деформационные 248
 - колориметрические 139
 - лабораторные 12
 - моделирования 12, 17
 - общие 11, 12
 - полевые 12
 - радиометрические 254
 - рассеянного гамма-излучения (ГГК) 267
 - расчетно-теоретические 12, 17
 - сейсмоакустические 254, 278
 - точечного нагружения 385
 - химические 139
 - частные 11, 13
 - экспериментальные 12, 13
 - электрические 127
 - электрометрические 254
- Модуль деформации 368, 369
 - трещиноватости 275
 - упругости 347
- Морена 90
- Несущая способность грунта 348
 - Обвалы 88
 - Образец грунта 21
 - Органические вещества 104
 - Осыпи 89
 - Отложения аллювиальные 89
 - гравитационные 88
 - ледниковые 90
 - лёссовые 93
 - морские 93
 - озерные 90
 - оползневые 89
 - пролювиальные 89
 - флювиогляциальные 92
 - элювиальные 88
 - Очес 104
- Педоскоп капиллярный 167
- Пески 265, 266
- Пипетка Зегера 156
- Показатель степени выветрелости 292
- Породы глинистые 94
 - интрузивные 112
 - карбонатные 94
 - магматические 95, 110, 113
 - метаморфические 95, 113
 - нецементированные 94
 - пелитовые 143
 - песчано-галечниковые 95
 - цементированные 95, 113
 - эффузивные 112
- Прибор вращательного среза 402, 399
 - для отпрессовывания растворов 135
- Приведенный расход 313
- Прессиометрия 352
- Проба грунта 22
 - порового раствора 137
- Прогибомеры 340
- Проницаемость 301
- Просадочность 348
- Просвечивание сейсмическое 201
- Профилирование продольное 200
 - сейсмическое 202
- Пустотность массива 284
- Размягчаемость пород 329
- Режимные наблюдения 15

- Скорость выветривания 292
— размокания 329
— размывающая 332
— распространения упругих волн 219, 256
Способ Бадова 124
— Биндемана 323
— Болдырева 321
— Ваксара и Воронкова 372
— косвенной корреляции 370
— Нестерова 320, 322
— прямой корреляции 370
Степень общей гидрофильности 103
— приведенной гидрофильности 103
— разложения торфа 105
— уплотненности 266
Съемка сейсмическая 200
— фототеодолитная 185
Сцепление 393
- Твердость 105, 107
Торф 104
Трубки Честерса 169
Угол откоса 328
— внутреннего трения 393
— откоса 328
- Формула Макензи—Сато 280
Фотометод 233
- Хрупкость 105, 107
- Шаг опробования 36
- Щелочность воды 141
- Эксперимент 18
Экстензометры 341
Элемент инженерно-геологический 26
— расчетный 25

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (Е. М. Сергеев)	3
Введение (Е. М. Сергеев, В. А. Королев)	5

Часть I

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Глава 1. Цели и структура инженерно-геологического опробования (Г. К. Бондарик)	20
1.1. Общие положения	20
1.2. Методика опробования геологических тел на разных стадиях инженерно-геологических исследований	22
1.3. Инженерно-геологическое опробование слоистых геологических тел	28
1.4. Исходная информация, необходимая для инженерно-геологического опробования	30
Глава 2. Системы инженерно-геологического опробования (Г. К. Бондарик)	31
2.1. Элементы теории пространственно-временной изменчивости геологической среды. Понятие поля геологического параметра	31
2.2. Системы инженерно-геологического опробования	34
2.3. Краткие сведения о пространственно-временных системах опробования	36
Глава 3. Определение числа проб (М. И. Горальчук)	37
3.1. Общие положения	37
3.2. Установление границ квазиоднородной области	42
3.3. Метод доверительных пределов	45
3.4. Метод последовательного критерия отношения вероятностей	51
3.5. Метод оптимальной выборки	58
Глава 4. Расчет систем опробования (Г. К. Бондарик)	60
4.1. Общие положения	60
4.2. Расчет параметров одномерной системы опробования	62
4.3. Расчет параметров двумерной системы опробования	66
4.4. Расчет параметров трехмерной пространственной системы опробования	69
4.5. Параметры пространственно-временной системы опробования	70
4.6. Расчет числа, площади и формы ключевых участков-эталонов	72
Глава 5. Отбор, консервация и хранение образцов горных пород (М. И. Горальчук)	75
5.1. Способы отбора проб	75
5.2. Отбор монолитов из шурфов и естественных обнажений	78
5.3. Отбор монолитов из скважин	79
5.4. Отбор проб скальных пород	81
5.5. Консервация, упаковка и хранение образцов нарушенного сложения и монолитов	81
5.6. Порядок вскрытия монолитов и отбор проб для анализов	83

Часть II

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ГОРНЫХ ПОРОД

Глава 6. Методы изучения состава твердого компонента пород	84
6.1. Общие положения (В. И. Осипов)	84
6.2. Аэрометоды изучения литологических типов пород (А. В. Садов)	86

6.3. Визуальные методы изучения минерального состава и органического вещества в породах (Л. В. Шаумян, С. Д. Филимонов)	97
Глава 7. Методы изучения жидкого компонента пород	118
7.1. Общие положения (В. Т. Трофимов)	118
7.2. Изучение количественного содержания воды в породах (Н. П. Затенацкая, Д. А. Манукян)	120
7.3. Выделение поровых растворов из пород (В. А. Королев)	133
7.4. Изучение состава поровой воды (Н. П. Затенацкая)	138
Глава 8. Методы изучения газового компонента пород	152
8.1. Краткая характеристика газового компонента пород (Е. Н. Огородникова, В. А. Королев)	152
8.2. Опробование пород с целью изучения свободного, защемленного и адсорбированного газа (Е. Н. Огородникова)	155
8.3. Опробование пород с целью изучения растворенных газов (Е. Н. Огородникова)	159
8.4. Изучение состава газового компонента пород (Е. Н. Огородникова)	160
Глава 9. Методы изучения биотического компонента (микроорганизмов) в породах (И. Н. Болотина)	163

Часть III

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ МАССИВОВ

Глава 10. Изучение массивов скальных пород	175
10.1. Описание основных признаков строения массивов при инженерно-геологическом картировании (Л. В. Шаумян)	175
10.2. Дистанционные инструментальные методы (В. С. Федоренко, Б. М. Фаминцын)	184
10.3. Геофизические методы (В. Н. Никитин, Л. В. Шаумян)	197
Глава 11. Изучение строения дисперсных пород и их массивов	207
11.1. Визуальные методы (Б. А. Соколов)	207
11.2. Дистанционные инструментальные методы (В. С. Федоренко)	215
11.3. Геофизические и пенетрационно-каротажные методы (В. Н. Никитин, Т. А. Грязнов)	219
11.4. Определение гранулометрического состава (Е. А. Толстых, С. Д. Филимонов)	230
Глава 12. Сочетание методов при изучении строения горных пород и их массивов (В. Н. Осипов, Т. А. Грязнов)	240
12.1. Общие положения	240
12.2. Сочетание методов на базе различных технических средств	241
12.3. Сочетание методов на одной базе — способе проходки	242

Часть IV

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ МАССИВОВ

Глава 13. Методы изучения состояния горных пород и их массивов	248
13.1. Изучение напряженного состояния (Э. В. Калинин, Л. В. Шаумян, В. И. Осипов)	248
13.2. Изучение уплотненности и увлажненности (Т. А. Грязнов, В. С. Федоренко)	264
13.3. Изучение трещиноватости (Л. В. Шаумян, В. Н. Никитин)	272
13.4. Изучение выветрелости горных пород (С. В. Николаев, В. Н. Никитин, В. С. Федоренко)	288
Глава 14. Методы изучения фильтрационных свойств и водопрочности горных пород и их массивов	300
14.1. Основные расчетные гидрогеологические параметры (А. Г. Миллихер, А. Г. Степаненко)	301

14.2. Опытные откачки воды из скважин (А. Г. Милихикер, А. Г. Степаненко)	302
14.3. Изучение водопроницаемости скальных пород методом опытных нагнетаний воды в скважины (А. Г. Милихикер, А. Г. Степаненко)	313
14.4. Опытные наливы в шурфы	319
14.5. Изучение водопрочности горных пород и их массивов (В. А. Королев)	326
Глава 15. Методы изучения деформационных свойств горных пород	335
15.1. Изучение деформационных свойств грунтов с помощью штампов (В. И. Осипов)	335
15.2. Изучение деформационных свойств с помощью прессиометров (Г. П. Корчагин, С. Л. Коренева)	352
15.3. Изучение деформационных свойств геофизическими методами (В. Н. Никитин)	367
Глава 16. Методы изучения прочностных свойств горных пород	377
16.1. Определение прочности скальных пород в массиве (Л. В. Шаумян, С. В. Николаев)	377
16.2. Изучение прочности дисперсных пород методом сдвига (В. И. Осипов, С. Д. Филимонов)	388
16.3. Изучение прочности слабых дисперсных грунтов методом лопастных испытаний (Г. П. Корчагин, С. Л. Коренева)	398
16.4. Изучение прочности пород методом обратных расчетов (Э. В. Калинин)	408
Список литературы	416
Предметный указатель	418

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ИЗУЧЕНИЮ ГОРНЫХ ПОРОД

Том 1

ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ

Редактор издательства *О. Л. Виноградова*
Переплет художника *И. А. Слюсарева*
Художественный редактор *Е. Л. Юрковская*
Технический редактор *А. В. Трофимов*
Корректор *Р. Т. Баканова*

ИБ № 4777

Сдано в набор 03.02.84. Подписано в печать 23.05.84. Т-11439. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл.-печ. л. 26,5. Усл. кр.-отг. 26,5. Уч.-изд. л. 28,83. Тираж 6800 экз. Заказ 313/9080—2. Цена 2 руб.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633,
Москва, К-12, Третьяковский пр., 1/19

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.

4276

2, 35.

1874