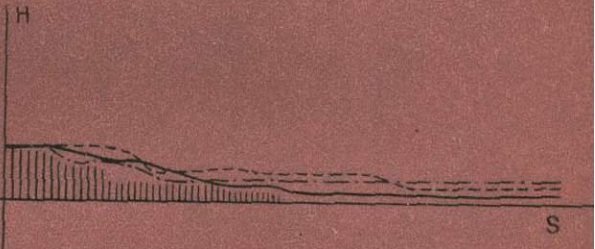
ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ИХ ПРОГНОЗ



ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА ·
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ВОСТОЧНО-СИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ
КОМИССИЯ ПО ДОЛГОСРОЧНЫМ ПРОГНОЗАМ
ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ИХ ПРОГНОЗ

Ответственный редактор
канд. геол.-мин. наук Ю. Б. Тржцинский

4560

НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1985

Библиотека Института геологических наук АН Арм.ССР

УДК 624.131.1 + 556.3 + 551.490(571.5)

Изменения геологической среды и их прогноз/Лещиков Ф. Н., Попов В. Н., Пуляевский Г. М. и др.— Новосибирск: Наука, 1985.

Монография посвящена вопросам инженерно-геологической оценки отдельных регионов Восточной Сибири и проблемам прогноза изменения геологической среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Особое внимание уделено характеристике закономерностей развития эндогенных и экзогенных геологических процессов и явлений, обусловленных региональными факторами (сейсмика, мерзлота, оползни, сели, карст и т. д.) и их техногенных аналогов, в связи с преобразованием поверхности Земли, подземной и поверхностной гидросфер. С точки зрения решения задач прогнозирования рассмотрены отдельные методические подходы к оценке природных условий и предсказанию их эволюции.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся проблемами динамической и инженерной геологии, геодинамики, гидрогеологии, геоморфологии, географии и др.

Рецензенты *Б. П. Агафонов, В. А. Топорков*

И $\frac{1904060000-918}{042(02)-85}$ 163—85—IV

© Издательство «Наука», 1985 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В связи с интенсивным развитием народного хозяйства нашей страны приобретает большое значение проблема рационального использования природных ресурсов и целенаправленной охраны окружающей среды. В Основных направлениях экономического и социального развития страны на 1981—1985 годы и на период до 1990 года подчеркивается необходимость «улучшать охрану природы, усилить работу по сохранности сельскохозяйственных угодий, борьбу с эрозией почв, повысить темпы работ по рекультивации земель, обеспечить их защиту от селей, оползней, обвалов, засоления, заболачивания, подтопления и иссушения»*.

Понятие «окружающая среда» весьма емкое, оно включает представление о многих компонентах биосферы — атмосфере, гидросфере, литосфере, животном и растительном мире и т. д. В настоящей монографии мы рассмотрим лишь один из этих компонентов — верхнюю часть литосферы, или геологическую среду. Толкование последнего термина встречается у многих исследователей [Сидоренко, 1967; Ломтадзе, 1977; Котлов, 1978], однако наиболее полно оно сформулировано акад. Е. М. Сергеевым, который пишет: «Под геологической средой мы понимаем любые горные породы и почвы, слагающие верхнюю часть земной коры, которые рассматриваются как многокомпонентные системы, находящиеся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека, в результате чего происходит изменение природных геологических и возникновение новых антропогенных процессов, что, в свою очередь, вызывает изменение инженерно-геологических условий определенной территории» [Инженерно-геологические аспекты..., 1981, с. 29].

* Материалы XXVI съезда КПСС.— М.: Политиздат, 1981, с. 183.

Среди главнейших задач, связанных с проблемами рационального использования геологической среды, значительное место занимает изучение инженерно-геологических условий, закономерностей их формирования, развития и изменения в пространстве и времени. Именно эти факторы определяют степень сложности освоения отдельных территорий. С другой стороны, геологическая среда, являясь элементом развития определенной природной системы с геологически сложившимся динамическим постоянством и равновесием, очень чутко реагирует на всевозможное техногенное вмешательство. Именно деятельность человека в настоящее время становится серьезным геологическим фактором, вносящим существенные коррективы в естественную природную обстановку [Одинцов, 1978]. Например, интенсивное освоение отдельных регионов земного шара часто наносит земельным и водным ресурсам ущерб, экономическая оценка которого пока еще полностью не может быть подсчитана [Феропонтова, 1979].

Эффект влияния человека на земную поверхность состоит прежде всего в изменении рельефа, т. е. происходит нивелирование последнего, изменяется степень расчлененности, создаются новые положительные или отрицательные формы, в том числе огромные искусственные моря. Это в свою очередь приводит к перераспределению напряжений в горных массивах и их разуплотнению, изменению гидрологических и гидрогеологических особенностей и т. д. Изменение структуры земной поверхности при промышленно-гражданском строительстве, преобразование земли в сельском хозяйстве и т. д. уже сейчас охватило пятую часть суши. Ежегодная добыча в мире угля, нефти и газа в 1975—1976 гг. превышала 6 млн. т [Сергеев, 1977; Горшков, 1979]. В настоящее время в Донбассе существует более 1500 отвалов, шахт и горнообогатительных фабрик. Высота отдельных отвалов достигает 50—100 м, в результате векового отлива из шахт уровни подземных вод снижены и некоторые толщи пород обезвожены. Развилась своеобразная техногенная кора выветривания большой мощности. Подобные ситуации отмечаются и для других районов мира [Лапердин, Тржцинский, 1981].

Особое место в изменении геологической среды на всем протяжении ее развития занимают процессы внешней динамики земной коры — экзогенные геологические про-

цессы. Именно они имеют существенное значение при оценке инженерно-геологических условий отдельных территорий. И именно они требуют особого внимания и изучения: «Проблема изучения этих процессов, особенно учитывая вмешательство в них человека, имеет не меньшее значение, чем проблема освоения космоса, околоземного пространства или глубоких недр Земли» [Сидоренко, 1967, с. 7]. Иными словами, на первый план выдвигается задача исследования пространственных и временных закономерностей формирования и развития экзогенных геологических процессов. При этом нельзя не согласиться с мнением С. П. Горшкова [1982], что, хотя отдельные экзогенные геологические процессы изучены довольно хорошо, их теория не может считаться до конца разработанной.

В современную эпоху—эпоху интенсивного развития науки и техники народнохозяйственное освоение территории сопровождается неизбежным преобразованием природных ландшафтов. Вмешательство человека в геологическую среду приводит к активизации многих экзодинамических процессов, а также провоцирует возникновение качественно новых инженерно-геологических (техногенных) явлений, которые проявляются катастрофически быстрыми темпами и наносят существенный ущерб не только объектам народного хозяйства, но и всей природе в целом. В связи с этим рациональное использование геологической среды для различного вида строительства зависит не только и не столько от качественной инженерно-геологической оценки условий освоения, сколько от точного научного предвидения эволюции этих условий как в процессе естественного развития, так и под воздействием техногенных факторов.

Вопросы прогнозирования экономических, социальных, природных и других явлений стали общегосударственной проблемой. На XXVI съезде КПСС перед геологическими науками была поставлена следующая задача: «изучение строения, состава и эволюции Земли, биосферы, климата, Мирового океана... с целью рационального использования их ресурсов, совершенствования методов прогнозирования погоды и других явлений природы, повышения эффективности мероприятий в области охраны окружающей среды...»*. Прогноз изменения геологиче-

* Там же, с. 147.

ской среды, и в первую очередь экзогенных геологических процессов, как правило, основывается на большом объеме информации о закономерностях распространения и особенностях развития различных видов экзогенных процессов. При этом для обработки и анализа всего накопленного фактического материала сейчас наряду с общепринятыми в инженерной геологии методами (структурный, историко-геологический, генетический, метод аналогии и др.) начинает применяться системный подход для установления элементов геологического объекта и вида отношений между ними. В настоящей работе сделана попытка обосновать применение системного анализа при решении отдельных задач инженерной геологии. Кроме того, рассмотрены и другие методы инженерно-геологической оценки геологической среды с целью выяснения главнейших особенностей ее формирования и прогнозирования изменений, происходящих в ней в процессе естественно-геологического и антропогенного развития. Естественно, в книге не дается исчерпывающих ответов на все вопросы, касающиеся изменений геологической среды, что объясняется обширностью затрагиваемых проблем и неравномерной их изученностью. Однако постановка этих проблем своевременна и необходима.

Монография является продолжением серии книг, подготовленных Комиссией по долгосрочным прогнозам природных явлений, работающей при Президиуме Восточно-Сибирского филиала СО АН СССР. Вопросы оценки экзогенных геологических процессов и их прогноза рассматривались в таких работах, как «Методические аспекты прогнозирования природных явлений Сибири» (1980), «Закономерности и прогнозирование природных явлений» (1980), «Информационная основа прогноза природных процессов» (1980), «Изменчивость природных явлений во времени» (1982), «Геологические и экологические прогнозы» (1984) и др. Однако в указанных монографиях наряду с проблемами общего прогнозирования изменений биологических и водных экосистем, гидрометеоэлементов и солнечной активности рассматривались лишь отдельные стороны изменчивости инженерно-геологических условий во времени и в пространстве. Предлагаемая читателю книга целиком посвящена проблемам инженерно-геологического познания геологической среды и прогноза ее преобразования под воздействием естественных и антропогенных факторов. Авторский коллектив надеется, что

она заинтересует специалистов в различных областях науки и техники, разрабатывающих эти проблемы. Отдельные главы и разделы работы могут быть использованы планирующими и проектно-изыскательскими организациями при решении конкретных вопросов рационального народнохозяйственного использования отдельных регионов Восточной Сибири и охраны геологической среды.

В процессе подготовки монографии к изданию полезные советы и замечания сделали В. А. Топорков, Б. П. Агафонов, И. П. Дружинин, В. В. Ушакова. Всем им авторы выражают глубокую признательность.

Авторский коллектив отдает себе отчет о том, что в публикуемом исследовании могут быть отдельные упущения и недоработки. Поэтому заранее благодарны всем, кто пришлет свои замечания, пожелания и отзывы по адресу: 664033, Иркутск, Президиум Восточно-Сибирского филиала СО АН СССР, Комиссия по долгосрочным прогнозам природных явлений.

Ю. Б. Тржцинский

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЙ

§ 1. Структура информационной системы прогноза инженерно-геологических условий

Изучение инженерно-геологических условий отдельных территорий, оценка влияния планируемого строительства на окружающую геологическую среду — основа разработки достоверных и надежных систем инженерно-геологического прогноза. Проблема создания подобных систем, их эффективного использования при выполнении инженерных изысканий сложна и многогранна. Ее решение во многом зависит от полноты исходной информации, ее обработки и условий хранения. Однако этим вопросам специалисты в области инженерной геологии до сих пор уделяли мало внимания. Многие из методов накопления, обработки и хранения информации не отвечают в полной мере современным требованиям производства работ. Накопление инженерно-геологической информации производственными организациями большей частью не систематизировано. По этой причине нередко затруднительны обработка, анализ и обобщение имеющихся материалов.

В современных условиях наряду с разработкой специальных форм накопления, обработки и хранения информации важным является создание новых унифицированных информационных систем прогноза инженерно-геологических условий.

Под информационной системой понимается комплекс блоков информационного фонда и процедур, предназначенных для накопления, обработки и хранения информации, позволяющих обновлять, систематизировать, корректировать и выдавать по мере необходимости сведения для решения задач инженерно-геологического прогноза.

Создание таких систем позволяет проводить многоплановую обработку и систематизацию громадного фактиче-

ского материала, получаемого в процессе инженерно-геологических исследований, что, в свою очередь, помогает выявить различные закономерности высокого уровня обобщения информации.

Главным элементом информационной системы является блок содержательного описания геосистемы. Под геосистемой, в соответствии с системным подходом, понимаются материальные системы, элементы которых полностью или в основном представлены твердыми, жидкими или газообразными компонентами геологической среды в пределах определенного объема литосферы. Эта система обладает характерными особенностями [Бондарик, 1981]. Прежде всего она является динамической, так как в процессе лито- и аквагенеза под влиянием физических полей изменяются свойства геосреды, следовательно, меняются состояние и структура самой геосистемы. Она интенсивно взаимодействует с подобными себе геосистемами, а также с атмосферой, гидросферой, поэтому геосистема будет активной и открытой. По изменению во времени можно выделить геологические системы с установившимся и неустановившимся режимом. Как исторически развивающаяся, система имеет прошлое, настоящее и будущее, что позволяет, изучая закономерности в развитии прошлого, высказывать определенные прогнозы о ее поведении в будущем.

В зависимости от цели исследования, используя различные критерии выделения атрибутивных элементов, геосистему разделяют на элементы — подсистемы [Бондарик, 1981]. При выделении элементов учитываются следующие аспекты или признаки инженерно-геологических условий: геологическое, геоморфологическое, гидрогеологическое строение, физические, водные и механические свойства геологической среды. Каждому признаку будет отвечать своя структура геосистемы. Таксономическое выделение структур определенного порядка обусловлено масштабом геосистемы. Необходимы аналитический способ описания свойств геосистемы и моделирование ее структур, основанные на разработках теории изменчивости свойств геологической среды.

Практически всю информацию о структуре и свойствах геосистемы можно представить в виде геологических полей. Анализ модели поля позволяет получить характеристики изменчивости изучаемого параметра геологической среды и использовать их для объяснения пространствен-

ных и временных закономерностей формирования свойств и структуры геосистемы. Реализация «полевого» подхода — основное условие разработки пространственного и пространственно-временного прогноза при инженерных изысканиях. Такой подход позволяет предельно свернуть информацию о свойствах геологической среды, при этом сохраняются все главнейшие ее черты, необходимые для инженерно-геологической оценки и прогноза [Бондарик, 1981].

Эффективность «полевого» подхода значительно повышается при использовании машинных методов накопления и обработки исходной информации.

Второй компонентой информационной системы является база данных. Ее назначение состоит в том, чтобы фактические данные, получаемые при инженерных изысканиях, сделать легкодоступными для извлечения, обработки и анализа при минимальной избыточности, которая допускает их использование оптимальным образом.

Организация базы данных как элемента информационной системы в инженерной геологии основывается на реализации следующих идей.

1. При инженерно-геологических исследованиях информация во всех случаях может быть представлена в виде наборов описаний однотипных сгруппированных объектов.

2. В процессе исследований изменяется принцип объединения объектов в группы, набор признаков, характеризующих каждую группу и каждый объект, характеристики самих признаков.

3. Все изменяющиеся факторы информации формализованно могут быть описаны ограниченным набором параметров.

Источником информации при формировании баз данных являются сведения о геосистемах как об объекте исследований, который определяет инженерно-геологические условия строительства. Каждую геосистему можно охарактеризовать набором параметров, совокупность которых составляют исходные материалы, получаемые в процессе исследований. При этом необходимо учитывать специфику фактических инженерно-геологических данных:

они характеризуются не иерархической структурой, а масштабами и детальностью работ;

наборы этих данных, как правило, привязаны к определенным площадям исследований, а отдельные из них,

соответствующие точкам наблюдений, имеют координатную привязку;

объективность и точность данных зависят от совершенства применяемого оборудования, приборов, от квалификации исполнителя, а также от стандартизации методик наблюдений (испытаний), удовлетворяющих требованиям получения равноценных результатов.

В рассматриваемой концепции предусматривается обработка поступающих данных на основе файлового подхода. Файл — это массив (или совокупность массивов) организованной информации, относящейся к одной теме или подтеме. Она группируется в базе данных по мере поступления нового материала, создавая упорядоченные, а иногда и хаотические наборы фактов. При этом начало и конец каждого файла отмечаются специальными метками, что позволяет легко найти конкретную информацию [Лаудон, 1981]. Для каждого файла составляется паспорт, содержащий упрощенную схему участка исследований, кроме этого, есть поисковый образ файла — набор дискрипторов, которыми кодируются ключевые слова, характеризующие содержание файлов [Лаудон, 1981].

Обработку, систематизацию и хранение информации можно осуществлять в базе данных с помощью ЭВМ, используя опыт отдельных геологических служб. Данные через запоминающее устройство ЭВМ заносятся и хранятся на магнитных лентах в виде файлов, что позволяет быстро извлекать и оперировать информацией для решения конкретных инженерно-геологических задач.

Вводимые в ЭВМ с заранее заданной жесткой схемой, внутренне связанные массивы информации делают эту информацию доступной для многих пользователей, решающих производственные задачи изысканий.

Использование ЭВМ при создании блока информационной системы в виде базы данных предполагает строгий контроль содержания и качества представляемых данных, а записываемая информация должна отвечать требованиям, связанным со спецификой базы данных в инженерной геологии.

В качестве объединяющего элемента всей информационной системы прогноза может выступать система оперирования данными (СОД), которая представляет связующий стержень между базой данных, каждым методом инженерно-геологических исследований, а также программами комплексного анализа материалов. По своему

назначению, как считает В. В. Ломтадзе, СОД является общесистемным математическим обеспечением, состоящим из программ и подпрограмм общего назначения. Подпрограммы общего назначения служат для создания файлов и доступа к ним на основе использования формализованно описанного набора параметров.

Реализация идей, положенных в основу создания баз данных, позволит использовать соответствующие уже разработанные программы и подпрограммы общего назначения, а также создать ряд новых программ и подпрограмм специального назначения. Систему оперирования данными можно организовать сравнительно легко и потому, что инженерная геология имеет дело с громоздкой информацией сравнительно простой структуры. Под структурой понимается схема зависимостей внутри множества данных. Она играет важную роль при выборе способов обработки и анализа информации [Лаудон, 1981].

Третью функциональную компоненту информационной системы составляют процедуры обработки, т. е. блок формализованной обработки информации. В практике инженерных изысканий данный блок может оказать существенную помощь при реализации многих методов комплексного анализа материалов для оценки признаков, характеризующих инженерно-геологические условия, с целью выявления особенностей и основных закономерных изменений этих признаков в пространстве и во времени.

Таким образом, основные этапы комплексного анализа слагаются из: одномерного статистического анализа, регрессионного анализа, корреляционного и факторного анализа, тренд-анализа и анализа распознавания образов по комплексу признаков.

В заключение следует отметить, что подобную информационную систему прогноза можно рассматривать как информационную модель в инженерной геологии, от обоснованности, точности и достоверности которой во многом зависит эффективность выполняемых исследований.

§ 2. Системный анализ при региональном прогнозе экзогенных геологических процессов

Как уже отмечалось, в последние годы увеличился объем и повысились требования к качеству изучения экзогенных геологических процессов. Это вызвано необходимостью более точного представления данных о природных условиях в осваиваемых районах, а также их переоценкой на уже обжитых территориях. Возрастающая детализация при одновременной интенсификации объемов исследований вызвала потребность в совершенствовании методологии изучения экзогенных процессов. Одной из основных причин такого подхода выступает возросшая сложность объектов изучения. Она проявляется в следующем (по Э. Л. Наппельбауму [1980]).

1. Невозможно или нецелесообразно пользоваться единой моделью (единой теорией, единообразным объяснением процесса или явления) для исследования всех аспектов поведения природного объекта.

2. Требуется проводить совместный учет различных факторов, относящихся к разным традиционным дисциплинам. При изучении экзогенных процессов применяются различные методы, в том числе инженерно-геологические, геологические, гидрогеологические, геофизические, геодезические и другие, результаты выполнения которых представляются соответствующими специалистами. Эти данные характеризуются различным содержанием, направленностью и резко различной степенью детальности.

3. Необходимо выявить целенаправленность поведения отдельных элементов, составляющих природный объект. Это относится в равной мере ко всем факторам, в той или иной степени, прямо или косвенно оказывающим влияние на развитие экзогенных геологических процессов.

4. Для природных объектов различных типов, характеризующихся определенными инженерно-геологическими условиями, существуют соответствующие декомпозиции, при которых целевое или функциональное поведение отдельных элементов стабильно и может быть выяснено, а целевое и функциональное поведение природного объекта в целом не поддается определению. Например, на развитие оползня оказывает порой влияние только опре-

деленное сочетание многих факторов, причем некоторые из них воздействуют косвенно. В такой ситуации выяснение взаимосвязанности, взаимообусловленности и роли факторов, а соответственно условий образования и эволюции оползня традиционными методами практически невозможно.

Следует отметить, что возросшая сложность объекта изучения во многом обусловлена интенсификацией познавательной деятельности человека. Вторая причина — трудность выбора среди арсенала всевозможных методов изучения самых необходимых и действенных с точки зрения их доступности, эффективности и соответствия решаемым задачам. Третьей причиной служит отсутствие логико-методологических средств для целенаправленного сбора, формализации, обобщения и обработки информации. И, наконец, четвертая причина — неспособность специалиста при традиционном подходе интерпретировать результаты исследований на всех этапах работы с учетом их целенаправленности, сопоставимости и необходимости.

Подобное положение, оформившееся в крупнейшую проблемную ситуацию, характерно для большинства отраслей науки и техники. Для решения этих проблем начиная с 50-х годов было основано и успешно развивается новое методологическое направление, которое получило общее название — системные исследования.

Процесс развития этого направления еще далеко не завершен, особенно в геологических науках. Поэтому любая работа, посвященная системным исследованиям, представляет собой лишь прогноз того, что может получиться [Ниппельбаум, 1980]. В настоящей монографии намечаются пути применения одного из аспектов системных исследований при региональном прогнозировании экзогенных процессов.

Системные исследования включают три взаимосвязанных направления: системный подход, общую теорию систем и системный анализ (по Гвишиани [1980]).

Системный подход рассматривает комплекс методологических положений для исследования любых системных объектов. Рассмотрению подлежат идеи и принципы системности, целостности, структурности и универсальности связей системы. С геологических позиций такой подход заключается в установлении элементов геологического объекта и вида отношений между ними.

Общая теория систем занимается разработкой всех возможных системных теорий. При этом определяют и обосновывают категории, уровни организаций и другие понятия и законы, которые формируют системность изучаемых объектов. Выделяются системы и устанавливается их соподчиненность, определяется положение и взаимообусловленность подсистем и надсистем.

Системный анализ представляет разработку логико-методологических средств исследования и управления систем. Назначение его в основном в реализации методов выработки и принятии решений по процессу исследований в условиях неполной информации об объекте. Занимается системный анализ не столько изучением объекта как такового, сколько исследованием связанной с ним проблемной ситуации, т. е. в конечном счете задачей эффективного взаимодействия человека с этим объектом. Теоретической базой системного анализа являются принципы системного подхода и общей теории систем.

Содержание системного анализа, его целенаправленность и организация будут существенно различаться в зависимости от формулировки конечной цели. Дальнейшая разработка деталей системного анализа определяется сложностью объекта изучения и методов, используемых для принятия решений при моделировании этого объекта. Необходимо, находясь в рамках требований, предъявляемых к построению модели, организовать анализ процесса изучения объекта таким образом, чтобы решение на любом этапе исследований не противоречило общей задаче. Анализ процесса изучения объекта сводится не столько к последовательному выявлению, классифицированию и оцениванию значимости признаков, характеризующих состояние объекта, сколько к решению задач по установлению правильности выбранных методов изучения и разработке обоснованных рекомендаций по использованию наиболее эффективных из них. С учетом этих задач выбираются логико-методологические средства, под которыми понимаются идеи, инструменты, методы и другие атрибуты изучения процесса получения, представления, классификации, обработки и анализа информации. Логико-методологические средства определяют форму и организационную структуру системного анализа. При этом необходимо учитывать важнейший принцип системного анализа — эмерджентность (целостность), т. е. положение, когда все элементы анализа взаимосвязаны и взаимо-

обусловлены. Для этого элементы должны располагаться в такой организационной форме, чтобы осуществлялась обратная связь в виде

ПРИЗНАК —— КОНТРОЛЬ —— МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ——
—— КОНТРОЛЬ —— ИНФОРМАЦИЯ

на всех этапах исследования. При недостаточном или сомнительном оценивании признака или совокупности признаков, которое должно соответствовать определенным регулирующим критериям, необходимо изменять методику изучения с тем, чтобы получить более достоверную информацию. Регулирующим критерием должно выступать требование к содержанию информации на данном этапе исследований и на заключительном его этапе. Разработку таких критериев, являющихся, по существу, системой контроля, необходимо осуществлять на всех этапах системного анализа. Подобная форма контроля связывает систему изучения объекта в единое целое и является важнейшим условием выполнения системного анализа.

Целью системного анализа при региональном прогнозировании экзогенных геологических процессов будет исследование процесса получения, обобщения, обработки и представления информации при принятии решений сначала для оценки качества информации на всех этапах изучения и выбора решений по планированию дальнейших работ, а затем, после обобщения всего результирующего материала, принятия решений по построению карты. Таким образом, с одной стороны, имеется объект изучения или природный объект, с другой — модель, отражающая состояние объекта, или, иначе говоря, карта пораженности территории экзогенными процессами. Центральным ядром проблемы являются методы, способы и другие средства, необходимые для получения, обобщения и обработки информации при построении карты. Содержание процесса изучения объекта определяется сложностью объекта и требованиями, предъявляемыми к картам, т. е. фиксированной сложностью модели. Под сложностью в данном случае понимается количество и качество элементов, составляющих объект и учитываемых при построении модели этого объекта в виде карты.

Прогнозные карты пораженности территории экзогенными процессами по своему назначению и содержанию делятся на три вида [Методическое руководство..., 1978]:

1. Карты инженерно-геологического районирования по интенсивности проявления экзогенных геологических процессов, предназначенные для отражения закономерностей регионального распространения экзогенных процессов, причем выполняется пространственное прогнозирование безотносительно ко времени, реальная природная обстановка отражается лишь на период исследований. На карте выделяются участки с различной степенью интенсивности проявления и распространения экзогенных процессов. Интенсивность рассчитывается исходя из соотношения площади, пораженной процессами, ко всей площади выделенного участка. Такая задача обычно выполняется при мелко- и среднемасштабной инженерно-геологической съемке.

2. Карты инженерно-геологические специальные (региональные), показывающие закономерности и особенности распространения и развития одного или группы взаимосвязанных экзогенных геологических процессов, например прогнозная карта оползневых процессов. На карте показывают пространственное распространение процесса и проводят районирование территории с учетом признаков, характеризующих степень эволюции процесса. Здесь также дается в основном пространственный и, частично по ключевым участкам, временной прогноз. Работы могут выполняться в любом масштабе.

4560

3. Карты инженерно-геологические специальные (локальные), предназначенные для детального представления условий возникновения и эволюции экзогенных процессов. Для составления карты требуется изучение всех аспектов процесса, с тем чтобы оценить формы его проявления в будущем. Работы ведутся в крупном или детальном масштабах.

В качественную характеристику карт входят назначение, масштаб и критерии, лежащие в основе построения карты. Назначение карты определяет ее содержание, масштаб и оказывает решающее влияние на выбор средств изучения объекта. Масштаб определяет детальность изучения объекта и его составных элементов. Критерии, принимаемые за основу построения карт, определяют фоновое содержание и представлены наиболее важными признаками, характеризующими состояние объекта и отвечающими назначению карты.

Перечисленные характеристики карт, являющиеся, по существу, требованиями к результирующей информации,

и определяют организационную структуру системного анализа, основные этапы которого в самом общем виде имеют следующее назначение: определение цели системного анализа; разработка общей схемы применения логико-методологических средств; выбор критериев для представления, контроля и сравнения информации; оценка качества информации для принятия решений; окончательные альтернативы.

Логико-методологические средства представляют план выполнения работ с намеченными к использованию идеями, методами, способами. При этом допускается их изменение после интерпретации полученных результатов или возникновения новых представлений о сложности объекта, эффективности принимаемых решений, а также по другим причинам, не зависящим от субъективного мнения исследователя.

Выше указывалось, что главной задачей системного анализа является оценка эффективности при принятии решений. Для этих целей выбираются критерии, являющиеся как бы «ситом», просеивающим и оценивающим информацию. Их функциональное содержание существенно различается в зависимости от качественной представительности анализируемых признаков и соответственно стадии исследований, так как по мере увеличения информации возрастает сложность рассматриваемой системы признаков. На начальной стадии исследования, при анализе топокарт, геологических карт, дешифрирования аэрофотоснимков и других материалов составляются предварительные прогнозные карты, где состояние природного объекта отображено главным образом с помощью метода аналогий. При использовании этого метода в качестве критериев могут выступать масштабность, представительность и достоверность.

Под масштабностью в данном случае понимается соизмеримость сложности объекта с методами изучения. Изменчивость объекта, определяемая неоднородностью характеризующих его признаков, в зависимости от выбранной методики изучения может проявляться по-разному, и задача этого критерия состоит в установлении степени точности принятой методики для изучения изменчивости объекта.

Критерий представительности оценивает качественные и количественные параметры одного или совокупности методов или способов, изучающих признаки, которые

характеризуют состояние природного объекта. Имеется в виду не точность получения информации, а необходимость ее получения. Например, на развитие склоновых процессов указывают углы наклона поверхностей, высота склона, состав и состояние пород. Кроме этого, могут иметь решающее значение экспозиция склона, мерзлотные явления, гидрогеологические условия, напряженное состояние массива, сейсмические явления и другие признаки. Методов для определения значимости признаков в развитии склоновых процессов настолько много, что исследователю часто трудно выбрать необходимые средства изучения. Поэтому критерий представительности должен помочь оценить еще на стадии составления предварительной карты возможные, более детальные методы изучения признаков, исходя из реальной природной обстановки, и выбрать наиболее предпочтительные.

Достоверность является содержательной характеристикой методов изучения признака и определяет их точность. Эти данные необходимы при выборе решения об эффективности того или иного признака. Достоверность изменяется от 0 до 100% и в таком виде является прямым показателем эффективности. Но при анализе признаков, характеризующих состояние природного объекта, понятие достоверности включает в себя значительный элемент неопределенности. Поэтому решение о степени достоверности допускается принимать исходя из логических умозаключений о форме и качественной представительности признака. Эти данные лучше представлять в виде классификационной таблицы с единым логическим подходом.

Указанные меры оценки эффективности не являются универсальными, они разрабатываются в каждом конкретном случае по-разному, исходя из задач, стоящих перед исследователем, наличия методов изучения и обработки информации, сложности природного объекта и других. Для принятия решений еще в начальной стадии исследования начинают применять факторный и корреляционно-регрессионный анализы. Дальнейшая обработка информации приводит к ее «сжатию» и представлению в виде отдельных вариантов, рассматриваемых в качестве альтернативных при принятии решений о построении карты. Так же как и на предыдущей стадии, только с привлечением более качественного логико-математического аппарата выявляются масштабы неопределенности по каждому из вариантов, сопоставляются те или иные критерии

эффективности. Выработке принятия решений по использованию какого-либо метода в дальнейшем изучении объекта, особенно опытных полевых, режимных наблюдений и других дорогостоящих работ, должен предшествовать анализ возможностей в полной мере использовать методы интерпретации и экстраполяции. Необходимо стремиться к сбору и анализу материала, достаточного для подготовки и решения задачи распознавания пространственных объектов (задача распознавания образов). Возможности применения этого метода также анализируются при выборе окончательных критериев построения карты. Для принятия решений в условиях неопределенности, когда в рассматриваемой системе наряду с признаками, имеющими четко определенные функции, существуют признаки, не имеющие достоверных параметров, рекомендуют применять имитационные модели [Данилов-Данильян и др., 1980]. В ряде случаев используется метод экспертных оценок (метод Делфи), при котором сравниваются мнения нескольких специалистов (экспертов), сформулированные ими независимо друг от друга.

Следует отметить, что системный анализ должен рассматриваться как самостоятельный элемент познавательной деятельности человека, входящей в состав исследований. Охватывая все этапы изучения, он способствует выработке и принятию решений по каждому конкретному вопросу на основе детального анализа процесса получения информации об объекте исследований. Применение системного анализа позволяет разработать максимально эффективную стратегию исследований.

§ 3. О построении прогнозных карт инженерно-геологических параметров на ЭВМ

При оценке территории, с точки зрения ее хозяйственного освоения, важно располагать соответствующей информацией о характере изменчивости состава и физико-механических свойств горных пород, которую традиционно представляют в виде карт в изолиниях значений тех или иных характеристик грунтов, построенных вручную методом линейной интерполяции. Существенный недостаток таких карт заключается в том, что методика их построения не учитывает вероятностный характер геологических изме-

рений, в соответствии с которым каждое частное значение признака следует рассматривать как величину случайную, обусловленную природной изменчивостью свойств горных пород и ошибками измерений.

При построении карт в изолиниях на ЭВМ так или иначе решается задача разделения геологических полей на детерминированную и случайную компоненты [Бондарик, 1971], которая сводится обычно к подбору аппроксимирующей функции, удовлетворяющей некоторому условию близости к исходной функции $f(x, y)$, заданной в точках измерения признака с координатами x, y.

Такая процедура обеспечивает интерполяцию значений исследуемых признаков в узлы единой квадратной сети, которую удобно использовать в качестве местной системы координат для привязки дополнительной информации.

Работы по моделированию полей инженерно-геологических показателей, носящие методический характер, нами проведены на одном из участков застройки г. Иркутска, детально разбуренном в процессе изысканий под строительство.

Исследовалась геологически однородная толща глинистых грунтов мощностью 8—10 м, в пределах которой предполагалась возможность осреднения признаков по глубине.

Данные лабораторных анализов были подготовлены в табличной форме, содержали сведения о номерах горных выработок, их координатах и включали следующие характеристики грунтов: влажность на границах текучести и раскатывания, естественную влажность, число пластичности, объемные массы, коэффициент пористости, угол внутреннего трения, удельное сцепление, модуль деформации, процентное содержание песчаной, алевритовой и глинистой фракций грансостава грунтов. Вычислительные операции выполнены на ВЦ ПГО «Иркутскгеофизика», оснащенном графопостроителем типа Калкомп.

Для прогноза регионально-коррелированной составляющей изменчивости полей исследуемых признаков нами использован аппарат тренд-анализа, где разделение поля на составляющие, как правило, производится методами наименьших квадратов (МНК) алгебраическими полиномалями невысоких порядков для вычисления поверхности тренда. Для прогноза локальной компоненты полей была использована программа, в которой реализован аппарат геостатистики Ж. Матерона [1968], позволяющий полу-

чить оптимальные крайгинг-оценки в узлах интерполяции с учетом анизотропии полей.

По физическому смыслу крайгинг аналогичен операции весового сглаживания статистическим окном по принципу самонастраивающейся фильтрации. Оценку H^* крайгинга переменной H в точке x_0 вычисляют с учетом n значений H_i в точках x_i, находящихся в окрестности точки x_0, используя линейные комбинации значения H_i:

$$H^* = \sum_{i=1}^{n} P_i H_i.$$

Веса P_i вычисляются с минимизацией дисперсии оценки H^*. Эта дисперсия зависит в основном от двух факторов — количества и взаимного расположения точек x_i от точки x_0 (в общем случае дисперсия будет увеличиваться с ростом расстояния $x_i—x_0$) и структуры поля переменной H или регулярности дисперсии в пространстве, т. е. при расчете весовых коэффициентов учитывается анизотропия поля. Эти функции выполняет вариограмма, заложенная в основу уравнений крайгинга. Оценивая дисперсию поля во всех направлениях, вариограмма позволяет придать наибольшие веса тем точкам, которые находятся на линии «простирания» или направлении минимальной дисперсии переменной H, и существенно меньшие веса всем соседним точкам, отклоняющимся от данного направления. По нашему мнению, «структурная направленность» крайгинга делает его весьма привлекательным в задачах геологического картирования.

В результате по участку работ нами был получен набор из четырех карт в изолиниях для каждого из вышеперечисленных инженерно-геологических параметров, дающих в совокупности всю необходимую информацию о характере их изменчивости в границах участка: тренд-поверхности второго порядка, карты остатка и полуширин доверительных интервалов к поверхностям тренда и карты крайгинг-интерполяции признаков.

Общеизвестно, что более надежные результаты по прогнозированию геологических показателей в двумерном пространстве дают поверхности тренда невысоких порядков. Поэтому в первую очередь важно оценить их достоверность (или качество полиномиальной интерполяции). Это можно выполнить различными формальными способами, но наиболее нагляден метод оценки, основан-

ный на анализе карт остатка и доверительных интервалов к поверхности тренда.

Карта остатка строится по величинам отклонений исходных значений признака от интерполированных МНК в точках измерения и характеризует собой поле ошибок интерполяции. Карты остатка можно строить в изолиниях абсолютных или относительных (например, в процентах) величин отклонений, а можно выносить на такую карту только те аномальные точки, где величина отклонения превышает величину полуширины доверительного интервала поверхности ренда, которую можно получить с соответствующей карты.

Качество интерполяции в этом случае можно оценить формально по общему числу аномальных точек, выделенных на картах остатка, если исходить из геометрического толкования вероятности случайного события, по которому искомая вероятность может быть вычислена по отношению площадей.

Поясним сказанное на простом примере. Допустим, оценивается поле ошибок интерполяции, содержащее 100 частных значений при уровне значимости 0,15. В таком варианте можно считать случайными (незначимыми) ошибками интерполяции не более 15 аномальных точек, значения которых выходят за пределы доверительного интервала, т. е. наличие 15 аномальных точек на карте остатка в данном случае является допустимым при $\alpha = 0{,}85$.

Если аномальные точки на карте группируются в аномалии, то значимая аномалийность поля определится в том случае, когда отношение площадей аномалий к площади участка работ будет превышать заданную величину уровня значимости модели геологического поля.

В общем случае пригодной для прогноза геологического параметра тренд-поверхность рекомендуется считать лишь тогда, когда общее число отдельно стоящих аномальных точек не превышает допустимого при установленном уровне значимости модели поля или коэффициент аномалийности, равный отношению площадей, не превышает значения уровня значимости. Однако в каждом конкретном случае возможны частные решения, обусловленные характером геологической задачи.

Улучшение степени приближения поверхности тренда к исходным данным при достаточно равномерной сети точек наблюдения достигается путем повышения степени аппроксимирующего полинома. Однако в случае неравно-

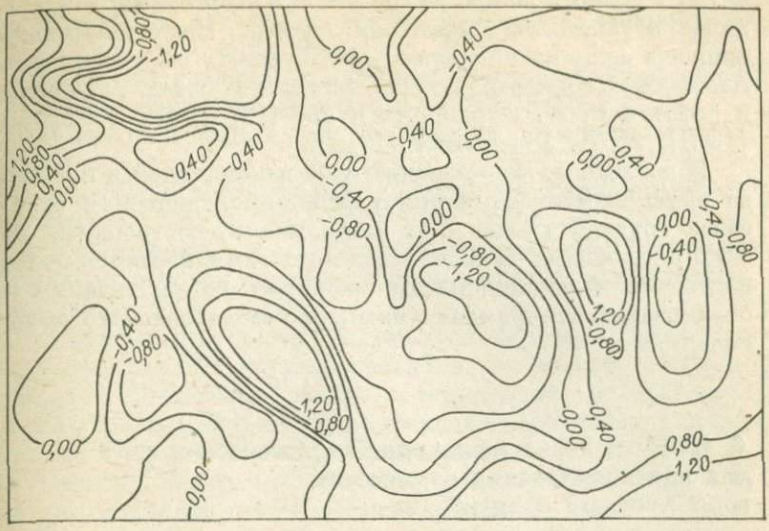
мерной сети для этой цели используются другие способы интерполяции: скользящим окном, гармоническими и сплайн-функциями и т. п., достаточно хорошо описанными в литературе.

На рис. 1 приведен пример крайгинг-интерполяции поля коэффициента пористости грунтов исследуемого участка, примененной нами для оптимальной оценки локальной компоненты поля, изображенной на карте остатка от тренд-поверхности второго порядка. При визуальном анализе приведенных карт обнаруживается определенное их «структурное» сходство, а формальная оценка качества крайгинг-интерполяции установила пригодность модели для пространственного прогноза коэффициента пористости.

Вопросы построения карт в изолиниях на ЭВМ имеют прямое отношение к методике инженерно-геологического опробования, особенно в рамках требований ГОСТ 20522—75 о необходимости установления аналитической зависимости характеристик грунтов от пространственных координат, так как никаких рекомендаций по методике проведения таких работ ГОСТ не содержит. Более того, поскольку вопросы изучения пространственной изменчивости физико-механических свойств грунтов являются одной из основных задач площадного опробования, особенно при крупномасштабных изысканиях для строительства, становится вполне естественным требование, чтобы методика инженерно-геологического опробования способствовала их успешному решению. В такой постановке вопроса задача оптимизации площадных изысканий тесно увязывается с построением карт в изолиниях инженерно-геологических параметров методом аппроксимации, с поиском оптимальных моделей геологических полей [Шешуков, 1978]. Другими словами, параметры системы опробования должны определяться с учетом возможности построения оптимальной модели поля того или иного показателя состава и свойств грунтов.

Определение параметров системы опробования обычно связывают с анализом частотного спектра одномерных функций геологических параметров в сечениях полей, а принцип оптимизации разведочной сети, основываясь на известной теореме Котельникова, трактуется следующим образом: функцию $Y = f(x)$ можно восстановить или аппроксимировать с заданной степенью приближения, если принять расстояние между точками измерения пара-

а



б

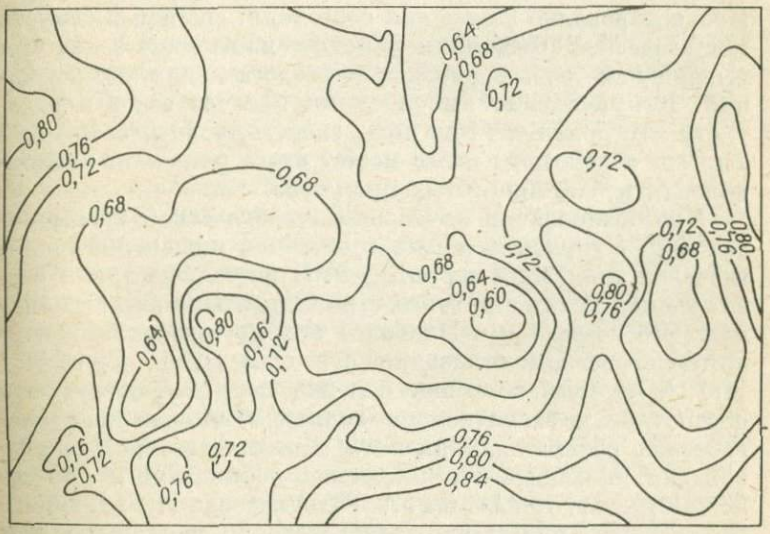


Рис. 1. Описание локальной компоненты поля коэффициента пористости грунтов способом крайгинг-интерполяции.

а — карта остатка от поверхности тренда второго порядка; *б* — прогнозная крайгинг-модель.

метра Y равным половине минимального значимого периода флуктуаций в его частотном спектре. Последовательно вопросы оптимизации сети горно-буровых выработок при площадных инженерно-геологических работах изложены в работах Г. К. Бондарика и др. [1976], Ж. Матерона [1968], А. А. Шешукова [1978].

И последнее. Изображение уже накопленной в процессе изысканий информации о физико-механических свойствах грунтов в виде карт в изолиниях, построенных на ЭВМ и хранимых на магнитных носителях, является более надежным и рациональным средством систематизации и организации материалов инженерно-геологического опробования.

§ 4. Составление инженерно-геологических карт для прогнозирования изменений геологической среды

Прогнозирование изменения состояния, состава и свойств геологической среды является одной из главных задач при выполнении любых инженерно-геологических исследований. Некачественно выполненный прогноз ведет к недоучету изменения тех или иных свойств геологической среды, что в конечном итоге может стать причиной возникновения неблагоприятных процессов.

Прогнозирование изменений геологической среды существенно упрощается при проведении инженерно-геологической типизации территории. В настоящее время еще нет единой трактовки этого термина, многие авторы понимают его по-разному. Наиболее точно сущность инженерно-геологической типизации отразили В. Т. Трофимов [1982], который понимает под ней «целенаправленную и обоснованную схематизацию знаний об инженерно-геологических обстановках данного объекта, сведения многообразия инженерно-геологических обстановок к определенному числу типов», и Г. А. Голодковская [1981], характеризующая инженерно-геологическую типизацию как «один из видов специального районирования, при котором выделяются территории с одинаковыми или схожими инженерно-геологическими условиями на всю мощность геологической среды».

При проведении инженерно-геологической типизации на каком-либо изучаемом объекте необходимо выполнение следующих действий [Трофимов, 1982]:

1) выбор классификационных признаков (факторов) и разграничение их по степени значимости;

2) выбор степени их нераздельности (шаг деления признака);

3) деление исследуемого объекта по принятым признакам;

4) построение итоговой классификационной схемы (схемы типизации инженерно-геологических условий (обстановок)).

В конечном итоге инженерно-геологическая типизация используется при крупномасштабном и детальном картировании. Выделение участков территорий, обладающих свойственными только им признаками, позволяет унифицировать методы изысканий, методику оценки и прогноза их инженерно-геологических условий, шире применять методы аналогий и т. д. [Ломтадзе, 1978].

В качестве примера рассмотрим проведенную инженерно-геологическую типизацию территории г. Усть-Илимска [Бровкин, 1981].

Анализ геологической среды и воздействующих на нее техногенных факторов показал, что для оценки инженерно-геологических условий объекта и степени его дальнейших изменений необходимо знать распространение в его пределах геолого-генетических комплексов пород, интенсивности проявившихся процессов выветривания, морфометрические характеристики, наличие неблагоприятных процессов и специфических грунтов, гидрогеологическую характеристику. Это и выбиралось в данном случае в качестве классификационных признаков (типообразующих факторов) и дополнялось сведениями о техногенных воздействиях. Оценивая степень значимости факторов, разграничиваем их следующим образом: природные факторы (признаки) подразделяются на две группы — основные и дополнительные (в зависимости от степени их влияния на общий характер оценки инженерно-геологических условий), по такому же принципу разделяются техногенные факторы — на площадные и линейные (табл. 1.1).

Определяя степень нераздельности факторов, исходят из следующего положения: переход какого-либо признака из одного в другой должен соответствовать изменению либо возникновению необходимости применения: а) раз-

Таблица 1.1

Схема типизации инженерно-геологических условий г. Усть-Илимска

Природные признаки

Основные						Дополнительные							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Геолого-генетические комплексы коренных пород	При мощности основного ГГК менее 15 м — Приграничные — нижележащий комплекс указывается соответствующим индексом справа внизу (например, III^{V})	Индекс	Геолого-генетические комплексы поверхностных отложений	Индекс	Интенсивность выветривания осадочных пород	Индекс	Преобладающие литологические разновидности (до глубины 5—6 м)	Индекс	Морфометрическая характеристика	Индекс	Глубина залегания уровня грунтовых вод (Н)	Индекс	Наличие неблагоприятных процессов и специфических грунтов
I. Элювиальные образования терригенно-осадочных пород карбона		А	Техногенные отложения (tQ)	I	Незначительная $K_{и.в} < 1{,}0$	1	Аллювий Глинистые грунты	а	Водоразделы и пологие склоны (до 5°)	А	Участки развития «верховодки» ($H = 0{,}5 \div 6{,}0$ м)	d	Осыпи, обвалы
		Б	Делювиальные отложения (dQ)	II	Умеренная $K_{и.в} = 1{,}0 \div 2{,}0$	2	Песчаные грунты					f	Оползни
II. Элювиальные образования терригенно-осадочных пород перми		В	Делювиально-аллювиальные отложения ($dQ - aN$) мощностью до 5 м	III	Значительная $K_{и.в} > 2{,}0$	3	Элювий Глинистые грунты	б	Склоны крутизной 5—15°	Б	$H < 10$ м	h	Болота
					Показатель интенсивности выветривания [Бровкин, 1982] $K_{и.в} = \Sigma(\gamma_{0т} - \gamma_{0i})H_i$, где $\gamma_{0т}$ — объемная масса пород трещинной зоны выветривания, г/см³; γ_{0i} — объемная масса пород i-й подзоны, г/см³; H_i — мощность i-й подзоны выветривания, м							i	Плывуны
III. Элювиальные образования вулканогенных осадочных пород триаса		Г	То же, мощностью до 10 м			4	Песчаники	в	Склоны крутизной более 15°	В	$H = 10 \div 20$ м	j	Термокарст
IV. Элювиальные образования траповых пород		Д	То же, мощностью более 10 м			5	Алевролиты и аргиллиты					k	Многолетнемерзлые грунты
IV^{1}. Основных пластовых тел		О	Неоген-четвертичные отложения отсутствуют			6	Туфы и туфопесчаники	г	Тальвеговые участки	Г	$H > 20$ м	q	Просадочные грунты
IV^{2}. Мелких секущих тел						7	Траппы сильно выветрелые					s	Угли
						8	Траппы выветрелые и слабо выветрелые						

Техногенные признаки

Площадные — П			Линейные — Л		
Характер сооружений	Индекс	Характер водопотребления	Индекс	Характер коммуникаций	Индекс	Водоносность коммуникаций
I. Производственные корпуса со значительными нагрузками на основания	1	Значительное водопотребление с агрессивным характером стоков	I	Подземные коммуникации	1	Агрессивный характер транспортируемых стоков
II. Административно-хозяйственные и жилые здания	2	Значительное водопотребление неагрессивных вод	II	Надземные коммуникации	2	Неагрессивные стоки и воды хозяйственно-питьевого назначения
III. Небольшие производственные здания	3	Умеренное водопотребление	III	Транспортные коммуникации	3	Безводные коммуникации

личных типов фундаментов; б) инженерной подготовки территории; в) степени потенциальной опасности возникновения и развития неблагоприятных процессов.

При делении объектов (инженерно-геологические условия г. Усть-Илимска) по принятым признакам в каждой группе факторов отмечаются только те, которые имеют большое значение в данном случае. Например, среди геолого-генетических комплексов не выделяются породы ярской свиты нижнего силура, которые развиты в данном районе, но практического значения при оценке инженерно-геологических условий не имеют.

Для построения итоговой схемы все выделенные признаки сводятся в единую таблицу, им присваиваются соответствующие индексы и определяется порядок индексации (см. табл. 1.1).

По окончании инженерно-геологической типизации, которая должна охватывать все наиболее существенные стороны рассматриваемого объекта, применяют ее на конкретных площадках для составления соответствующих карт. Основываясь на общих принципах построения инженерно-геологических карт и используя схему типизации, проводят разделение территории согласно выделенным признакам. На рис. 2 и 3 показаны фрагмент карты инженерно-геологической типизации территории проектируемого микрорайона № 6 г. Усть-Илимска и инженерно-геологический разрез.

Конечной таксономической единицей карты служит инженерно-геологический тип территории, т. е. участки территории, характеризующиеся свойственной только им природной обстановкой и способные претерпевать сходные изменения под действием техногенных факторов данного вида. Для всех выделенных инженерно-геологических типов (участков территории) проводится признаковая индексация. Индекс конкретного типа образуется составлением индексов типообразующих признаков в последовательности, определенной схемой инженерно-геологической типизации, причем индексы основных природных признаков выносятся вперед, дополнительные выписываются справа внизу, индексы техногенного воздействия выписываются справа вверху, например: ПБ$^{\text{п П З}}_{\text{I4 аГ}}$ (пунктирная рамка означает, что данное техногенное воздействие предполагается, но еще не действует). Сведение фак-

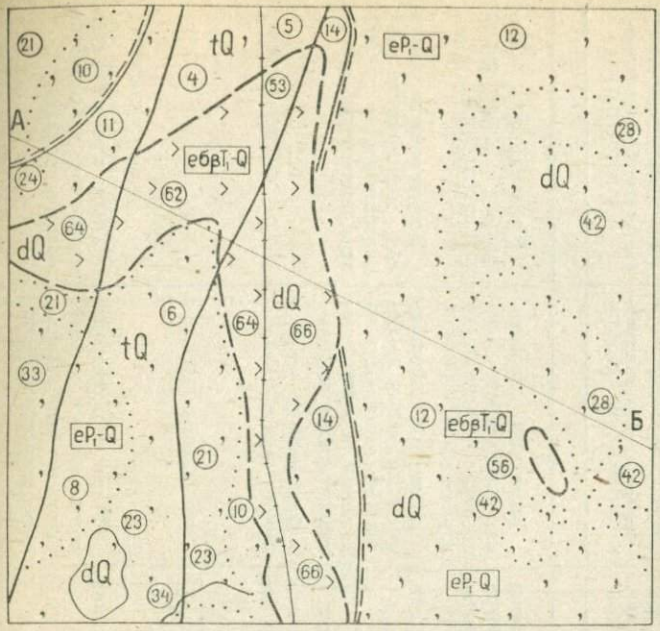


Рис. 2. Схема инженерно-геологической типизации территории проектируемого микрорайона (фрагмент).

1 — элювий пермских пород; *2* — элювий траппов; *3* — геологический индекс основных геолого-генетических комплексов (ГГК); *4* — индекс ГГК поверхности отложений; границы: *5* — основных ГГК; *6* — второго от поверхности основного ГГК при глубине залегания < 15 м; *7* — ГГК поверхностных отложений; *8* — интенсивности выветривания; *9* — морфометрических элементов; *10* — гидрогеологических элементов; *11* — номер инженерно-геологического типа; *12* — линия разреза.

торов техногенного воздействия к одному общему предполагаемому виду для проектируемых участков освоения вызвано тем, что в процессе разработки проекта возможны частые изменения генпланов, т. е. какое-либо здание в нашем случае может оказаться расположенным в любой части территории. Нетрудно заметить, что конечная индексация выполняется по принципу номерного кодирования [Огоноченко, 1981], что облегчает работу с картой.

При проведении признаковой индексации выполняется и первый этап прогнозирования — качественный прогноз, который осуществляется по методу аналогий. В частности, для участков распространения пластовых интрузий траппов, подстилаемых интенсивно выветрелыми осадочными породами, на крутых склонах возможно возник-

Таблица 1.2

Сводная таблица выделенных инженерно-геологических типов

(в качестве примера)

Номер типа	Индекс	Рекомендации по устройству фундаментов	Возможные осложнения в период строительства	Прогнозируемые инженерно-геологические процессы	Рекомендуемые инженерные мероприятия
1	2	3	4	5	6
4	$II_{IV^2}A^{nII3}_{I4aГ}$	Фундаменты на естественном основании либо сваи-стойки 3—4 м	Возможна замена насыпных грунтов либо их уплотнение	Возможно образование техногенного водоносного горизонта на диабазах	Предусмотреть защитные мероприятия от подтопления
5	$II_{IV^2}A^{nII3}_{I46Г}$	То же, что и для типа № 4	То же, что и для типа № 4	Возможны оползневые деформации по подошве техногенных отложений, а также указанное для типа № 4	Предусмотреть защитные мероприятия от подтопления, устройство подпорных стенок
6	$II\,A^{nII3}_{II4aГ}$	Фундаменты на естественном основании либо сваи-стойки длиной до 7 м	Частичная поломка свай, резкие перепады глубины погружения, значительные ручные доработки для вскрытия однородного основания	Практически отсутствуют	—
8	$II\,A^{nII3}_{III4aГ}$	Фундаменты на естественном основании либо бурозабивные сваи длиной более 7 м	Частичная поломка свай	Открытое техногенное подтопление и связанная с ним интенсификация процессов выветривания	Учесть в расчетах снижения несущих свойств грунтов оснований

10	$II\,Б\,\frac{пII\,3}{14аГ}$	Фундаменты на естественном основании	Практически отсутствуют	Практически отсутствуют	—
11	$II_{IV^2}Б\,\frac{пII\,3}{14аГS}$	То же, что и для типа № 10	То же	Интенсивное выветривание углей	Предусмотреть отсутствие углей в основании фундаментов
12	$II\,Б\,\frac{пII\,3}{14ВГ}$	То же, что и для типа № 10	Более значительные объемы вертикальной планировки	Практически отсутствуют	—
14	$II_{IV^2}Б\,\frac{пIIЗ}{14бГ}$	То же, что и для типа № 10	То же, что и для типа № 12	То же, что и для типа № 4	То же, что и для типа № 4
21	$IIБ\,\frac{пII\,3}{II\,4аГ}$	То же, что и для типа № 6	То же, что и для типа № 6	Практически отсутствуют	
23	$IIБ\,\frac{пII\,3}{II\,5аГ}$	То же, что и для типа № 6	То же, что и для типа № 6	Практически отсутствуют	—
24	$II_{IV^2}Б\,\frac{п\,II\,3}{II\,4аГ}$	То же, что и для типа № 6	То же, что и для типа № 6	То же, что и для типа № 4	Учесть в расчетах возможное воздействие слабой углекислой агрессии на бетонные конструкции, снижение несущей способности элювиальных грунтов
28	$IIБ\,\frac{пII\,3}{II\,4бГ}$	То же, что и для типа № 6	То же, что и для типа № 6, но более значительные объемы вертикальной планировки	Практически отсутствуют	Предусмотреть подпорные стенки при устройстве вертикальных откосов

Окончание табл. 1.2

1	2	3	4	5	6
33	$II Б^{пII\,3}_{III4аГ}$	То же, что и для типа № 8	Частичная поломка свай	Скрытое техногенное подтопление и связанная с ним интенсификация процессов выветривания	Учесть в расчетах снижения несущих свойств грунтов
34	$II Б^{п\,II3}_{III\,5аГ}$	То же, что и для типа № 8	Частичная поломка свай	То же, что и для типа № 33	То же, что и для типа № 33
42	$II_{IV^2}Б^{пII\,3}_{III4бБ}$	То же, что и для типа № 8	Частичная поломка свай	То же, что и для типа № 4	То же, что и для типа № 24
62	$IV^2А^{пII\,3}_{—8аГ}$	Фундаменты на естественном основании	То же, что и для типа № 4	Практически отсутствуют	—
63	$IV^2А^{п\,II\,3}_{—8бГ}$	То же, что и для типа № 62	Более значительны, чем для типа № 62, объемы вертикальной планировки	То же	—
64	$IV^2Б^{п\,II\,3}_{—8аГ}$	То же, что и для типа № 62	Практически отсутствуют	Практически отсутствуют	
66	$IV^2Б^{п\,II\,3}_{—8бБ}$	То же, что и для типа № 62	То же, что и для типа № 63	Практически отсутствуют	

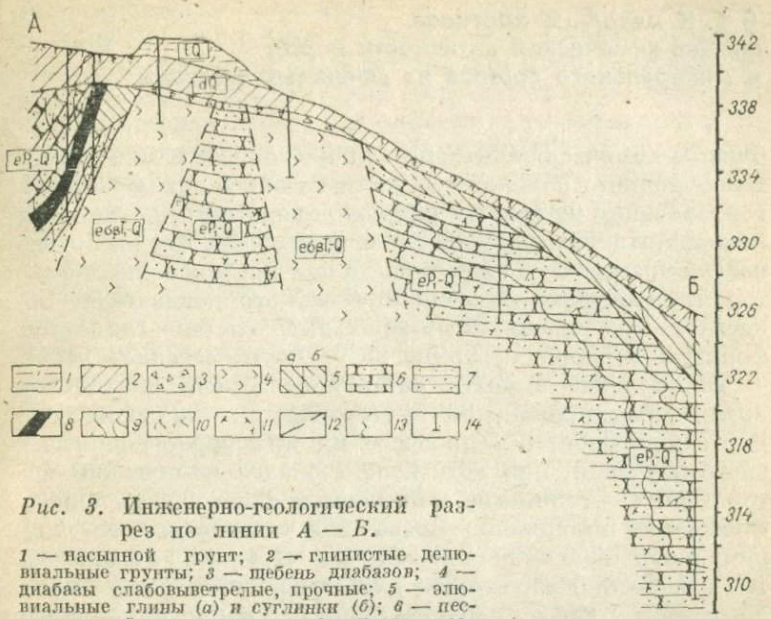


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез по линии *А — Б*.

1 — насыпной грунт; *2* — глинистые делювиальные грунты; *3* — щебень диабазов; *4* — диабазы слабовыветрелые, прочные; *5* — элювиальные глины (*а*) и суглинки (*б*); *6* — песчаники; *7* — алевролиты; *8* — уголь сажистый; *состояние скальных грунтов*: *9* — сильно выветрелые, весьма низкой прочности; *10* — выветрелые пониженной прочности; *11* — выветрелые средней прочности и малопрочные; *12* — генетические границы; *13* — литологические границы; *14* — скважины.

новение оползней выдавливания [Тржцинский и др., 1969]; на участках развития неогеновых террас, сложенных глинистыми грунтами, возможно развитие техногенного подтопления и т. п. После проведения индексаций каждому инженерно-геологическому типу присваивается порядковый номер и составляется сводная таблица, в которой отражаются возможные осложнения в процессе строительства, прогнозируемые неблагоприятные процессы и необходимость проведения инженерных мероприятий (табл. 1.2).

Конечным итогом работы с картой инженерно-геологической типизации является выполнение количественных прогнозов и назначение расчетных показателей физико-механических свойств грунтов.

§ 5. К методике прогноза физико-химической активности пород и минерального состава их глинистых фракций

Физико-химическая активность пород определяется характером ионного обмена, сущность которого заключается в сорбировании из водных растворов некоторых катионов и анионов. Наиболее изучен катионный обмен. Его интенсивность выражается в виде емкости обмена; к основным факторам, влияющим на величину данного показателя, относятся содержание и минеральный состав глинистой фракции в породах [Грим, 1959; Грунтоведение, 1971].

Определение емкости катионного обмена длительное время проводилось для четвертичных отложений юга Восточной Сибири в процессе их инженерно-геологического изучения, при этом использовался химический метод Бобко — Аскинази [Методическое пособие..., 1968]. Обобщение материалов позволило установить, что минимальная обменная способность (1,3—3,5 мг·экв на 100 г вещества) характерна для отложений ледового типа литогенеза, далее следуют породы перигляциального (17 мг·экв) и гумидного доледникового (23 мг·экв) типов; отложения гумидного послеледникового типа отличаются значительными колебаниями емкости обмена (14—27 мг·экв). Рассматриваемый признак относится только к глинистым и лессовым отложениям, пески практически не обладают обменной способностью, за исключением «связных» разновидностей.

Поскольку емкость обмена входила в комплекс показателей, характеризующих состав, состояние и свойства пород, мы могли проанализировать и количественно оценить ее взаимосвязи. С помощью расчетов по программам корреляционно-регрессионного и кластерного анализов установлена ведущая группировка признаков, наиболее тесно связанных друг с другом, — содержание глинистой фракции (по данным дисперсного гранулометрического анализа), коэффициент микроагрегатности, число пластичности и емкость обмена [Рященко, 1980а, б]. Емкость обмена в составе этой группировки непосредственно связана с коэффициентом микроагрегатности (коэффициент корреляции 0,53) и содержанием глинистого вещества (коэффициент корреляции 0,10—0,23). Относительно слабая связь с содержанием глинистой фракции объясняется

дополнительным влиянием ее минерального состава. В каждом конкретном случае одновременное действие этих двух факторов вызывает тот или иной конечный результат. Подобную ситуацию хорошо отражает табл. 1.3.

Максимальное значение емкости отмечается при повышенном содержании глинистой фракции (40%) и монтмориллонитовом ее составе. Если фракция имеет монтмориллонитовый состав, но ее содержание в породе не превышает 17%, физико-химическая активность образца составляет всего 10—14 мг·экв. При отсутствии монтмориллонита значения емкости обмена не могут быть выше 7,5—14 мг·экв при содержании фракции 22,8—30%. Полиминеральный состав глинистой фракции практически не влияет на величину физико-химической активности пород. Здесь контролирующим фактором является количество глинистого вещества. Кроме того, данные табл. 1.3 показывают, что прогноз физико-химической активности пород возможен только по результатам дисперсного гранулометрического анализа, которые отражают реальное содержание глинистого материала в исследуемом образце.

Возможность косвенной оценки физико-химической активности пород по количественному содержанию и минеральному составу их глинистых фракций зависит от типа отложений и особенностей их формирования. Например, для лессовых пород верхнего делювиального горизонта (dQ_{III}) с относительно высоким содержанием глинистой фракции (25—35%) преобладание монтмориллонита или разбухающего хлорита хорошо контролирует величину емкости обмена (табл. 1.4). Лессовые отложения отличаются высокой степенью агрегированности (коэффициент микроагрегатности 20—25%), причем агрегаты являются неводостойкими, состоят из глинистых частиц, которые и определяют повышенные значения емкости обмена при соответствующем минеральном составе. В то же время красновато-коричневые озерные глины неогена МНР, содержащие до 35—50% глинистых фракций преимущественно монтмориллонитового состава, имеют обменную способность 7—21 мг·экв. Пониженная физико-химическая активность этих глин, по всей вероятности, связана с их агрегативной структурой, так как, в отличие от лессовых отложений, агрегаты в глинах являются прочными структурными элементами (образованы за счет аморфного кремнезема, железистых карбонатов и полуторных окислов). При инженерно-геологической оценке

Таблица 1.3

Емкость обмена лессовых пород, содержание и минеральный состав их глинистых фракций

$E_{об}$	$M_{сд}$	$M_с$	Минералы глинистой фракции
35,3	40,0	12,0	М
11,5	30,0	8,9	Гс, К
14,0	25,7	6,3	Гс, Х
7,5	25,0	4,9	Гс, К
10,3	22,8	10,6	Гс
9,8	16,9	7,5	М, кв
14,3	16,2	2,3	М, кв
25,9	34,7	10,7	М, Гс, К
30,6	23,8	10,7	М, Гс, К
12,4	13,4	7,7	М, Гс, К

Примечание. Здесь и в табл. 1.4 $E_{об}$ — емкость катионного обмена породы, мг·экв на 100 г вещества; $M_{сд}$ — содержание глинистой фракции по данным дисперсного гранулометрического анализа, %; $M_с$ — то же, по данным стандартного (полудисперсного) гранулометрического анализа; М — монтмориллонит; Гс — гидрослюда; К — каолинит; Х — хлорит; кв — кварц.

грунтов емкость обмена относится к числу косвенных критериев проявления ряда физико-механических свойств (пластичности, набухаемости, сцепления, просадочности). Использование этого показателя для определения преобладающих глинистых минералов в исследуемой породе, как показали приведенные материалы, оказалось весьма затруднительным. Поэтому после массовых исследований

Таблица 1.4

Группирование образцов лессовых пород по величине емкости обмена

Группа	Емкость обмена, мг·экв на 100 г вещества	$M_{сд}$	Общее количество образцов	Количество образцов с преобладанием в глинистой фракции монтмориллонита или разбухающего хлорита, %
I	Более 30	35	10	90
II	30—24	31	8	50
III	23,9—20	30	7	30
IV	19,9—15	26	20	40
V	14,9—10	25	17	16
VI	Менее 10	25	2	0

большого количества образцов пород мы перешли к изучению обменной способности глинистых (менее 0,001 мм) фракций с целью выхода на полуколичественный прогноз их минерального состава.

Методика исследований заключалась в следующем. Глинистые фракции выделялись методом отмучивания, затем проводился их рентгенометрический анализ. На параллельных пробах выполнялись измерения емкости обмена с помощью нефелометра-колориметра с использованием красителя метиленового голубого [Методические рекомендации..., 1977]. Всего исследовано 140 фракций различных пород из зон влияния Богучанского и Среднеенисейского водохранилищ, а также некоторых районов МНР. Это были лессовые отложения аллювиального и делювиального верхнечетвертичного комплексов, глинистые образования среднечетвертичного аллювия, глины и алевролиты озерно-аллювиального палеогенового комплекса, глины и аргиллиты карбона, глинистый заполнитель экзотических галечников верхнего мезозоя (Богучаны, Средний Енисей), красновато-коричневые глины озерного комплекса неогена, аргиллиты и алевролиты неогена, лессовидные супеси верхнечетвертичного аллювиального комплекса, глинистый заполнитель крупнообломочных аллювиально-пролювиальных толщ неогена (МНР). Предварительно были произведены замеры на эталонных образцах: гидрослюдистая глинистая фракция имела емкость обмена 10,1 мг·экв на 100 г вещества, монтмориллонитовая — 50,2.

Для расчетов использовалась выборка из 107 фракций. Выделено и закодировано восемь групп: 1 — фракции монтмориллонитового состава; 2 — гидрослюдистого; 3 — каолинитового; 4 — с содержанием монтмориллонита более 30—50%; 5 — с преобладанием смешанослойных минералов типа монтмориллонит-хлорит; 6 — монтмориллонит отсутствует, фракция полиминеральна: гидрослюды, каолинит, хлорит; 7—фракция полиминеральна, монтмориллонит присутствует в количестве 10—20%; 8 — с преобладанием хлорита и гидрослюд, примесь каолинита. Для каждой группы соответственно устанавливались пределы изменения величин емкости катионного обмена. Полученные результаты представлены в табл. 1.5. Она может быть использована в качестве прогнозной для предварительной полуколичественной оценки минерального состава глинистых фракций осадочных пород.

Таблица 1.5

Группирование образцов осадочных пород по минеральному составу и емкости катионного обмена их глинистых фракций

Номер группы	Количество образцов	Характеристика минерального состава глинистой фракции (по данным рентгенометрического анализа)	Пределы изменения емкости катионного обмена, мг·экв на 100 г вещества
1	6	Монтмориллонитовая, возможны незначительные примеси	32—60
4	56	Преобладает монтмориллонит (более 30—50%)	27—55
5	12	Преобладают смешанослойные минералы типа монтмориллонит-хлорит	22—43
7	4	Полиминеральная фракция, присутствует монтмориллонит (10—20%)	12—25
3	4	Каолинитовая, возможны незначительные примеси	4—13
2	11	Гидрослюдистая, возможны незначительные примеси	7—19
6	3	Полиминеральная без монтмориллонита	8—17
8	11	Полиминеральная без монтмориллонита, но с повышенным (до 30%) содержанием хлорита	20—37

На основании приведенных материалов можно сделать следующие выводы: 1) при увеличении содержания монтмориллонита от 10 до 100% емкость обмена фракции возрастает от 12 до 60 мг·экв; 2) фракциям с преобладанием монтмориллонита соответствует емкость обмена 27—60 мг·экв; 3) полиминеральные фракции, в составе которых присутствует монтмориллонит (10—20%), имеют емкость 12—25 мг·экв; 4) полиминеральным фракциям без монтмориллонита соответствует емкость обмена 8—17 мг·экв; 5) мономинеральные гидрослюдистые фракции, а также повышенное содержание хлорита либо смешанослойных минералов во фракции индексировать однозначно по емкости обмена не представляется возможным; 6) мономинеральные каолинитовые фракции характеризуются минимальными значениями емкости катионного обмена.

Данные по емкости обмена породы сопоставлены с данными по ее глинистой фракции (табл. 1.6). Установлено,

Таблица 1.6

Емкость обмена пород и их глинистых фракций

Лессовые отложения ($dQ_{III}+dQ_{III}$) зоны влияния Усть-Илимского водохранилища		Песчаные глины (aQ_I+a-pN) некоторых районов МНР	
$E_{об}$	$E'_{об}$	$E_{об}$	$E'_{об}$
17,3	42,0	16,0	33,8
10,3	32,5	11,8	24,6
11,8	44,9	17,9	30,8
19,8	41,6	17,0	55,4
12,0	27,4	18,9	46,2
16,5	31,6	20,9	43,1
10,6	39,8	20,0	43,9

Примечание. $E_{об}$ — емкость обмена породы, мг·экв на 100 г вещества; $E'_{об}$ — то же, глинистой (менее 0,001 мм) фракции.

что для фракции наблюдается закономерное увеличение емкости в 2—4 раза, однако прямо пропорциональной зависимости здесь нет, так как при анализе физико-химической активности фракции исключается влияние ее количества.

Таким образом, при прогнозе физико-химической активности отложений можно идти двумя путями. Емкость катионного обмена породы отражает особенности структуры (количество глинистых фракций, их минеральный состав, степень агрегатизации, состав агрегатов, их прочность) и физико-механических свойств, является классификационным показателем для различных геолого-генетических комплексов и литологических групп осадочных образований, входит в состав ведущей группировки признаков литогенеза отложений; ее определения необходимы при комплексной инженерно-геологической оценке пород. Емкость катионного обмена глинистой фракции в породе является более узким показателем, непосредственно связанным с минералогией, поэтому ее определения можно использовать для предварительной прогнозной полуколичественной оценки состава глинистых минералов (см. табл. 1.5).

Общая методическая схема исследований физико-химической активности осадочных пород может быть представ-

лена следующим образом. На первом этапе из общей группировки образцов с объекта инженерно-геологических изысканий выделяются «связные» (облессованные) пески, супеси, суглинки, глины, лессовые отложения, алевролиты, аргиллиты, песчаники на глинистом цементе, глинистый заполнитель крупнообломочных образований и т. д.; для этих отложений определяются емкости катионного обмена методом Бобко — Аскинази; рассчитываются классификационные значения емкости для комплексов и групп пород; производятся расчеты по количественной оценке взаимосвязей емкости с различными показателями пород; выявляются региональные особенности исследованных отложений в отношении их физико-химической активности. На втором этапе из исследованных образцов методом отмучивания выделяется глинистая фракция, для которой также определяется емкость катионного обмена на нефелометре-колориметре; далее с помощью прогнозной таблицы предварительно устанавливается состав глинистых минералов. На третьем этапе необходимо выборочно провести рентгенометрический анализ выделенных глинистых фракций для целей контроля и уточнения состава минералов в образцах второй (фракция преимущественно гидрослюдистая), пятой (преобладают смешанослойные минералы типа монтмориллонит-хлорит) и восьмой (повышенное содержание хлорита) групп прогнозной таблицы.

§ 6. Инженерно-геологические исследования трасс подземных магистралей связи и прогноз процессов морозного пучения

Подземные кабельные магистрали связи являются особым типом линейных сооружений и прокладываются в основном в пределах зоны деятельного слоя, т. е. активного тепло- и массообмена горных пород, для которой характерны переменные температурный и влажностный режимы, резкая смена физического состояния пород, изменение их физико-механических и тепловых свойств, а также интенсивное развитие мерзлотных геологических процессов и явлений.

Специальные исследования на трассах действующих подземных магистралей связи в Забайкалье показали,

что работы по их строительству приводят к изменению инженерно-геологических условий территории и вызывают возникновение и активизацию мерзлотных геологических процессов, и в первую очередь процессов морозного пучения. Так, вырубка просеки для трассы и нарушение почвенно-растительного покрова при прокладке подземного кабеля ведут к изменению его теплопоглощающей способности и теплоизоляционных свойств, что вызывает нарушение естественного теплообмена между атмосферой и породами. На участках местности с неглубоким залеганием поверхности высокольдистых многолетнемерзлых пород это приводит к образованию западин, просадок, ложбин и изменению поверхности рельефа трассы. Днища западин заболачиваются, что приводит к более активному увлажнению пород деятельного слоя на трассе и вызывает интенсивное пучинообразование при их промерзании. На отдельных участках, расположенных на склонах, трасса является коллектором поверхностных вод. В ряде случаев, когда траншеи пересекают грунтовые потоки, непосредственно на трассе наблюдаются выходы подземных вод в виде источников. Это обусловливает заболачивание трасс, увлажнение пород деятельного слоя и, как следствие, активизацию проявления процессов морозного пучения. В пределах маревых участков, сложенных пылеватыми глинистыми породами, выделяются участки более интенсивного пучения. Образование пучин здесь вызвано недоуплотнением пород в траншеях и котлованах после прокладки в них кабеля и муфтовых соединений, изменением плотности их сложения и неравномерным увеличением влажности. Под действием процессов морозного пучения конструкции подземной магистрали связи претерпевают деформации и перемещения и выходят из строя значительно раньше положенного срока, вызывают дополнительные непроизводительные затраты труда, материалов и финансовых средств.

Все это требует детального изучения процессов морозного пучения, районов их распространения, возможности развития и активизации при планировании различных видов строительства, оценки устойчивости существующих, проектируемых и строящихся сооружений и хозяйственном использовании территорий.

Существующие методические указания по производству инженерно-геологических изысканий для строительства подземных магистралей связи, по существу, не со-

Принципиальная схема оценки и прогноза *явлений морозного пучения при инженерно-геологических исследованиях трасс подземных магистралей связи*

Таблица 1.7

Стадия проектирования	Содержание стадии	Этап изысканий	Вид исследования	Задачи исследования	Методы оценки и прогноза
Технический проект (ТП)	Выбор варианта трассы	1. Предполевой	Сбор, анализ и обобщение фондовых и литературных источников; дешифрирование аэрофотоснимков	Качественная оценка морозного пучения в районе исследований; выбор предварительных вариантов трассы	Определение пучинистости пород по классификационным таблицам, формулам, номограммам
	Обоснование технического проекта	2. Предварительный	Инженерно-геологическая съемка масштаба 1 : 50 000 ÷ ÷ 1 : 100000	Определение влияния природных факторов на интенсивность развития морозного пучения; количественная оценка пучинистости пород и величины пучения	Составление схемы инженерно-геологической типизации; расчет пучения аналитическими методами
		3. Детальный	Инженерно-геологическая съемка масштаба 1 : 10 000 ÷ ÷ 1 : 25 000; оборудование опытных участков; проведение режимных наблюдений	Определение неблагоприятных участков для строительства; количественная оценка изменения характеристик пучения при принятом способе прокладки кабеля; составление рекомендаций по защите магистралей связи от процессов морозного пучения	Уточнение инженерно-геологической типизации; расчеты аналитическими методами; режимные наблюдения
Рабочие чертежи (РЧ)	Уточнение и детализация проектных решений	Дополнительный	Инженерно-геологическая съемка масштаба 1 : 2000 ÷ ÷ 1 : 5 000; режимные наблюдения; опытные и экспериментальные работы	Уточнение использованных зависимостей, рабочих схем и расчетных параметров; уточнение видов и объемов защитных инженерных мероприятий	Режимные наблюдения; расчеты аналитическими методами; лабораторное моделирование

держат достаточно обоснованных характеристик и рекомендаций по изучению процессов морозного пучения и их прогнозу. Поэтому ниже мы коротко остановимся на основных методических положениях инженерно-геологических исследований при проектировании трасс подземных магистралей связи с учетом изучения и прогноза этих процессов.

Проектирование подземных магистральных линий связей, как и всех других линейных сооружений, выполняется в два этапа: на первом составляется технический проект трассы, на втором — рабочие чертежи. При изыскании для технического проекта вначале производится выбор

трассы (предварительные исследования), а затем — изыскания на выбранном варианте (детальные).

При разработке рабочих чертежей (с целью получения некоторых дополнительных данных и уточнений, полученных при детальных изысканиях) проводятся дополнительные исследования. Задачи и методы оценки и прогноз процессов морозного пучения на этих стадиях существенно различаются (табл. 1.7).

Выбор варианта трассы кабельной магистрали связи рассматривается как одна из основных проблем. На этом этапе дается качественная оценка процессов морозного пучения в районе исследований. Основой для нее служат

литературные источники и фондовые материалы ранее проведенных изысканий и исследований. Здесь наряду с решением общих вопросов, требующимися нормативными документами и методической литературой определяются участки распространения пучин и степень пучинистости пород по существующим таблицам и номограммам [Орлов и др., 1977; Чистотинов, Невечеря, 1975; и др.]. Большая роль в этих работах отводится предполевому дешифрированию аэрофотоснимков по намеченным вариантам трассы. На основании полученных данных выбираются более оптимальные варианты.

Оценка вариантов трассы, выбор лучшего и изучение его инженерно-геологических условий проводится в период выполнения предварительных и детальных исследований. Прежде всего в пределах перспективной зоны прокладки подземной магистрали связи производится инженерно-геологическая съемка масштаба 1 : 50 000 — 1 : 100 000, основной задачей которой является изучение инженерно-геологических условий намеченных вариантов трассы. По результатам съемочных работ определяют природные условия, влияющие на развитие морозного пучения, и проводят инженерно-геологическую типизацию трасс. Основные положения и принципы такой типизации рассмотрены в работах В. Д. Ломтадзе [1978] и др.

Под инженерно-геологической типизацией в данном случае понимается выделение и оценка участков по главным, наиболее существенным признакам, позволяющим сгруппировать их по сходным условиям процессов пучинообразования. Каждая такая группа участков характеризуется определенными особенностями инженерно-геологических условий, которые можно отразить на геологическом разрезе, схеме и которые в совокупности отражают основные черты их строения и факторы, обусловливающие возникновение и интенсивность развития морозного пучения. К ним относятся: а) петрографический состав пород деятельного слоя, их сложение, водные и физические свойства; б) характер рельефа, определяющий условия увлажнения промерзающих пород; в) глубина залегания уровней верховодки и грунтовых вод и г) скорость и глубина промерзания пород деятельного слоя и характер мерзлоты (сливающаяся или несливающаяся).

Все факторы по степени оценки процессов пучинообразования подразделяются на две группы. Первая включает факторы, которые можно охарактеризовать количествен-

но и непосредственно использовать в инженерных расчетах (температура горных пород, гранулометрический состав отложений деятельного слоя, их физические и водные свойства); вторая — факторы, используемые в основном при качественной инженерно-геологической оценке вследствие их значительной изменчивости даже на небольших расстояниях (крутизна и экспозиция склонов, характер растительности и степень заболоченности, мощность и плотность снежного покрова и др.). Эти две группы тесно взаимосвязаны и оказывают суммарное влияние на проявление и интенсивность развития морозного пучения.

С помощью аналитических методов дается количественная оценка процессов морозного пучения и пучинистости пород деятельного слоя на выделенных типовых участках. Применимость тех или иных методов расчета обосновывается исходными материалами, полученными при изысканиях, возможностями и условиями их использования.

Таким образом, на этом этапе исследований должны быть определены основные тенденции развития процессов морозного пучения, площадное распространение пучин и дана их количественная оценка.

При детальном изучении выбранного варианта трассы одновременно с проведением съемочных работ более крупного масштаба выбирают типовые участки, на которых оборудуются опытные площадки для наблюдения за температурным и влажностным режимом пород деятельного слоя, динамикой их промерзания, за величиной пучения и осадки в естественных условиях. Устройство площадок, применяемые для опытов приборы и оборудование, вопросы методики режимных наблюдений достаточно полно освещены в методической литературе. При проведении исследований уточняются границы выделенных типов местности, в пределах которых выявляют частные и общие закономерности формирования состава, строения и свойств пород деятельного слоя, их температуры и влажности, мощности слоя сезонного промерзания и оттаивания, а также закономерности проявления процессов пучения. Если проведение изысканий возможно в течение года и более длительного времени для характеристики интенсивности проявления процессов морозного пучения используются данные режимных наблюдений. Кроме того, на данной стадии составляют прогноз изменений пучинообразования и дают его количественную оценку с учетом принятого способа прокладки подземной магистрали. При

этом особое внимание уделяется вероятным техногенным изменениям состава, строения, плотности сложения и свойств пород деятельного слоя, глубины сезонного промерзания и оттаивания и условий их увлажнения.

Таким образом, при составлении технического проекта уточняется расположение подземной магистрали связи в пределах выбранного оптимального варианта, определяется глубина заложения кабеля и муфтовых соединений, их типы, конструкция и параметры, компоновка, способы прокладки, стоимость, сроки строительства и условия эксплуатации. На этой стадии обосновываются все противопучинные мероприятия, обеспечивающие полную устойчивость, долговечность подземной магистрали связи и безопасность ее эксплуатации.

На второй стадии проектирования — стадии рабочих чертежей — производится плановая и высотная привязка трассы на местности, учитываются детали природных условий и отдельных технических решений. Оценка и прогноз морозного пучения дается с целью детализации проектных решений, видов и объемов противопучинных мероприятий, которые могут повлиять на устойчивость сооружения, организацию производства строительных работ и др. На участках, неблагоприятных в строительном отношении, проводят детальные инженерно-геологические съемки и режимные наблюдения.

В ходе разработки рабочих чертежей кабельной магистрали связи проверяется сделанный ранее прогноз, корректируются виды и объемы защитных мероприятий. Основой такой проверки служат режимные наблюдения на опытных площадках, материалы дополнительного обследования отдельных пучинистых участков и результаты лабораторного моделирования процессов морозного пучения. Применение последних позволяет резко сократить сроки изысканий и их стоимость.

Таким образом, исследования процессов морозного пучения и их прогноз при проведении инженерно-геологических изысканий трасс подземных магистралей линий связи должны быть всегда комплексными, т. е. включать изучение климатических и мерзлотных условий, рельефа местности, геологического строения и гидрогеологической характеристики, состава, строения и физических свойств горных пород и геологических явлений, сопутствующих пучению. Для решения поставленных задач необходимо предусматривать проведение инженерно-

геологических съемок, разведочных (горных, буровых и геофизических) работ, стационарных режимных наблюдений, лабораторных исследований, моделирование, систематизация, обработка и анализ материалов исследований и составление заключения о необходимом комплексе противопучинных мероприятий на трассе.

Глава 2

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ИХ ПРОГНОЗА

§ 1. Сейсмотектоника Байкальской рифтовой зоны как основа прогноза экзогенных геологических процессов

В настоящее время начинается интенсивное освоение территории Байкальской рифтовой зоны, особенно ее северо-восточной части. Здесь ведется сооружение Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, создаются комплексные промышленные узлы, предприятия деревообрабатывающей и горно-добывающей промышленности, города и поселки. При размещении этих объектов необходим учет опасных эндогенных и экзогенных геологических процессов. Решение проблемы прогноза развития последних (под прогнозом мы понимаем знание о состоянии, поведении и изменении природной среды) в значительной степени зависит от сейсмотектонических условий региона.

Сложность естественных условий Байкальского рифта состоит в своеобразии геолого-геоморфологического строения и повышенной тектонической подвижности земной коры. Морфоструктурный анализ современного рельефа показывает, что древние складчатые сооружения претерпели значительные изменения в результате тектогенеза, начавшегося во второй половине неогена и активно проявлявшегося на протяжении четвертичного периода. В современную эпоху тектоническая жизнь Байкальской рифтовой зоны продолжает оставаться активной [Флоренсов,

1960], что в свою очередь определяет активность развития экзогенных процессов. Здесь по-прежнему наблюдаются интенсивные блоковые движения, сопровождающиеся сочетанием пластических и разрывных деформаций. Система активизированных разломов, развитая в верхнем и среднем течении рек Хани, Чары, Сюльбана, Муякана, Ангаракана, Гоуджекита и Кунермы, отчетливо выражена в рельефе в виде разновеликих морфологических уступов, цепей линейных седловин на водоразделах, асимметричных рвов, полузатянутых делювием, и зон повышенной трещиноватости в кристаллических породах.

Тектоническое развитие Байкальского рифта сопровождается образованием мощных зон дробления коренной основы и формированием грубо рассланцованных пород — тектонитов, милонитов, катаклазитов, брекчий. Разрушаясь, эти породы образуют на склонах гор многокилометровые скопления рыхлообломочного материала различных фракций — от мелких глинистых и песчаных частиц, легко транспортируемых склоновыми потоками, до обломков и глыб крупных размеров. Как правило, разрывные дислокации различного возраста и характера (глубинные, региональные, локальные) играют весьма важную роль в развитии экзогенных геологических процессов: обвалов, оползней, сплывов, лавин, селей, наледей, болот и др.

Важнейшей особенностью тектонического развития рассматриваемой территории является интенсификация разнонаправленных движений в современную эпоху. Происходит дальнейшее увеличение скорости опускания межгорных впадин и поднятие обрамляющих их хребтов, обусловливающие возрастание энергии рельефа и интенсивность проявления экзодинамических процессов. К числу новейших крупных отрицательных морфоструктур, сформированных в необайкальский тектонический этап активизации, относятся Чарская, Муйская, Верхнеангарская, Байкальская, Баргузинская и Тункинская впадины. Кроме того, здесь имеется ряд эмбриональных впадин, таких как Сюльбанская, Читкандинская, Ханийская, Имангра-Чебаркасская и др., к которым приурочены эпицентры сильных землетрясений. В Чарской впадине, по данным В. В. Николаева и С. Д. Хилько [1971], градиент неотектонических движений равен $1{,}4 \cdot 10^{-8}$ год$^{-1}$, а в Приолекминской части Читкинда-Ханийского разлома градиент скорости вертикальных движений составляет $1{,}6 \cdot 10^{-9}$ год$^{-1}$.

В целом тектоническое развитие Байкальской рифтовой зоны не только создало в прошлом благоприятную обстановку для формирования и широкого распространения экзогенных процессов, но и определило прогрессирующую направленность условий процессообразования в настоящем и будущем. Приуроченность процессов к активным геоструктурам очевидна и зависит от частоты движений в современный период. Величина и плотность сейсмодислокаций на единицу площади находится в прямой зависимости от степени тектонической активности. А в сочетании с другими процессоформирующими агентами природы все это приводит к концентрации развития экзогенных геологических процессов на участках с высокой плотностью и большой величиной различных дислокаций.

Таким образом, учитывая сейсмическую активность региона, возможны оценка и прогноз степени пораженности территории экзогенными геологическими процессами и интенсивности последних.

О высоком сейсмическом потенциале Монголо-Байкальского сейсмического пояса говорят данные о сильных землетрясениях, произошедших за последние 20 лет в зоне развития Байкальского рифта. Так, в эпицентре Муйского землетрясения 4 ноября 1957 г. были зарегистрированы толчки интенсивностью 10 баллов, $M = 7{,}9$; Нюкжинского 5 января 1958 г.— 9 баллов, $M = 6{,}5$; Олекминского 14 сентября 1958 г.— 9 баллов, $M = 6{,}5$; Муяканского 11 ноября 1962 г.— 8 баллов, $M = 6{,}5$; Тасс-Юряхского 5 января 1967 г.— 9 баллов, $M = 7{,}0$; Уоянского 2 ноября 1976 г.— 7 баллов, $M = 5{,}2$ и т. д. [Живая тектоника..., 1966].

Ежегодно здесь регистрируется более 1000 сейсмических толчков различной интенсивности. На участке от р. Олекмы до оз. Байкал за 1000 лет землетрясения силой 8 баллов повторялись 250 раз, 9 баллов — 100, 10 баллов — 30, 11—12 баллов — 12 раз [Солоненко, 1979]. Такая высокая сейсмичность неизбежно служит причиной ряда геодинамических процессов, в том числе формирования потенциальных запасов твердой фазы селевых потоков за счет эндокинетических (сейсмогенных) обвалов, смещений осыпей, оползней и сплывов, объем и место проявления которых, таким образом, можно предсказать.

Однако устойчивость горных массивов зависит не только от силы землетрясения, но и определяется морфологией склонов, их положением по отношению к подходу

сейсмической волны, увлажненностью и выветрелостью грунтов, а также криогенными особенностями. Весьма показателен в этом плане пример Аляскинской железной дороги, которая оказалась на одну четверть (200 км из 690) разрушенной в результате 7—9-балльного землетрясения 1964 г. При этом существенный урон сооружению был нанесен не самим землетрясением, а спровоцированными им процессами, связанными прежде всего с мерзлотными явлениями. Как отмечается в ряде работ, движение сильно увлажненного рыхлообломочного материала на склонах может начаться и при сравнительно слабых землетрясениях силой 4—5 баллов [Флоренсов, 1960; Солоненко, 1960, 1963].

Говоря о сейсмичности Байкальской рифтовой зоны в целом, следует выделить районы повышенной сейсмической активности, которые с инженерно-геологической точки зрения характеризуются повышенной пораженностью экзодинамическими процессами. Это прежде всего межвпадинные горные перемычки, причем районы перемычек являются узлами сочленений разнонаправленных разрывных нарушений, создавших сложное блоковое строение земной коры. Постоянные, часто повторяющиеся сотрясения отдельных участков перемычек провоцируют возникновение на первый взгляд неожиданных явлений. Например, во время сейсмических наблюдений 1967 г. в районе оз. Бол. Леприндо (Чара-Муйская перемычка) было зарегистрировано 85 землетрясений силой до 7 баллов. Постоянное сотрясение мерзлых высокольдистых отложений вызвало внезапное развитие термокарста. Образовался тремокарстовый лог длиной 650 м, шириной 10—15 и глубиной до 6 м. Одновременно с просадкой на бортах лога произошли солифлюкционные сплывы.

Кроме межвпадинных перемычек и эмбриональных впадин, высокая сейсмичность (9 баллов и более) свойственна краевым частям впадин, особенно с рифтовыми разломами, и центральным частям сводово-блоковых морфоструктур [Солоненко, 1981]. Так, в 1967 г. на южном склоне Верхнеангарской впадины произошло 370 землетрясений силой до 7 баллов. Сами рифтовые впадины по сравнению с их прибортовыми частями характеризуются пониженным сейсмическим потенциалом. В их формировании особое значение имели и имеют пластические деформации земной коры. Однако и здесь возможны землетрясения интенсивностью 8 баллов.

Учитывая большую частоту слабых землетрясений, наличие вечной мерзлоты, а также значительное количество атмосферных осадков, можно предположить, что явления осыпания, оползания, обваливания и проседания рыхлых склоновых отложений в эпицентральных районах Байкальской рифтовой зоны и в дальнейшем будут распространены очень широко. Уже сейчас во многих местах Верхнеангарского, Северо- и Южно-Муйского, Кодарского, Удоканского и некоторых других хребтов имеются хорошо сохранившиеся разновозрастные обрушения солифлюкционных террас, делювиальных накоплений и коренных пород, которые выражены в рельефе различными по форме и по фракционному составу конусами. Одновременное массовое проявление деформаций склонов в тех или иных районах, по данным дендрохронологического анализа, указывает на их сейсмогенное происхождение.

Как правило, катастрофические землетрясения сопровождаются значительными нарушениями горных склонов, на которых появляются крупные сейсмотектонические трещины, рвы отседания и т. п. Наиболее мощные остаточные деформации земной коры здесь представлены сейсмотектоническими трещинами с вертикальными смещениями и сбрососдвигами [Солоненко, 1980]. В качестве примера приведем некоторые результаты воздействия крупных землетрясений на формирование геодинамических процессов.

Во время Тасс-Юряхского землетрясения (январь 1957 г.), эпицентральная часть которого располагалась в бассейне Ср. Олекмы, мощными вертикальными ударами был «перетряхнут» слой крупноглыбового материала, покрывающего водораздел рек Тасс-Юрях и Дырин-Макит. Как указывает В. П. Солоненко, буквально «с ног на голову» были поставлены глыбы коренных пород объемом до 40 м^3. На реках был нарушен ледовый режим, а на склонах произошли обвалы, образовались лавины. Нарушение устойчивого равновесия рыхлообломочного материала на склонах привело в весенний период к образованию сплывов, грязекаменных потоков, обычно не наблюдаемых на этой территории. Так, в приустьевой части Тасс-Юряха на склоне крутизной 25—30° произошел сплыв шириной 30 м, длиной 150 м.

27 июня 1957 г. было зарегистрировано Муйское землетрясение (10—11 баллов; $M = 7{,}9$; глубина очага 22 км), эпицентральная зона которого была приурочена

к Намаракитской межгорной впадине эмбрионального типа, расположенной вблизи юго-западной окраины Удоканского хребта. Землетрясение ощущалось на площади 1 млн. км². Подземные толчки силой 7 баллов были отмечены на расстоянии более 500 км (г. Чита). При движении земной коры в одном структурном поле практически мгновенно образовались трещины сжатия и растяжения, сбросы и выбросы, разнонаправленные сдвиги, складки кручения и вихревые структуры. Сейсмогравитационные движения горных масс происходили на площади 150 тыс. км² [Живая тектоника..., 1966].

До настоящего времени интенсивно развиваются обвалы и осыпи, что является прямым следствием сейсмического удара. Подобные явления характерны также для эпицентральных зон других сильных исторических землетрясений. Вместе с тем в 1978 г. при обследовании Намаракитской впадины и окаймляющих ее склонов было обращено внимание на то, как природа за прошедшие 20 лет на отдельных участках успела «залечить раны», нанесенные ей Муйским землетрясением. Известно, что при этом землетрясении днище Намаракитской впадины опустилось на 5—6 м. В местах наибольшей амплитуды опускания в прирусловой части рч. Намаракит образовалась цепочка озер. Росшие по берегам деревья — свидетели провала — оказались полузатоплены или затоплены. В настоящее время по берегам озер и до подножий гор преобладает травянистая растительность и лишь в местах до сих пор четко прослеживающихся разрывных нарушений, оконтуривающих впадину, принялась лесокустарниковая поросль. Очевидно, для произрастания деревьев по трещинным зонам создались более благоприятные условия, вызванные сменой режима подземных вод, изменением теплового баланса грунтов, нарушением криогенного строения и т. д. Борта трещин в рыхлых отложениях в целом обрели пологие контуры. На склонах гор прочесы в лесной зоне, созданные каменными лавинами, сбросообвалами и другими эндокинетическими деформациями, начали зарастать, и лишь обвальные массы выделяются на общем темно-сером фоне курумных скоплений.

Степень «заживления ран», так же как и степень пораженности, зависит от вида или типа сейсмотектонических деформаций, которые, в свою очередь, во многом предопределены геолого-геоморфологическими условиями. На горном участке эпицентральной зоны по сейсмотекто-

ническим нарушениям (крупным трещинам, рвам и др.), ориентированным перпендикулярно водоразделам, происходит интенсивное развитие эрозионных промоин, по отдельным из которых во время ливней формируются сели. Эти водосборные ложбины концентрируют склоновый сток, в то же время с бортов разлома постоянно поступает большое количество рыхлообломочного материала. Такие нарушения имеют тенденцию к увеличению за счет размыва. Вместе с тем небольшие, ориентированные поперек склона трещины полузасыпаны и угадываются лишь по сортировке рыхлообломочного материала. Наиболее крупные структуры очень четко прослеживаются до сих пор.

Высокая сейсмическая активность Байкальского рифта имела место и в прошлом, о чем свидетельствует наличие обвальных масс эндокинетического происхождения. Последние характеризуются большими объемами и, как правило, приурочиваются или тяготеют к зонам крупных тектонических нарушений [Trzcinsky, 1979].

Сейсмогравитационные процессы и явления по своей природе многообразны и взаимосвязаны. Их сила и разрушающая способность достаточны для того, чтобы вызвать катастрофу или подготовить условия для образования катастрофических русловых процессов. Так, обвал в верховье р. Ангаракан перегородил русло реки и создал потенциальную возможность для формирования селевого паводка [Демьянович, Авдеев, 1978; Солоненко, 1980]. В случае разрушения перемычки долина р. Ангаракан окажется селенаправляющим лотком, в пределах которого будет уничтожено все. В такой ситуации реальная угроза — обвал или сель, способные выплеснуть водную массу из чаши озера, как это имело место в долине р. Вайонт в Италии. Аналогичная катастрофа произошла в результате прорыва моренно-ледникового озера Жарсай: образовался сель, вынесший за несколько часов около 6 млн. м^3 грязекаменной массы и уничтоживший живописное высокогорное озеро Иссык. Примеры прорыва подобных запруд достаточно широко описаны в литературе [Plafker e. a., 1971; Vidal, 1976; и др.].

Устойчивость рыхлообломочного материала на склонах при различной величине сотрясаемости зависит, как известно, не только от силы землетрясения (хотя это основной показатель), но и от многих других величин: крутизны, высоты, экспозиции и расчлененности склонов, их расположения по отношению к фронту сейсмической

волны, увлажненности и степени оттаивания грунта, наконец, от степени выветрелости и мощности рыхлообломочного материала, его сыпучести, вязкости и т. д. [Лапердин, Тржцинский, 1977]. Для характеристики устойчивости склонов при сейсмическом воздействии, являющейся основой прогноза процессов, можно ориентироваться на результаты изучения эпицентральных зон Уоянских землетрясений, произошедших 2 ноября 1976 г. ($M = 5{,}2$; $K = 13$—14) и 4 июня 1977 г. ($M = 4{,}7$; $K = 13$). Как видим, разница в магнитуде составила всего 0,5 ед., но этого оказалось достаточно для того, чтобы в первом случае на склонах образовались осовы и небольшие обвалы, хотя в это время рыхлообломочный материал на склонах был скован мерзлотой. Во время июньского землетрясения грунты на южных склонах протаяли в среднем на 0,5—0,6 м, а на осыпях — до 1 м, за счет чего склоны были обильно увлажнены. Таким образом, во втором случае сложилась наиболее благоприятная обстановка для смещения материала со склонов, но все же подвижек не произошло, вероятно, вследствие недостаточной силы толчка.

Изучение последствий Уоянских землетрясений проводилось в три этапа. Основное внимание было уделено эпицентральной зоне первого землетрясения, так как здесь произошли заметные смещения материала на склонах. Первое обследование, проведенное 10 ноября 1976 г., т. е. вскоре после землетрясения, показало, что в эпицентральной части, на склонах, покрытых снегом, образовались темные полосы. Как выяснилось, эти полосы — результат осыпания и обваливания каменного материала с обнаженных уступов. Отдельные сорвавшиеся обломки весом до 20—30 кг, по сообщению В. М. Кочеткова и В. М. Жилкина, проделали путь в 60—70 м и достигли русла р. Анамакит. Камнепады, осовы образовались на разной высоте от днища долины. Ширина зоны их проявления колебалась в пределах от 5 до 35 м, а длина пути зависела от крутизны склона и коэффициента шероховатости его поверхности. Наиболее благоприятными поверхностями скольжения и качения оказались конусы осыпей, скованные льдом. Присутствие льда в теле осыпи объясняет в какой-то мере и то обстоятельство, что мощные осыпи, находящиеся на склонах крутизной от 25 до 35°, не среагировали на подземные толчки. Основная масса обвалов образовалась за счет срывов камней с

коренных обнажений. Землетрясение вызвало формирование необычных для этого района снегокаменных лавин общим объемом более 500 тыс. м^3, бо́льшая часть которых сошла весной 1977 г.

Повторное обследование долины р. Анамакит было проведено в феврале 1977 г. Аэровизуальными, аэрофотосъемочными и десантно-съемочными способами установлено, что зафиксированные при первом обследовании склоновые процессы (осыпи, камнепады, мелкие обвалы) имели сейсмогенный характер, так как их следы при повторном обследовании не обнаружены, а темные полосы на склонах на этот раз были покрыты снегом.

Для наиболее полной характеристики последствий Уоянского землетрясения летом 1977 г. в эпицентральной зоне были проведены работы по обнаружению и детальному изучению процессов, связанных с землетрясениями. По бортам долины р. Анамакит аэровизуально обследовались древние разновозрастные массы, которые в рельефе выражены в виде терасс, иногда запрокинутых в сторону склонов или отделенных от склонов рвами, рассекающими рыхлые отложения. Весь этот «сейсморельеф» сформировался за геологически короткий срок — после последнего оледенения. Наличие различных по возрасту обвальных масс говорит о неоднократном повторении на данной территории сильных землетрясений, так как объем ранее произошедших сейсмогенных обвалов значительно превышает объемы обвальных масс от 6—7-балльного Уоянского землетрясения.

При Уоянском землетрясении (2 ноября 1976 г.) морфологически одинаковые склоны по-разному среагировали на сотрясение, что обусловлено прежде всего характером и свойствами рыхлообломочных скоплений. Устойчивость рыхлообломочного материала на склонах зимой во многом зависит от способности его удерживать в себе влагу. Сильно увлажненные осыпные скопления оказались настолько смерзшимися, что представляли собой монолит и не испытали видимой реакции на сотрясения данной силы. Летом же, как как правило, наиболее увлажненные грунты приобретают плывунные свойства и смещаются даже при слабых толчках. Во время паводка, прошедшего 17 июня 1977 г. на р. Анамакит, нижние части осыпей оказались подмыты, и образовались нависшие козырьки — результат монолитности мерзлых осыпных скоплений. Разрушение козырьков происходило путем

обваливания крупных блоков. Установлен и тот факт, что во время землетрясения на соседних участках с такими же уклонами, но сложенных крупноглыбовым материалом, произошли значительные смещения поверхностного слоя. Повышенная реакция на одинаковую силу толчков в данном случае объясняется отсутствием в приповерхностном слое осыпи мелкодисперсного материала, являющегося необходимым цементирующим компонентом при промерзании грунтов. В первом же случае сравнительная устойчивость склона связана с большим содержанием льда в теле осыпи. При детальном изучении тела осыпи установлено, что в нише подмыва третью часть объема осыпного тела составлял лед. При сейсмическом воздействии на талые осыпи в Анамакит могло сместиться более 45 000 м^3 материала.

Очевидно, что в результате неоднократно повторяющихся землетрясений, как сильных, так и слабых, произошедших в этих районах за последние 20—30 лет, склоны гор «оживились». Здесь, кроме обвально-осыпных конусов, часто встречаются нагромождения материала, снесенного грунтовыми лавинами. Подобная обстановка наблюдается и в других эпицентральных зонах исторических землетрясений.

Таким образом, наличие древних и новейших сейсмоструктур, повышенная сейсмическая активность и связанные с ней локальные напряженные массивы являются одним из основных элементов природной среды и служат своеобразным индикатором распространения и развития экзодинамических процессов в Байкальской рифтовой зоне. По мнению Г. С. Золотарева (1976), возникновение крупных оползней и обвалов наиболее вероятно в тех случаях, когда крутые и высокие склоны секутся разломами параллельно или под малыми углами к основным направлениям эрозионных элементов. В зонах надвигов, запрокинутых складок выше возможность формирования блоковых оползней и обвалов и т. д. Такая тектоническая обстановка характерна для района западного участка БАМа.

Сейсмичность способствует усилению разрушения монолитности не только коренных массивов, но и рыхлообломочного материала на склонах. Наличие отдельных обвальных масс в долинах рек Гоуджекит, Ангаракан, Анамакит, Хани говорит о том, что сейсмотектонические условия района часто предопределяют развитие экзодина-

мических процессов на тех склонах, в пределах которых в иной обстановке проявление подобных процессов было бы невозможным. Поэтому детальное изучение сейсмической активности региона в целом позволяет сделать вполне определенные предсказания места наиболее пораженных площадей и размеров проявления тех или иных процессов в зависимости от других природных условий, причем землетрясения высокого энергетического класса, безусловно, сопровождаются большим набором различных экзогенных геологических процессов. Сложнее обстоит дело с прогнозом времени активизации процессов, связанных со слабыми, часто повторяющимися землетрясениями, которые способствуют изменению напряженного состояния горных пород, приводят к ослаблению их внутренних связей и «растряхиванию»; но зачастую не являются видимой причиной возникновения и развития отдельных явлений.

§ 2. Возможности прогноза тектонических явлений по данным о термальных источниках

Исследование многочисленных термальных источников Прибайкалья и других тектонически активных областей может способствовать более глубокому пониманию и даже прогнозу ряда тектонических явлений.

Схема трещинно-жильной гидротермальной системы выглядит следующим образом. Тектонические нарушения различного ранга (от мелких раскрытых трещин до крупных разломов), как правило, гидравлически связаны друг с другом. В цепочке этой связи выделяются три зоны: питания, транзита и разгрузки. Зоны питания и разгрузки непосредственно контактируют с дневной поверхностью, причем питание происходит на более высоких абсолютных отметках, чем разгрузка, что обеспечивает гидростатическое давление во всей водоносной системе.

Гидротермальная система питается талыми и дождевыми водами, которые собираются в открытые трещины поверхностей распадков, горных склонов и водоразделов. Сезонные (зимние) перерывы в питании, если они и происходят в полной мере, мало сказываются на режиме разгрузки гидротерм за счет большой общей емкости системы.

Зона питания гидротермальной системы включает в себя сеть разрывных нарушений различного масштаба, суммарная протяженность которых, видимо, исчисляется десятками и сотнями километров. Эти нарушения большей частью могут быть отнесены к структурам растяжения. Зоны транзита представляют собой магистральные части разломов, которые обычно относятся к сдвиговому типу. Такой тип тектонических нарушений, по-видимому, наиболее благоприятен для питания и разгрузки вод в системе.

Транзитная зона по ширине соответствует зоне интенсивного разрушения горных пород, которая образуется при подвижках по сместителю. В этой зоне воды приобретают повышенную температуру и специфический химический состав, превращаясь, таким образом, в термоминеральные. Длительность цикла водообмена для Прибайкалья пока не определена достаточно надежно. Однако имеются опубликованные данные по другим районам [Herbst, 1954; Pelikán, 1959; Franko, Kullman, 1968; Гаджиев, 1969; и др.], показывающие, что возраст термальных вод, определенный изотопным методом, варьирует от 400 до 33 000 лет (средняя величина 12 600 лет). Наряду с этим некоторые авторы отмечают существенные сезонные колебания расхода источников, причем, как считают О. Франко и Е. Куллман [Franko, Kullman, 1968], максимумы расхода отстают от ответственных за них периодов снеготаяния на 1—2 года. Последнее обстоятельство вероятно, характеризует не скорость движения воды, а скорость передачи давления в системе.

Пространственно зоны транзита относятся к средним по глубине горизонтам магистральных частей разломов. Принимая, что длина таких частей составляет 10—100 км и время водообмена — 12 600 лет, можно оценить скорость перемещения воды в зоне транзита в 0,8—8 м/год.

После движения по магистральным частям разломов термы поступают в область разгрузки. По-видимому, горячие источники обязаны своим происхождением только мелким разрывам и крупным трещинам. Приуроченность разгрузки терм к структурам именно такого класса отмечается многими авторами [Herbst, 1954; Pelikán, 1959; Файбушевич и др., 1961; Гаджиев, 1969; Carlé, 1980]. Объяснение этого факта заключается в том, что, поднимаясь по разрывам и трещинам, термы лучше сохраняют напор, чем в широких и емких магистральных частях

разломов. Здесь они в меньшей степени перемешиваются с холодными водами и быстрее поднимаются к дневной поверхности. Собственно термовыводящие разрывы обычно структурно и гидравлически связаны с магистральными частями крупных разломов.

Таким образом, в основных магистральных частях крупных разломов, как правило, термы не разгружаются. Зонами разгрузки служат локальные разрывные элементы периферии зон крупных разломов, которые являются, как отмечают Б. Спириев [Спириев, 1960; Spiriev, 1961], М. Н. Ерохин [1975] и другие авторы, структурами растяжения. Выходы термальных вод часто приурочены к пересечению двух или более трещин, причем в этом случае водоносной оказывается более поздняя по происхождению. Б. Спириев [Spiriev, 1961] указывает на то, что при системе наклонных трещин наиболее водообильной является самая верхняя, а при пересечении термовыводящей трещиной пород различной прочности наиболее водообильные выходы оказываются приуроченными к более прочным породам, так как последние обеспечивают большую трещиноватость. Разгрузка терм той интенсивности, что мы наблюдаем на поверхности, обычно представляет собой результат взаимодействия нескольких факторов: гидростатического давления в системе, давления вышележащей толщи пород, газлифта, термолифта, смешения глубинных горячих вод с холодными поверхностными.

Описывая гидротермальную систему, мы здесь не учитывали явления вулканизма и другие процессы конвективного подтока тепла из нижних горизонтов земной коры. Однако многочисленные термальные источники пространственно тяготеют к действующим и потухшим вулканам, что дает некоторые основания для совместного рассмотрения вулканов и гидротерм. По данным М. Пфанненштиля [Pfannenstil, 1955], новый вулкан возникает на земной суше примерно один раз в столетие. В то же время новые источники гидротерм появляются на суше, по-видимому, ежегодно. Появление их связано не только с извержениями вулканов [Вакин и др., 1977], но и с сильными землетрясениями [Spiriev, 1961; Noguchi e. a., 1970; Marler, White, 1975; Margomenou-Leonidopoulou, 1976]. Подобные события ответственны и за более мелкие быстрые перестройки в гидротермальных системах, вызывающие пространственную миграцию выходов гидротерм [Chariat, Ghafouri, 1971; Margomenou-Leonidopoulou, 1976]

либо резкое изменение их дебита и температуры [Marler, 1964; Sato, 1977; Motoya, 1981].

Представляется возможным увязать некоторые типичные случаи поведения гидротерм на поверхности с новейшими тектоническими событиями, которые затрагивают подводящие и главным образом термовыводящие каналы. На наш взгляд, тектонические явления в трещинных гидротермальных системах влияют на изменения в режиме и местоположении выходов гидротермальных вод следующим образом:

Гидротермальная водоносная система	Выходы гидротерм
Тектонические процессы, под воздействием которых находится водоносная система, протекают плавно	Отсутствуют резкие изменения местоположения выходов, температуры, дебита и уровня гидротерм
Термовыводящие каналы подвергаются резкому растяжению либо сжатию, перестраиваются на глубине; происходит внедрение глубинных подземных вод в верхние водоносные горизонты	Местоположение выходов не меняется, но резко меняются температуры, дебит, уровень гидротерм
Термовыводящие каналы перестраиваются вблизи дневной поверхности; наряду с этим вероятны изменения и в других частях гидротермальной водоносной системы	Меняется местоположение выходов гидротерм
Происходит крупная перестройка системы водоносных трещин, образование значительного объема новых разрывов и трещин или обновление старых	Начинает изливаться новый термальный источник

Образование новых термальных источников в местах, где они уже существовали в геологическом прошлом, требует значительной энергии на обновление старых трещин, но заложение новых трещин гидротермальных систем сопровождается еще большими энергетическими затратами и обеспечивается за счет самых крупных сейсмотектонических событий. Наряду с этим медленные тектонические движения тоже влияют на термопроявления через постепенные изменения глубины и проточности водоносных систем. Таким образом, находясь в периферийных частях зон крупных разломов, на локальных разрывных структурах типа растяжения, термальные источники чутко реагируют как на мгновенные, так и на медленные тектонические движения в зонах разломов и, следовательно, мо-

Таблица 2.1

Изменение температуры воды некоторых термальных источников Прибайкалья

Источник	Интервал наблюдений, лет	Максимальная температура воды в оголовках, °С	
		в начале наблюдения	в конце наблюдения
Ирканинский	68	34,3	34,9
Дзелиндинский	68	43,4	45,0
Хакусский	~75	68,0	46,8
Мегдылкон	69	40,1	32,0
Уринский	~50	72,3	71,0
Гусихинский	~50	60,0	55,5

гут служить индикаторами тектонической активности значительных территорий. В литературе уже имеются указания на то, что выходы термальных вод могут дать дополнительные сведения о структуре земной коры, наличии зон сжатия и растяжения [Sobotha, 1975].

Одним из признаков тектонической активности региона является изменение температуры воды термальных источников во времени. В Прибайкалье эти источники существуют в стабильном либо нестабильном (сокращающемся) режиме гидротермальной активности. Сокращение гидротермальной активности, отраженное в заметном уменьшении температур выходов за две — три четверти столетия, зависит от причин тектонического плана. Исключение составляет источник Мегдылкон, где малодебитные выходы могут просто заноситься речными отложениями (табл. 2.1).

Несмотря на то, что определение характера тектонических движений по изменению режима термальных источников представляется пока затруднительным, в отдельных случаях могут быть сделаны предположения. Например, участки Верхнеангарской впадины, индицируемые Дзелиндинским и Ирканинским источниками, по-видимому, не испытывали за последние 70 лет и вряд ли испытают в ближайшие годы сильные тектонические воздействия. Район Хакусского термального источника (восточное побережье оз. Байкал), напротив, за последние 75 лет подвергался таким воздействиям. Следует полагать, что и в ближайшие годы здесь будут энергично протекать тек-

тонические процессы и, возможно, произойдут значительные тектонические события. Это утверждение справедливо и для источника Гусихинского, находящегося также на восточном побережье оз. Байкал.

§ 3. Выветривание горных пород на юге Восточной Сибири и возможность его прогноза

Процессы выветривания, существенно изменяя состояние горных пород, являются причиной возникновения и развития многих экзогенных геологических процессов и явлений. Учитывая, что толщи выветрелых образований часто служат основаниями различных инженерных сооружений, выяснение закономерностей развития процессов выветривания, их скорости, изменения состава и свойств пород и, главное, прогноз их поведения под воздействием естественных и антропогенных факторов следует считать одной из первостепенных задач инженерной геологии. Однако в настоящее время вопросы научного предсказания этих процессов разработаны пока слабо. Поэтому на данной стадии исследований в первую очередь необходимо говорить о долговременных региональных прогнозах развития процессов выветривания [Изучение режима..., 1982].

В пределах юга Восточной Сибири выветривание наиболее детально изучалось в Прибайкалье и Приангарье. Большая часть Прибайкалья сложена докембрийскими образованиями, главным образом метаморфическими породами. Осадочные нижнекембрийские отложения развиты у подножий горных сооружений, они в значительной мере метаморфизованы и дислоцированы. Очень широко распространены магматические породы. Геологическое строение Прибайкалья имеет сложную историю развития, представленную всеми крупными тектоническими эпохами формирования литосферы. Эндогенные геологические процессы интенсивно продолжаются и в настоящее время. Это обусловило значительную неоднородность состава и свойств пород, а также различную их устойчивость по отношению к процессам выветривания.

На южной части Сибирской платформы развиты породы палеозоя, мезозоя и кайнозоя. Залегают они на большей части территории субгоризонтально, лишь в бортах крае-

вых прогибов и более мелких структур углы наклона достигают 15—40°. Прочность и устойчивость к процессам выветривания определяется у осадочных пород степенью литификации и характером структурных связей.

Выветрелые породы по времени образования могут быть подразделены на три группы: дочетвертичные, плиоцен-плейстоценовые и голоценовые. Первые образовались в дочетвертичное время, точнее, их формирование в основном закончилось в нижнем плиоцене. Это неогеновые, меловые, юрские и другие, более древние, коры выветривания, сохранившиеся лишь на отдельных участках, редко выходящие на земную поверхность [Логачев и др., 1964; Павлов и др., 1976] и по этим причинам не имеющие большого значения для общей инженерно-геологической оценки территории. Плиоцен-плейстоценовые коры выветривания распространены практически на всей территории, их формирование началось в среднем плиоцене. Голоценовые выветрелые образования в большинстве случаев сформировались под влиянием деятельности человека.

Формирование плиоцен-плейстоценовых выветрелых пород происходило одновременно с образованием основных форм рельефа. Начиная с плиоценового времени, активизация тектонических движений привела к общему поднятию территории. В Прибайкалье возникли высокогорные хребты. Вовлеченной в поднятие оказалась и территория Приангарья. Существенно изменялись условия денудации и эрозии, гидрогеологические условия, получили развитие экзогенные геологические процессы. Таким образом, возникли условия, определяющие геоморфологическое развитие региона и тесно взаимосвязанное с ним формирование кор выветривания.

Климат — один из главнейших факторов выветривания горных пород, в целом определяемый для всей территории как резко континентальный, заметно различается в пределах горных районов Прибайкалья и плоскогорья юга Сибирской платформы. Для горных хребтов и разделяющих их впадин характерен суровый климат с быстро изменяющейся инверсией температур и значительным колебанием ее в течение суток (30° и более), с обильными осадками (500—1000 мм и более), особенно в теплый период года. Из-за большой теплопроводности породы, нагреваясь днем и остывая ночью, имеют и большую суточную амплитуду температур. Это особенно характерно для пород, слагающих склоны южной экспозиции. На Средне-

сибирской плоской возвышенности, имеющей мягкие очертания рельефа, отмечается более спокойный температурный режим, с меньшим перепадом температур в течение суток (20—25°). Осадки здесь выпадают также преимущественно в теплое время года, но их общее количество значительно меньше (300—400 мм).

Температурное и морозное выветривание является наиболее действенным фактором в образовании кор выветривания Приангарья и Прибайкалья. Пространственно подошва коры выветривания обычно совпадает с глубиной распространения наиболее интенсивных температурных явлений, например глубиной годовых колебаний температур, равной 12—16 м для Приангарья и 15—30 м для горных районов Прибайкалья [Лещиков, 1978]. На образование кор выветривания очень сильное влияние оказали и вековые температурные колебания, имевшие место в эпоху четвертичного похолодания в Сибири. Деградация островных многолетнемерзлых пород, все еще сохранившихся на отдельных участках и распространяющихся в настоящее время до глубины 40 м, дает основание предполагать участие физических процессов в выветривании пород, расположенных гораздо ниже указанных глубин. По-видимому, этим можно объяснить наличие глубоко распространенных «карманов» и линз выветривания.

Строение верхней части литосферы, сложенной выветрелыми образованиями, детально показано на схеме инженерно-геологического расчленения коры выветривания, предложенной Г. С. Золотаревым [1971]. Придерживаясь этой схемы в целом, считаем необходимым уточнить некоторые определения и внести соответствующие дополнения.

Традиционно термин «кора выветривания» означает часть литосферы, представленную элювием — продуктами выветривания горных пород. Иными словами, к элювию можно отнести только преобразованные до дисперсного или обломочного состояния породы. Однако при изучении выветрелых пород, когда бывает нужно охарактеризовать и исходные породы (т. е. такие, которые практически не затронуты процессами выветривания), возникает необходимость проводить более дробное членение верхней части литосферы. Так, целесообразно выделять в толще приповерхностных пород монолитную и выветрелую зоны, различающиеся по характеру распространения процессов выветривания. В монолитной зоне преобразования в результате этих процессов настолько незначительны,

что с позиции инженерно-геологической оценки их можно считать несущественными, а сами породы — неизменными. В выветрелой зоне выделяются три подзоны: трещинная, обломочная и диспёрсная.

Общей закономерностью развития трещинной подзоны при прочих равных условиях является то, что ее мощность возрастает с увеличением глубины вреза речных долин, т. е. зависит от процессов разгрузки, а также интенсификации тектонических движений. Анализ трещиноватости в изверженно-метаморфических породах Прибайкалья показал, что максимальная мощность трещинной зоны не превышает 70—80 м [Писарский, Шерман, 1967]. Это подтверждается и геофизическими данными. Так, Н. Г. Ольшевский, изучавший трещиноватость скальных массивов Прибайкалья в зависимости от скоростей распространения сейсмических волн, установил, что в гранитах «карманы» и линзы выветривания (разуплотненные породы) развиваются до таких же глубин. В мезозойских осадочных породах юга Среднесибирского плоскогорья мощность трещинной подзоны достигает 150 м вблизи склонов крупных рек — Ангары, Иркута, Китоя и др. По данным ПГО «Иркутскгеология», в скважинах, пробуренных в разные годы, отмечается, что до такой глубины развиты процессы избирательного выветривания, формирующие мелкоглыбовый и дресвяно-щебнистый горизонты с большим содержанием дисперсного материала.

В то же время проникновение процессов выветривания на глубину определяется вещественным составом пород. Так, в глинистых отложениях верхоленской свиты палеозоя в среднем течении р. Оки мощность трещинной подзоны не превышает 20 м.

Описанная выше закономерность используется при прогнозе мощности и характера трещиноватых подзон выветривания для различных горных пород.

Две верхние подзоны выветривания — дисперсная и обломочная — пространственно приурочены к сфере воздействия наиболее интенсивных физических и химических процессов. Накопление продуктов выветривания на месте образования возможно лишь при определенных условиях. В горных районах с круторасчлененным рельефом, где мощность покровных склоновых отложений не превышает нескольких десятков сантиметров и лишь во впадинах достигает значительных величин, гравита-

ция и интенсивный плоскостной смыв не позволяют накапливаться дисперсным продуктам выветривания. На пологих участках водораздельных пространств встречается дисперсный элювий, представленный глинистыми образованиями с включением щебня и дресвы. Мощность его редко превышает десятые доли метра.

Обломочная подзона обычно подразделяется на несколько горизонтов: крупноглыбовый, мелкоглыбовый и дресвяно-щебнистый. Вещественный состав обломочного элювия практически не отличается от состава исходных пород. На незначительное развитие химических процессов указывает и минерализация распространенных в этих горизонтах подземных вод, которая в зависимости от приуроченности к геоморфологическим элементам не превышает 0,2—0,4 г/л при скорости движения вод менее 10 м/сут [Степанов, 1959]. Однако прочность пород обломочной подзоны вследствие разуплотнения снижается на 10—50% по сравнению с исходными породами [Инженерная геология Прибайкалья, 1968]. На участках, где скорость сноса обломочных продуктов превышает скорость выветривания, на поверхности отмечается лишь мелкоглыбовый горизонт мощностью менее 0,5—1 м. При прочих равных условиях наиболее мощная кора выветривания развивается на биотитовых и биотит-роговообманковых сланцах и гнейсах, менее мощная — на габбро, амфиболитах, пегматитах и гранитах. На кварцитах же кора выветривания практически отсутствует [Лапердин, Тржцинский, 1977].

Платформенная часть рассматриваемой территории представлена плоскогорьем с системой широких водоразделов, чередующихся с многочисленными речными долинами. Крутизна склонов редко превышает 15°. Покровные отложения четвертичного возраста мощностью от 2—5 м на водоразделах до 30 м в днищах крупных речных долин способствуют образованию и сохранению сравнительно мощной коры выветривания. Суммарная мощность дисперсной и обломочной подзон на породах кембрия и ордовика может достигать 15 м. На породах карбона и перми формируется дисперсная подзона (5—15 м) и обломочная (4—10 м). На отложениях юры мощность дисперсной подзоны составляет 3—8 м, обломочной — 2—3 м.

Следует отметить, что приведенные данные являются обобщенными, мощность подзон очень изменчива и зависит от многих факторов, основными из которых выступают морфология рельефа и литологический состав исходных

пород. Так, на песчаниках перми, испытавших цеолитизацию и поэтому обладающих повышенной литификацией, соответствующими прочностью и устойчивостью по отношению к процессам выветривания, образуются дисперсная и обломочная подзоны мощностью 1 м каждая. Совершенно иная обстановка наблюдается в юрских породах, где вследствие избирательного характера выветривания могут встретиться дисперсная и обломочная подзоны мощностью соответственно 16 и 25 м. Например, скважина, пробуренная на Ока-Мальтинском водоразделе вблизи п. Харайгун, имеет следующий разрез:

0,0—4,8 м — покровные четвертичные суглинки;

4,8—21,0 м — дисперсный элювий (переслаивание супесчаного и суглинистого элювия);

21,0—46,0 м — обломочный элювий (дресвяно-щебнистый элювий с включением глыб). Крупнообломочный материал представлен песчаником серым, кварц-полевошпатовым;

46,0—53,5 м — переслаивание конгломератов, гравелитов и крупнозернистых песчаников. В верхней части пласта до глубины 50 м встречаются конгломераты, выветрелые до гравийно-галечниковых образований.

Иначе происходит формирование зоны выветривания на площади развития траппового магматизма, имеющего широкое распространение на Сибирской платформе. Здесь, с одной стороны, произошло упрочнение вмещающих осадочных пород за счет высоких давлений, температур и воздействия гидротермальных растворов. С другой стороны, тангенциальные напряжения, развивающиеся во вмещающих породах при внедрении интрузий, способствовали образованию дислоцированных зон, развитию тектонической и литогенетической трещиноватости. На таких участках развиваются «карманы» и линзы выветривания, достигающие глубины 25 м и более.

Химическое преобразование пород определяется гидрогеологическими условиями. Повышенная трещиноватость осадочной толщи юга Сибирской платформы способствует хорошей проницаемости пород в приповерхностных горизонтах. Скорости движения подземных вод здесь превышают $1 \cdot 10^{-2}$ м/сут [Гидрогеология СССР, 1968]. Активность дренажа зависит от глубины эрозионного вреза, при этом дренируемая толща весьма неоднородна по водообильности, так как сложена породами с резко различающимися коллекторскими свойствами и контролируется речной сетью различного порядка.

Атмосферные воды с высокой химической активностью распределяются в самых приповерхностных горизонтах массивов более или менее равномерно и, инфильтруясь, очень часто взаимодействуют с вмещающими породами. Глубже подземные воды снижают свою химическую активность и интегрируются по трещинам. Соответственно интенсивность геохимических процессов снижается и находится в прямой зависимости от проницаемости пород. Степень водообильности при этом почти не играет роли, поскольку зачастую породы, например алевролиты, обладая повышенной водообильностью, практически не подвержены вторичным изменениям минерального состава. С увеличением глубины эта тенденция сохраняется, что хорошо видно по изменению минерального состава пород в шлифах. Косвенно это подтверждается и тем, что с глубиной минерализация подземных вод повышается: для пород угленосной формации с 50—100 до 300—500 мг/л; красноцветных и терригенных формаций — с 100—150 мг/л до 1—1,5 г/л; карбонатной и терригенно-карбонатной формаций — с 130—430 до 600—1000 мг/л. Ниже базиса дренажа минерализация увеличивается до 1 г/л и более.

Обломочная подзона является как бы переходной от трещинной к дисперсной. Этим и объясняется ее сравнительно небольшая мощность (обычно 2—5 м). Довольно часто на породах с невысокой степенью литификации обломочная подзона вообще отсутствует. Характерной особенностью рассматриваемой подзоны является плотная упаковка крупнообломочного материала. Количество песчано-глинистого заполнителя обычно не превышает 10% от общего объема. Обломочный материал — глыбы, щебень, дресва — внешне почти не отличается от исходных пород. Однако при изучении шлифов под микроскопом видно, что в обломках угленосной, красноцветной и терригенной формаций происходит пелитизация полевых шпатов и увеличение гидратов окислов железа. Слюды в значительной степени гидратированы. Часто от биотита сохраняются только контуры, а сам минерал превращен в мелкочешуйчатый каолинит-гидрослюдистый агрегат. В породах обломочной подзоны начинается интенсивный вынос соединений алюминия и накопление кремнезема.

Дальнейшая дезинтеграция пород приводит к почти полной смене жестких структурных связей, свойственных нормально литифицированным осадочным породам, на ме-

нее прочные, молекулярные. Происходит делитификация исходных разностей, в результате чего новообразованные породы по своему состоянию приравниваются к покровным четвертичным отложениям. Однако дисперсный аллювий сохраняет структурно-текстурные признаки, присущие материнским породам, в частности цвет, слоистость и расположение структурных систем.

Указанные закономерности характерны для всех разновидностей выветрелых осадочных пород, кроме карбонатных. Продукт гипергенеза — нерастворимый остаток карбонатных пород — не сохраняет признаки исходных пород. Он обычно ярко-коричневого или бурого цвета с вкраплением светлых пятен. Мощность карбонатных пород незначительна и редко достигает 1 м.

В обломочной подзоне, формирующейся на карбонатных породах, происходит кальцитизация, окремнение и мергелизация. Последнее отмечено по увеличению содержания полуторных окислов алюминия и железа в 1,5 раза. Вторичные процессы окремнения развиты слабо и характерны для доломитов. Кальцитизация — наиболее широко распространенный процесс — выражена в виде заполнения трещин, каверн, пустот в породе вторичным кальцитом. Поэтому карбонатные породы обломочной подзоны имеют, несмотря на большую пористость, практически одинаковые показатели прочности с породами монолитной зоны. Интересной особенностью карбонатных пород является и то, что по прошествии длительного времени (20—30 лет) породы с поверхности заброшенных карьеров имеют более высокую прочность, чем остальные части массива [Попов, Тржцинский, 1979]. Трещинная подзона в карбонатных породах, судя по образованию карстовых пещер — одного из частных случаев химического выветривания,— может достигать мощности 140 м [Филиппов, Тржцинский, 1975].

Прочность выветриваемых пород существенно изменяется по мере их преобразования. Это хорошо видно на примере изменения физико-механических свойств различных подзон выветривания, сформировавшихся на осадочных образованиях карбона, перми и юры (табл. 2.2). Литологический состав и прочность горных пород должны обязательно учитываться при прогнозе развития процессов выветривания. При этом следует подчеркнуть, что процессы эти многофакторные, а потому нельзя забывать и такие показатели, как мощность выветрелой зоны, особен-

Физико-механические свойства некоторых литолого-генетических личных стадиях

Возраст пород	Состояние	Разновидности элювия или исходных пород	Показатели физико-	
			W_e, %	γ, г/см³
Каменноугольные	Дисперсное	Глинистый	22	1,90
	Обломочное	Щебнистый	21	1,94
		Глыбовый	13	2,10
	Неизмененное	Алевролиты Аргиллиты	12	2,12
	Дисперсное	Глинистый	22	1,88
		Суглинистый	18	1,85
	Обломочное	Глыбовый	16	2,07
	Неизмененное	Песчаники	9	2,10
Пермские	Дисперсное	Глинистый	25	1,84
	Обломочное	Щебнистый	24	2,01
		Глыбовый	16	2,23
	Неизмененное	Алевролиты Аргиллиты	14	2,25
	Дисперсное	Глинистый	25	1,78
		Суглинистый	18	1,91
	Обломочное	Щебнистый	18	2,04
		Глыбовый	13	2,14
	Неизмененное	Песчаники	10	2,25
Юрские	Дисперсное	Глинистый	24	1,89
		Суглинистый	16	1,94
		Супесчаный	14	1,83
		Песчаный	10	1,72
	Обломочное	Дресвяно-щебнистый	12	2,06
		Щебнистый	9	2,08
		Глыбовый	8	2,16
	Неизмененное	Алевролиты	12	2,23
		Песчаники	6	2,27

Примечание. В таблице приняты обозначения: W_e — естествен пористость; $R_{сж}$ — временное сопротивление одноосному сжатию в естествен деформации; C — удельное сцепление; φ — угол внутреннего трения.
Модуль общей деформации определен по результатам опытных стати жинах.

ности морфометрии рельефа, обводненность пород, климатические условия и др. Особое значение для прогноза имеет предложенный А. Н. Бровкиным [1982] показатель интенсивности выветривания, который позволяет проводить типологическое районирование массива выветрелых пород.

Таблица 2.2

типов пород Приангарья на развыветривания

механических свойств

e	$R_{сж}$, 10^5 Па	E_0, 10^5 Па	C, 20^5 Па	φ, град
0,740	—	135	0,56	22
0,687	—	200	—	—
0,517	—	315	—	—
0,490	17	—	—	—
0,733	—	155	0,48	28
0,712	—	155	0,32	29
0,501	—	340	0,65	33
0,479	200	—	—	—
0,840	—	75	0,71	23
0,660	37	—	—	—
0,410	143	—	—	—
0,385	385	—	—	—
0,895	—	200	0,29	27
0,680	—	290	0,43	27
0,530	75	—	—	—
0,399	235	—	—	—
0,245	620	—	—	—
0,750	—	180	0,800	22
0,610	—	260	0,525	29
0,680	—	240	0,320	30
0,730		230	0,200	34
0,490	8,5	300	—	—
0,453	31	415	—	—
0,382	78	—	—	—
0,250	180	—	—	—
0,176	450	—	—	—

ная влажность; γ — плотность; e — ном состоянии; E_0 — модуль общей ческих нагрузок в шурфах и сква-

При формировании выветрелой зоны очень важным фактором является время, т. е. продолжительность переработки исходных пород в гипергенных условиях до достижения устойчивого состояния равновесия с окружающей средой. В естественных условиях в состоянии тектонического покоя зона выветривания обычно незначительно изменяет свою мощность, и ее развитие определяется скоростью денудации. Скорость выветривания при искусственном обнажении исходных пород зависит от их состава, прочности структурных связей и климатических особенностей.

В пределах юга Восточной Сибири нами проведено изучение скоростей выветривания горных пород в естественных условиях [Лапердин, Тржцинский, 1977]. При этом химическое преобразование не рассматривалось. На склонах крутизной более 30°, где продукты выветривания не успевают накапливаться, мы учитывали скорость денудации, т. е. количество продуктов выветривания, сносимых в течение года с единицы площади. Установлено, что скорость выветривания различных типов пород варьирует в широких пределах. Безусловно, этот факт является следствием зависимости выветривания от структурно-литологических особенностей и специфики перво-

начального дробления горных образований. С другой стороны, в целом степень различия скорости разрушения пород в различных геологических структурах Сибири невелика. В горных районах активность выветривания определяется тектонической раздробленностью пород. Средняя скорость выветривания для таких нарушенных зон равна 0,79 мм/год. Породы, находящиеся вне зоны современных тектонических нарушений, разрушаются гораздо медленнее — от 0,0004 до 0,5 мм/год. Среди пород, слагающих Сибирскую платформу, наиболее устойчивы к процессам выветривания диабазы (0,013 мм/год). Скорость выветривания осадочных пород изменяется от 0,08 до 8,0 мм/год. Более подробно этот вопрос освещен в специальной работе (Там же).

Голоценовые коры выветривания образуются за сравнительно короткий период времени, который определяется характером проявления динамических геологических процессов или воздействия человека на геологическую среду. Поэтому наряду с техногенной корой выветривания [Золотарев, 1971] целесообразно выделить современную, образовавшуюся в естественных условиях без участия человека. Как отмечено выше, в горных районах при круторасчлененном рельефе гравитация и плоскостной смыв практически не дают сформироваться полному профилю коры выветривания. На платформе голоценовые коры выветривания формируются в основном под влиянием деятельности человека. Встречаются также зоны современного выветривания горных пород на участках развития оползней и других экзогенных процессов, но они имеют незначительное распространение [Тржцинский и др., 1969].

Техногенные коры выветривания по условиям образования можно подразделить на две группы: сформировавшиеся при прямом воздействии человека, например при вскрытии строительных котлованов, и при косвенном воздействии, т. е. при таком изменении природной обстановки, которое приводит к изменению гидрологических, гидрогеологических и прочих условий и может способствовать интенсификации процессов выветривания. Так, на отдельных участках верхнего бьефа Иркутского водохранилища в результате повышения уровня грунтовых вод и дальнейшего его колебания в результате сработки за 25 лет в сравнительно однородных юрских породах

сформировался слой выветрелых образований мощностью 1,5—2 м.

Скорость формирования дисперсного элювия техногенного происхождения на искусственно обнаженных осадочных породах Приангарья изменяется очень широко: от 0,2—0,9 см/год при выветривании терригенной и красноцветной формаций [Demyanovich e. a., 1975] до 1—10 см/год при выветривании пород угленосной формации. Наблюдения за выветриванием пород угленосной формации проводились в районах г. Иркутска и г. Зимы, на площадках, расположенных на водоразделах, где плоскостной смыв не оказывает заметного влияния на условия выветривания. Образование дисперсной подзоны в основном завершилось за три года (активная стадия выветривания по Ю. Д. Матвееву [1968]). В течение последующих трех лет мощность дисперсной подзоны практически не увеличилась.

Анализ новообразованного современного элювия показал, что качественно он отличается от элювия плиоцен-плейстоценовых кор выветривания. Это проявляется в меньшей степени диспергированности, незначительном преобразовании терригенных компонентов, несколько большем количестве карбонатов и легкорастворимых солей и т. д. Соответственно отличаются и свойства рассматриваемых пород, например у некоторых разностей пород может наблюдаться уменьшение или даже отсутствие пластичности.

Говоря о прогнозе техногенного выветривания в первую очередь следует предусматривать разработку методов краткосрочных прогнозов изменения состояния горных пород в результате вскрытия их в выемках, котлованах, карьерах и других горных выработках, в процессе подтопления, периодического обводнения и высушивания, а также промерзания и оттаивания. Такой прогноз особенно необходим в связи с увеличением объемов строительства, сопровождающегося обнажением горных пород. Отдельные элементы этого прогноза работают уже сейчас. Так, установлено, что песчано-глинистые отложения терригенно-красноцветной формации ордовика весьма нестойки к различным агентам выветривания. Монолитные породы, попадая на открытый воздух, покрываются сетью волосяных трещин и в течение нескольких суток превращаются в дресву. Поэтому в районах развития братской

свиты при вскрытии различных строительных выемок рекомендуется в короткий срок изолировать обнаженные породы от воздействия внешней среды.

§ 4. Эрозионно-суффозионные процессы на Среднем Енисее и их прогноз

Сооружение Среднеенисейского гидроузла и создание нового крупного водохранилища с площадью зеркала около 400 тыс. га повлечет за собой существенные изменения инженерно-геологических условий на прилегающих территориях. Геологическое и структурно-тектоническое строение этого района определяется его граничным положением в зоне сочленения Енисейского кряжа и Западносибирской плиты. В геологическом строении участвуют всевозможные образования — от архея до четвертичной системы. Геоморфологические условия определяются тектоническими особенностями, составом отложений и историей развития рельефа. На правобережье Енисея (в пределах Енисейского кряжа) развит низко- и среднегорный рельеф. Левобережная часть реки представляет собой плоскогорье с системой широких водоразделов, чередующихся с многочисленными речными долинами; крутизна склонов редко превышает 15°. Вблизи Енисея обширные пространства занимают поверхности речных террас. Территория сложена слабоконсолидированными отложениями мела, юры и палеогена, перекрытыми рыхлыми четвертичными образованиями, часто лессовидного типа.

Среди экзогенных геологических процессов, отмечаемых в этом регионе, существенное значение имеют эрозия, плоскостной смыв и суффозия, которые особенно широко проявляются в лесостепной, более освоенной части левобережья Енисея. С геологической точки зрения, наиболее интенсивно эрозионно-суффозионные процессы и явления развиваются на покровных лессовидных суглинках и супесях, пылеватых песках, слагающих верхнюю часть разреза всех надпойменных террас Енисея, а также на сильно выветрелых породах мела и юры. Лессовидные породы относятся к легкоразмываемым образованиям. Скорость их размокания изменяется от долей минуты до нескольких минут, содержание пылеватой части составляет 6,0—

70%, а общее содержание карбонатов и водорастворимых солей может достигать соответственно 20 и 0,3%. Вместе с тем поверхностная часть разреза террас обладает невысокими фильтрационными свойствами ($K_ф$ = 0,37—0,90 м/сут по П. П. Лямцевой) и практически лишена подземных вод. В то же время в базальных галечниках, залегающих на цоколях террас, формируются выдержанные горизонты грунтовых вод.

Среди форм микрорельефа, созданных эрозионными процессами, выделяются молодые и древние овраги и балки. Овраги в свою очередь по морфологическому признаку подразделяются на три типа: эрозионные, суффозионно-эрозионные и гравитационно-эрозионные.

Эрозионные овраги распространены повсеместно на всех типах пород. Размеры их обычно невелики: длина составляет 30—150 м, глубина — 1,5—2 м. Поперечный профиль V-образный, продольный — выпуклый или вогнутый в зависимости от фазы развития. На элювиально-пролювиальных образованиях метаморфических и интрузивных пород эрозионные формы представлены чаще всего промоинами. На лессовидных и осадочных отложениях глубина оврагов может достигать 5—10 м, однако чаще всего по мере своего роста овраг осложняется формами сопутствующих геодинамических процессов — обвалов и суффозии. Овраги эрозионного типа для этих пород, по сути, являются лишь начальными формами развития, в дальнейшем они перерастают в генетические типы, рассматриваемые ниже.

Суффозионно-эрозионные овраги приурочены к площадям распространения лессовидных и сильно выветрелых осадочных пород мела и юры. Встречаются они повсеместно, но наиболее крупные и активные формы развиты в южной лесостепной части территории (села Павловщина, Барабаново, Куваршино, Худоногово и Кубеково). Образование и развитие этих оврагов обусловлено совместным воздействием суффозионных и эрозионных процессов. Часто овраги представляют собой цепочку «нанизанных» друг на друга воронок. Так, овраг у с. Худоногово, образовавшийся на склоне 100-метровой террасы Енисея, объединяет 7 воронок, имеющих форму цилиндра диаметром от 4 до 9 м, глубиной до 9 м. В днищах этих воронок встречаются поноры цилиндрической формы глубиной до 3,5 м и диаметром 1,8—4,0 м, представляющие собой «корни» воронок, в значительной сте-

Таблица 2.3

Скорость роста оврагов по данным стационарных наблюдений

Местоположение оврага	Тип	Период наблюдений, лет	Кол-во наблюдательных створов	Скорость роста оврага, м/год
с. Сотниково, поверхность 90-метровой террасы, склон карьера	Эрозионно-суффозионный	1	2	0,05—0,10
с. Барабаново, поверхность 40-метровой террасы	То же	2	5	0—0,28
с. Куваршино, поверхность 40-метровой террасы	»	2	6	0—0,18
с. Худоногово, склон 100-метровой террасы	»	2	5	0,09—0,79
с. Кубеково, профиль I — I, оползневый склон 100-метровой террасы	»	1	3	0—2,43
с. Кубеково, профиль II — II, оползневый склон 100-метровой террасы, обочина дороги	Эрозионный	1	1	6,3
с. Кубеково, оползневый склон 100-метровой террасы, обочина дороги	»	1	1	6,0

пени уже измененных эрозией. Продольный профиль ломаный, выпуклый. Длина оврага 130 м. Наблюдения показывают, что поверхностный сток в период дождей полностью поглощается понорами, а по тальвегу оврага он практически отсутствует.

Установленные линейные скорости роста эрозионно-суффозионных оврагов за сравнительно короткий период (1—2 года) невелики — по наблюдаемым створам они изменяются от 0 до 2,43 м/год (табл. 2.3). Однако, несмотря на кажущуюся стабильность оврагов этого типа, их развитие может представлять большую опасность, если не будет учтено при создании водохранилища и освоении территории. Эрозионно-суффозионные овраги проходят

длительную стадию выработки подземной суффозионной полости с последующим ее внезапным обрушением и резким увеличением размеров. Одновременно может образоваться группа воронок емкостью несколько сотен кубических метров.

Эрозионные и эрозионно-суффозионные овраги очень часто развиваются вдоль дорог, что позволило Б. Ф. Косову [1957] выделить дорожную эрозию как один из видов линейной эрозии. По нашим наблюдениям, скорость развития оврагов этого типа оказалась максимальной — 6,0 и 6,3 м/год. Дорожная эрозия развита практически в любых геолого-геоморфологических условиях и часто является причиной выхода из строя отдельных участков проселочных и шоссейных дорог.

Одной из причин быстрого роста придорожных оврагов, на наш взгляд, является накопление снега в придорожных кюветах и выемках за счет ветрового перераспределения на безлесных пространствах и в результате очистки полотна дороги от снега. Снег, накапливаясь в придорожных кюветах, промоинах и выемках, предохраняет их днища от промерзания, а при снеготаянии воды получают сосредоточенное линейное направление, активизируя эрозионную и суффозионную работу. С другой стороны, фактором, в определенной степени препятствующим развитию эрозии, выступает лес. Так, например, ширина оврага, расположенного вдоль шоссе Юксеево — Бол. Мурта, на безлесных вырубленных участках достигает 30—40 м, а там, где лес вплотную подступает к кювету, она уменьшается до 1,5—3 м (общая длина оврага составляет 0,5 км).

Гравитационно-эрозионные овраги распространены в южной части территории, в зоне развития юрских пород, деформированных древними оползневыми подвижками (урочище Бугры, села Кубеково и Частоостровское), а также в районе сел Куваршино, Барабаново, Павловщина и др. Типичными оврагами являются ручьи Борисов Лог и Бухало. Постоянный водоток имеет расход, не превышающий 2—5 л/с. Развитие долины — врезание и подрезка склонов — происходит преимущественно за счет энергии временного водотока в период снеготаяния и ливневого дождя, что провоцирует развитие так называемых овражных оползней. В оползание вовлекаются как рыхлые отложения, так и коренные породы цоколей террас. Формируются оползни срыва, обрушения и оползни-

потоки. Длина гравитационно-эрозионных оврагов иногда превышает 1 км, глубина их достигает 10—20 м. За счет гравитационных процессов овраги расширяются. Большие оползни на склонах в период высокой водности временного водотока могут привести к возникновению селеподобных грязевых и грязекаменных потоков.

Древние эрозионные формы — балки, лога, ложбины — имеют широкое распространение и развиты на различных гипсометрических уровнях: террасах, склонах и поверхностях водоразделов. Склоны и днища оврагов пологие, задернованные. Доминирующим геоморфологическим процессом является плоскостной и внутрипочвенный смыв. Однако и при антропогенных нарушениях дерново-почвенного покрова в днищах древних форм образуются свежие эрозионные промоины и овраги.

Часто склоны балок сложены древними оползневыми ступенями (оползни у сел Каргино, Сотниково и др.), их верховья имеют расширенную циркообразную форму, достигая в поперечнике 0,3—0,5 км. Иногда такие же циркообразные, но меньших размеров формы отмечаются на склонах. Это позволяет предполагать, что многие балки представляют собой конечную стадию развития эрозионных и эрозионно-суффозионных оврагов. По-видимому, определенная часть наиболее крупных древних эрозионных форм обязана своим происхождением древней гидрографической сети в период формирования террасовых поверхностей.

Приведенная здесь классификация малых эрозионных форм в известной степени схематизирована. В действительности выделенные типы оврагов существуют как самостоятельно, так и образуя определенные системы — последовательные смены различных типов в одной эрозионной долине. Так, верховья крупных (длиной 1—2 км) оврагов развиваются по эрозионному типу, средняя их часть — по гравитационно-эрозионному, а устьевая — вновь по эрозионному типу. Возможны и другие виды комбинаций в развитии оврагов. В то же время при определенных геолого-геоморфологических условиях выделенные типы эрозионных форм представляют, по сути, единый генетический ряд последовательного развития этих форм. Например, на лессовидных слаболитифицированных осадочных породах промоины и овраги эрозионного типа по мере роста переходят в суффозионно-эрозионный, а затем — в гравитационно-эрозионный тип с последователь-

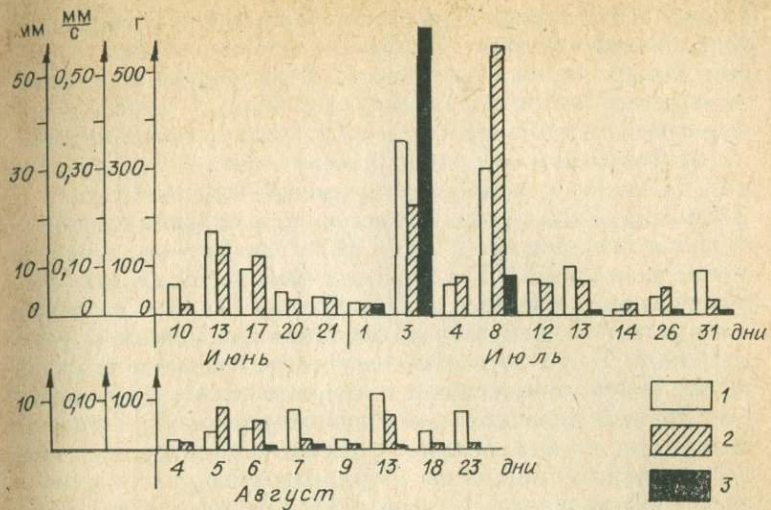


Рис. 4. График зависимости поверхностного стока от количества и интенсивности осадков.

1 — осадки (мм); *2* — интенсивность осадков (мм/с); *3* — поверхностный сток (г).

ным превращением в древнюю балку. На элювиальных образованиях метаморфических и изверженных пород образование промоины или оврага эрозионного типа может завершиться лишь преобразованием свежих форм в задернованные — балку или ложбину.

Активность плоскостного смыва на склонах определяется количеством осадков и их интенсивностью, уклонами и экспозицией поверхности, а также водопроницаемостью почвогрунтов. По данным Г. К. Габриеляна [1956], плоскостной смыв начинается лишь тогда, когда интенсивность дождя превышает интенсивность промачивания.

Совместный анализ полученных данных об осадках (количество и интенсивность осадков определялись с помощью *самописца дождя — плювиографа* П-2) и количественных данных о твердом стоке (изучаемом на специально оборудованных экспериментальных стоковых площадках) показал, что проявление плоскостной эрозии в течение лета неодинаково (рис. 4). Как показывают многолетние наблюдения (1979—1981 гг.), в июне сток возникает нечасто, а в отдельные годы (1979 г.) отсутствует совсем. *Это объясняется выпадением малого количества*

осадков, их пониженной интенсивностью, а также сухостью почвогрунтов. Наиболее активно водная эрозия проявляется в июле и августе. При этом интенсивный плоскостной смыв отмечается на склонах с сильно разреженным или нарушенным (гарь) растительным покровом и значительными уклонами поверхности. В пределах таких площадок с 1 м^2 за один ливень выносится до 3 кг мелкозема. Так, на склоне восточной экспозиции, где прошел низовой пожар, 8 июля 1979 г. снос рыхлого материала равнялся 3375 г, при этом выпало 30 мм осадков с интенсивностью 0,60 мм/с. На участках гари и разреженного растительного покрова возникли эрозионные борозды глубиной 7—15 мм, отмечены следы свежих разрывов дерна. В некоторых случаях во время интенсивных ливневых дождей происходит перемещение не только рыхлого материала, но и щебенки. Существенное значение оказывает и экспозиция склона — размыв поверхности склонов восточной и западной экспозиций происходит в 1,5—2,0 раза интенсивнее, чем южной. На залесенных участках склоновый сток практически отсутствует. Следует подчеркнуть, что зависимость активности плоскостного смыва от литологических разностей пород отчетливо не прослеживается.

Суффозионные процессы в пределах рассматриваемой территории развиваются в лессовидных отложениях террас и сильно выветрелых породах юры и мела. Эксперименты, проведенные А. Г. Герасимовой и Н. С. Красиловой с лессовидными породами в районе г. Красноярска, показали, что отрыв частиц породы происходит при небольших скоростях движения воды (2—3 см/с). Суффозионный вынос пылеватых частиц из лессовидного суглинка начинается при градиентах напора менее единицы. Прямыми определениями суффозионной устойчивости установлено, что внезапный, почти мгновенный прорыв массы водонасыщенного грунта происходит при градиенте напора 5—6. В природной обстановке, характеризующейся в отличие от лабораторных условий большей неоднородностью и нарушенностью пород, по нашему мнению, подобные прорывы могут происходить при градиенте напора существенно меньше единицы, и следовательно, лессовидные породы имеют весьма небольшую суффозионную устойчивость.

Свежие суффозионные формы — воронки, провалы колодцеобразного вида — обычно приурочены к бровкам

террас, оврагов, оползней, карьеров и других выемок. Часто они возникают по направлению эрозионных промоин и оврагов и, подвергаясь эрозионной переработке, способствуют их линейному росту. Нередко провалы располагаются цепочкой вниз по склону и связаны между собой подземными ходами. Постепенно они преобразуются в суффозионно-эрозионные овраги.

Размеры провалов в поперечнике изменяются от 1 до 9 м при глубине от 1,5 до 10 м. Иногда провалы прорезают всю толщу лессовидных пород и обнажают базальные галечники, залегающие на цоколе из мелкозернистых сильно выветрелых песчаников. Видимо, в этих случаях суффозионные полости формировались как в толще лессовидных пород, так и ниже подошвы галечникового горизонта — в коренных породах. Образование суффозионных провалов происходит внезапно. Так, на оползневом склоне у с. Кубеково в 1979 г. существовали 3 суффозионные воронки глубиной до 1,2 м и диаметром до 2 м (суммарный объем около 8 м^3). В 1980 г. на их месте образовался провал удлиненной формы (20,5 × 4,3 м) глубиной 2,5 м, объем провала составлял 220 м^3. Стенки провала отвесные, в дне прослеживаются два понора цилиндрической формы, уходящие на глубину около 1 м и представляющие, по-видимому, «корни» суффозионных воронок.

Свежая суффозионная воронка шириной в поперечнике около 20 м и глубиной 1,8 м встречена близ пос. Юксеево в днище широкого распадка — притока руч. Дружниха. Из склона воронки наблюдается рассредоточенный выход подземных вод с дебитом около 2 л/с. В другой стенке воронки расположена небольшая полость высотой около 1 и длиной 3 м, ориентированная вдоль оси распадка. Борта воронки сложены мелкозернистыми макропористыми пылеватыми супесями. Выше и ниже по днищу распадка прослеживаются прерывистые эрозионные промоины длиной 3—5 м и глубиной до 0,7—1,0 м, имеющие между собой подземную связь. Склоны и днища распадка задернованы, вверх по распадку промоины исчезают. По днищу воронки прослеживается старая дорожная колея. Вероятно, здесь мы имеем дело с активизацией суффозионных процессов в днище древней эрозионной формы.

Древние суффозионные воронки часто встречаются на террасах различных уровней. Обычно они имеют округлую в плане форму, диаметр их изменяется от 7—10 до 40 м, глубина составляет 1,5—2,5 м. Днища воронок увлажне-

ны, заросли кустарником, березой и черемухой. В отдельных случаях к днищам воронок приурочены малодебитные подземные источники (2—5 л/с). Иногда воронки ориентированы по оси слабо выраженных в рельефе эрозионных микропонижений. Сравнение современных суффозионных форм с древними воронками с достаточной степенью достоверности позволяет установить их общий генезис.

Наряду со скрытыми суффозионными полостями в стенках карьеров и оврагов часто устанавливаются полости закрытого типа, не имеющие выхода на дневную поверхность. Такие полости, ориентированные чаще всего вдоль по склону в сторону эрозионного вреза, вскрываются в стенках свежих провальных воронок. Диаметр пустот составляет 0,3—1,0 м при длине до 1,5—3 м. Естественно предполагать существование таких полостей и близ древних эрозионных врезов, а их наличие необходимо учитывать при инженерно-строительных изысканиях.

Как установлено И. А. Печеркиным [1969] при изучении Камских водохранилищ, теоретическое положение о затухании овражной деятельности при повышении базиса эрозии не нашло своего подтверждения на практике. Напротив, на Братском и Усть-Илимском водохранилищах отмечена активизация овражной деятельности. Поэтому весьма вероятно, что создание Среднеенисейского водохранилища приведет к заметной активизации суффозионно-эрозионных процессов в прибрежной зоне. Абразия берегов при переменном уровне водоема будет препятствовать выработке оврагами профиля равновесия. Интенсивностью абразии будет определяться активность развития оврагов, устья которых попадут в сферу абразионной переработки. В свою очередь, повышение эрозионного расчленения берега будет ускорять его абразионную переработку.

Повышение уровня воды при заполнении котлована вызовет развитие подпора подземных вод в пределах аллювиальных толщ террас среднего комплекса. Это послужит причиной возникновения новых очагов активизации суффозионных и суффозионно-эрозионных процессов. В целом повышение уровня подземных вод на большой территории и периодические его колебания будут способствовать широкому появлению новых и оживлению старых участков развития эрозии и суффозии. После создания водохранилища в зоне его абразионного воздействия ока-

жется подножие склона 90-метровой террасы в районе сел Каргино и Сотниково. Склон террасы деформирован древними оползнем, а цоколь сложен юрскими породами. Здесь ожидается резкая активизация суффозионно-эрозионных процессов с образованием после первых лет заполнения эрозионных и суффозионно-эрозионных оврагов, а в дальнейшем и гравитационно-эрозионных.

В целом проведенная типология эрозионных форм и установленная стадийность их развития имеет определенное прогностическое значение. Дальнейшее интенсивное освоение территории после заполнения водохранилища в условиях развития подпора и абразионной переработки берегов потребует соблюдения более строгих противоэрозионных мер для предотвращения активизации образования оврагов, плоскостного смыва и суффозии.

§ 5. О связи современных геологических процессов с трещинно-ослабленными зонами

Трещинно-ослабленные зоны в массивах горных пород и обусловленная ими площадная анизотропность последних издавна привлекали внимание инженеров-геологов [Комарницкий, 1966; и др.]. Такие зоны характеризуются повышенной трещиноватостью и раздробленностью пород, определяющими коллекторскую, фильтрационную и несущую способности, и, таким образом, оказывают влияние на развитие многих геологических процессов.

Большинство зон выражены геоморфологически [Комарова, Штенгелов, 1977]. В результате снижения прочности пород по ним, как по канве, вырисовывается существующий и развивающийся рельеф земной поверхности, закладываются подземные и поверхностные водотоки, формируются экзогенные процессы и т. д. Это позволяет использовать сведения о расположении линейных отрицательных форм для предварительного определения положения трещинно-ослабленных зон в неизученных районах и оценки их связи с развитием некоторых геологических процессов.

Следует отметить, что анализ отдельных элементов рельефа уже давно используется для решения как теоретических (выяснение истории тектонического развития территорий), так и практических (поиск полезных иско-

паемых) задач. Выделение трещинно-ослабленных зон мы проводили с помощью одной из модификаций морфометрического метода, базирующейся на анализе развития прямолинейных участков речной сети. Суть метода сводится к определению по топографическим картам разного масштаба участков сгущения линейных отрезков речной сети (линеаментов)* и оценке их плотности. Последняя представляет собой отношение суммарной длины линеаментов к площади подсчета. Расчет плотности осуществляется с помощью «скользящего окна» или по квадратам. В соответствии с масштабом карт выбираются градации плотности трещиноватости, которые в виде изолиний наносятся на карту. Участки повышенной плотности линеаментов соответствуют трещинно-ослабленным зонам. Применение этого метода уже дало определенные результаты при изучении влияния зон новейшего и современного раздвижения земной коры на инженерно-геологические процессы на берегах водохранилищ [Комарова и др., 1980].

В настоящей работе морфометрический метод использован для выявления связи геологических процессов с трещинно-ослабленными зонами района Коршуновского железорудного месторождения, где широко развиты оползни, карст, суффозия, эрозионные и мерзлотные процессы и т. д. В то же время установлено, что ряд нежелательных последствий при освоении прилегающей к рудному полю территории оказался обусловленным либо развитием некоторых геологических процессов, либо непосредственно особенностями трещинно-ослабленных зон. Так, деформации одного из отвалов карьера Коршуновского месторождения связаны с оползневым процессом, деформации железной дороги в районе этого отвала — с проявлением ползучести глубоко преобразованных в пределах трещинно-ослабленной зоны глинистых красноцветов. Утечки из хвостохранилища и образование провалов на его берегах связаны с наличием трещинно-ослабленной зоны вдоль руч. Сухого и развитием здесь карстово-суффозионного процесса. Приведенные примеры показывают необходимость заблаговременного выявления трещинно-ослабленных зон как основы развития природных и техногенных процессов.

* Здесь и далее авторы раздела используют этот термин несколько шире, чем это принято сейчас у геологов (см.: **Геологический словарь**.— М.: Недра, 1978). *Прим. отв. ред.*

В основе использования указанного метода для разработки инженерно-геологических прогнозов лежит установление связи развития современных геологических процессов с трещинно-ослабленными зонами определенного геологического строения. Принципиальная возможность решения подобной задачи заключается в том, что преобразования пород в пределах этих зон определяют пространственную изменчивость прочностных, коллекторских и фильтрационных их свойств, а тем самым — состояние геологической среды.

Согласно выполненным расчетам, в рассматриваемом районе плотность линеаментов изменяется от 0,5 до 2,5 км/км^2, а в переводе на условные единицы — от 20 до 100. Всего выделено шесть градаций плотности линеаментов (рис. 5). Распределение участков с наибольшей плотностью линеаментов по площади свидетельствует о неоднородности напряженно-деформационного состояния земной коры, особенно вблизи месторождения. Здесь выделены трещинно-ослабленные зоны двух систем: одна из них представлена взаимно перпендикулярными зонами субширотного и субмеридионального направлений, другая — диагональной системой северо-восточного (40—45°) и северо-западного (305—310°) простираний. Высокой насыщенностью линеаментами отличается часть территории, где сосредоточены крупные широтные зоны. Центральную из них (шириной 3 км) образует совокупность параллельных мелких зон. Южнее выделяются еще три широтные зоны, причем по мере удаления от месторождения ширина их уменьшается (полоса их выраженности утончается). Ярко выражены также две из четырех зон северо-восточного простирания, соответствующие направлению структур Байкальской горной области. Их особенностью является прерывистость в плане и незначительные сдвиги отдельных отрезков на восток.

В целом по району широко развиты субмеридиональные зоны, отличающиеся разорванностью на отрезки и сдвигами последних, причем границей разнонаправленных сдвигов являются зоны северо-западного простирания, прерывистые в плане, но без смещений. Максимальные сдвиги отмечаются в блоке, ограниченном крупными зонами северо-восточного простирания.

Наибольшей плотностью линеаментов характеризуются узлы пересечения зон широтного и северо-восточного простираний, причем чем шире эти зоны, тем выше плотность.

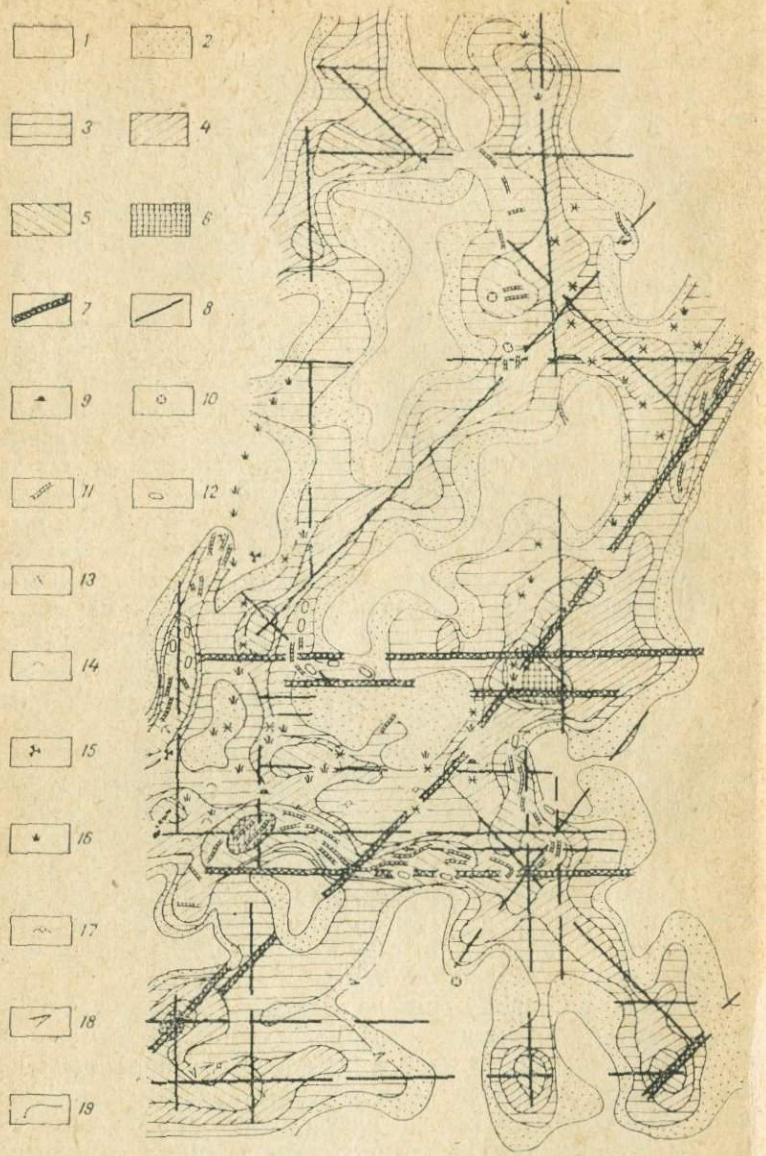
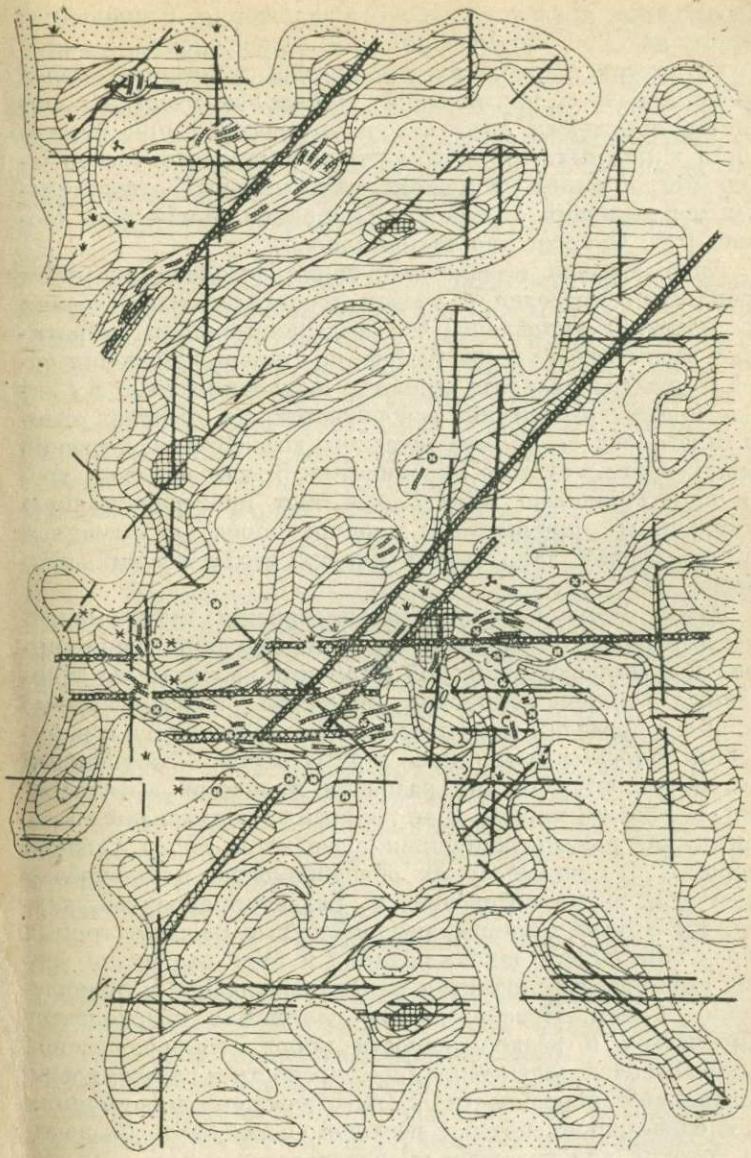


Рис. 5. Схема трещинно-ослабленных зон.

1—6 — плотность линеаментов, км/км² (усл. ед.): *1* — < 0,5 (< 20), *2* — 0,5—1,0 (20—40), *3* — 1,0—1,5 (40—60), *4* — 1,5—2,0 (60—80), *5* — 2,0—2,5 (80—100), *6* — > 2,5 (> 100); *7* — крупные трещинно-ослабленные зоны; *8* — трещинно-ослабленные зоны; *9* — бугры пучения; *10* — карстовые воронки; *11* — оползневые рвы; *12* — лощины карстово-оползневого происхождения; *13* — оползни выдавливания; *14* — солифлюкция; *15* — осыпи; *16* — заболоченность; *17* — наледи; *18* — овраги; *19* — граница зон с различной плотностью линеаментов.



Несомненно, это зоны глубокого заложения, поскольку к одному из узлов приурочено само месторождение, а в пределах других встречаются пропластки туфогенных пород среди осадочных образований. Локальные участки повышенной плотности линеаментов отмечаются при пересечении широтных зон с субмеридиональными и северо-западными, а также на участке максимальных относительных перемещений отрезков субмеридиональной зоны (долина руч. Сухого, хвостохранилище).

Анализ связи выделенных зон с экзодинамическими процессами проведен с учетом геологического строения местности. Установлено, что выделенные зоны затрагивают весь геологический разрез, но степень изменения пород в пределах разреза меняется в зависимости от их литолого-петрографических особенностей, а в пределах одного типа пород — от тектонического воздействия, косвенно выраженного в густоте линеаментов. Таким образом, трещинно-ослабленные зоны определяют пространственную изменчивость прочностных свойств пород, являющихся обычно средой зарождения многих геологических процессов.

Район Коршуновского месторождения имеет многослойный разрез, в верхней части породы терригенно-карбонатной нижнеордовикской формации залегают на отложениях верхнекембрийской формации. Преобразование первых в пределах тектонических зон выражается в нарушении сплошности массивов горных пород. Разрушенный массив является средой развития процессов выветривания, суффозии, карста. В то же время увеличивается коллекторская и фильтрационная способность пород. С одной стороны, это вызывает их обводненность, влияющую в свою очередь на интенсивность развития оползней, карста, а с другой стороны, раздробленные массивы горных пород определяют «окна» питания и пути разгрузки водных потоков, обусловливая наледеобразование и проявление суффозии. Преобразование глинистых красноцветов выражается в раздробленности пород, сопровождаемой выносом солей, увеличением дисперсности и влагоемкости, появлением способности к пластическим деформациям и, следовательно, потерей несущей способности. Создаются условия для развития оползневого процесса.

Прежде всего в трещинно-ослабленных зонах начали проявляться процессы эрозии и выветривания, что способствовало развитию других экзогенных процессов, ко-

торые в настоящее время определяют условия освоения района месторождения.

Связь эрозионных процессов с разрывными нарушениями общеизвестна: обычно долины наследуют особенности тектонических зон, выраженные в повышенной раздробленности. Эти зоны за счет ускоренного размыва определяют формирование крутых склонов водотоков различного ранга. При этом возможно развитие гравитационных процессов.

Трещинно-ослабленные зоны являются благоприятной средой и для развития процессов выветривания. На площади распространения пород усть-кутской свиты ордовика, отличающихся обычно маломощным чехлом (1,5—4 м) выветрелых пород, происходит увеличение мощности последних по мере увеличения плотности линеаментов. Зона выветривания максимальной (16—20 м) мощности отмечена на участках пересечения разнонаправленных трещинно-ослабленных зон в вершине руч. Солонечного. В наибольшей степени влияние трещинно-ослабленных зон на выветривание проявилось в пределах распространения глинистых красноцветов верхнего кембрия. На участках с повышенной ($> 1{,}5$ км/км^2) плотностью линеаментов вскрытая мощность измененных пород составляет 35—57 м. Несущая способность этих пород значительно снижена по сравнению с породами на участках с минимальной плотностью линеаментов. Породы легко разрушаются и оплывают при взаимодействии с водой, способствуя развитию плоскостного смыва и солифлюкции. Из-за слабой водопроницаемости пород дисперсной зоны выветривания, с ними часто связано заболачивание нижних частей речных долин. При дополнительных нагрузках выветрелые разности становятся ползучими, что является причиной деформации одного из отвалов Коршуновского ГОКа.

Как показано на рис. 5, наибольшее развитие экзогенных процессов приурочено к двум участкам долины р. Коршунихи, расположенным восточнее и юго-западнее месторождения. Здесь сосредоточены площади с максимальными плотностями линеаментов. В геологическом отношении эти участки идентичны: жесткие породы усть-кутской свиты ордовика залегают на красноцветах верхнего кембрия. Отличаются участки положением контакта этих пород относительно днища речной долины, что отразилось на разнообразии процессов.

Наиболее широкий спектр процессов отмечен на участке долины Коршунихи ниже месторождения, где контакт жестких и глинистых пород приподнят над урезом на 80—100 м. Ведущее место здесь принадлежит оползневому процессу. С момента вскрытия эрозией глинистых отложений на обоих берегах началось формирование блоковых оползней. Пониженная прочность пород в пределах трещинно-ослабленных зон левобережья определила постоянный усиленный его размыв, в результате оползни получили здесь широкое развитие. Процесс захватил склон на расстояние до 1 км. Выдержанные по простиранию оползневые рвы наследуют преобладающие направления трещинно-ослабленных зон, имеют ширину до 5—10 м, глубину — до 10—15 м и вертикальные стенки. Рвы рассекают склон на 5—6 блоков, фронтальные из которых испытали сдвиговые деформации. К этому участку приурочен и техногенный оползень. Длительное развитие оползневых деформаций и современная их активность связаны с постоянной обводненностью отложений усть-кутской свиты.

В долине р. Коршунихи выше месторождения контакт жестких и глинистых пород располагается на уровне эрозионного вреза, что определило сравнительно молодой возраст оползневых форм. Оползневые рвы отличаются прерывистостью в плане, меньшей (до 3 км) глубиной, пологими бортами.

Указанные участки характеризуются также широким развитием карбонатного карста в виде поверхностных и подземных форм. Учитывая слабую растворимость отложений усть-кутской свиты нижнего ордовика, можно предположить, что поверхностные формы карста могли образоваться только в условиях интенсивной раздробленности пород в узлах пересечений широтной и северо-восточной трещинно-ослабленных зон. В других условиях карстовый процесс не выходит на поверхность, образуя «карманы» измененных пород. Подобная ситуация отмечается на левобережье р. Коршунихи ниже устья руч. Сухого, где широтная зона рассекается субмеридиональной зоной прерывистого характера. Высокое положение водоупора на первом участке определило разгрузку водоносного горизонта на склоне и образование здесь ключевых наледей. На втором участке разгрузка осуществляется в днище долины, поэтому для него характерно формирование речных наледей. Специфической особенностью перво-

го участка является также широкое развитие островов многолетнемерзлых пород.

На связь техногенных процессов с трещинно-ослабленными зонами указывает состояние берегов хвостохранилища. Последнее расположено в пределах субмеридиональной зоны, отличающейся разорванностью на отрезки, которые сдвигаются относительно друг друга. Повышенная плотность линеаментов вдоль зоны определила высокую степень раздробленности и соответственно проницаемости пород, а также пути фильтрации водных потоков. Появление дополнительной области питания в результате создания хвостохранилища вызвало образование провалов вследствие вымыва заполнителя из трещиноватых зон. На пути движения вновь образованных водных потоков наблюдается наледеобразование, а в летний период — подтопление некоторых фундаментов обогатительной фабрики.

Таким образом, трещинно-ослабленные зоны, определяя пространственную изменчивость прочностных свойств пород и их обводненность, создают условия для развития природных и техногенных геологических процессов. Крупные зоны, участки максимальной густоты линеаментов и узлы пересечения зон следует рассматривать как площади возможных проявлений и активизации экзогенных процессов. Поэтому выявление таких зон позволит целенаправленно проектировать разведочные работы и повысить их информативность для решения вопросов размещения объектов горно-добывающих предприятий на аналогичных месторождениях.

Глава 3

ПРОГНОЗ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

§ 1. Формирование береговых отмелей Ангарских водохранилищ при различном уровенном режиме

В настоящее время на берегах Иркутского, Братского, Усть-Илимского водохранилищ на Ангаре начали развиваться такие процессы, как размыв, перемещение и акку-

муляция его продуктов. Абразия, перемещение и отложение наносов являются процессами, определяющими формирование береговой отмели. Другие процессы, развитые в береговой зоне, в большинстве случаев не оказывают большого влияния на характер их формирования. Интенсивность проявления процессов зависит от геолого-геоморфологического строения береговых склонов и волновых условий на прилегающей части акватории. Большое влияние оказывает уровенный режим водоема, и в частности амплитуда колебания, внутригодовой и многолетний ход уровня воды. Ниже кратко рассматриваются некоторые особенности формирования отмелей водохранилищ, определяемые уровенным режимом, который обусловлен водностью питающих рек и характером работы ГЭС.

Иркутское водохранилище по режиму эксплуатации является сезонным с внутригодовой амплитудой колебания до 3 м. Ежегодные колебания происходят на фоне многолетнего изменения стока воды из оз. Байкал. Сложение многолетнего и ежегодного колебаний приводит к тому, что их амплитуда увеличивается до 5 м. Во внутригодовом разрезе минимальные уровни отмечаются обычно в апреле, затем до середины августа идет постепенный подъем, сменяющийся понижением, продолжающимся до апреля. В период с 1973 по 1982 г. уровень водохранилища постепенно понижался и минимальная отметка в 1982 г. была на 4,6 м ниже НПГ, а наиболее высокий уровень был на 1,8 м ниже НПГ. В осенний период 1982 г. уровень поднялся и находился в пределах НПГ.

Усть-Илимское водохранилище также является регулятором сезонного стока. Однако в его режиме имеются существенные отличия. Прежде всего меньшая амплитуда колебания уровня, которая за период эксплуатации не превышала 3,6 м. В годовом ходе отмечается два периода высокого стояния уровня и два — низкого (рис. 6). При этом максимально высокие уровни отмечаются в конце мая — начале июня. Второй, менее высокий пик фиксируется в декабре. Подобный ход уровня определяет весьма малую волновую нагрузку на береговые склоны в пределах отметки НПГ. Гидродинамические условия складываются таким образом, что в течение наиболее штормового периода уровень постепенно понижается, а в подобных условиях темпы размыва резко снижаются. При рассмотрении режима уровня с позиций статистических характе-

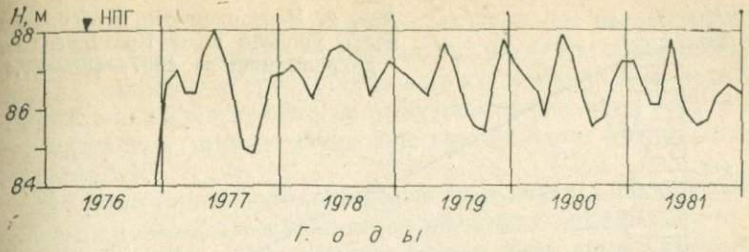


Рис. 6. Среднемесячные уровни воды Усть-Илимского водохранилища (станция Усть-Илимская ГЭС).

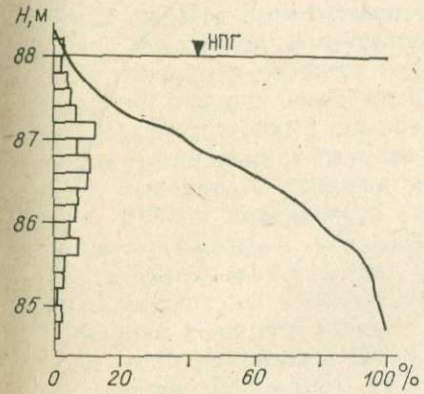


Рис. 7. Повторяемость и обеспеченность уровней воды на Усть-Илимском водохранилище за 1976—1981 гг.

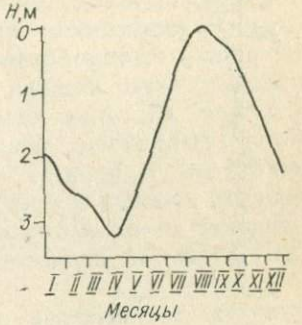


Рис. 8. Годовой ход уровня воды Братского водохранилища.

ристик (рис. 7) видно, что они не указывают на какие-либо возможные изменения темпов развития берегоформирующих процессов.

Уровенный режим Братского водохранилища оказывается более сложным в сравнении с предыдущими. Это водохранилище многолетнего регулирования, на котором проектом предусмотрена 10-метровая сработка. На колебания многолетнего характера накладываются ежегодные с амплитудой до 3 м. В годовом ходе (рис. 8) отмечается один минимум положения уровня, приуроченный к весеннему периоду, и один максимум в августе — сентябре. В течение всего периода открытой воды уровень постепенно повышается, а в наиболее штормовой осенний период оказывается на максимальных отметках. В подобных ус-

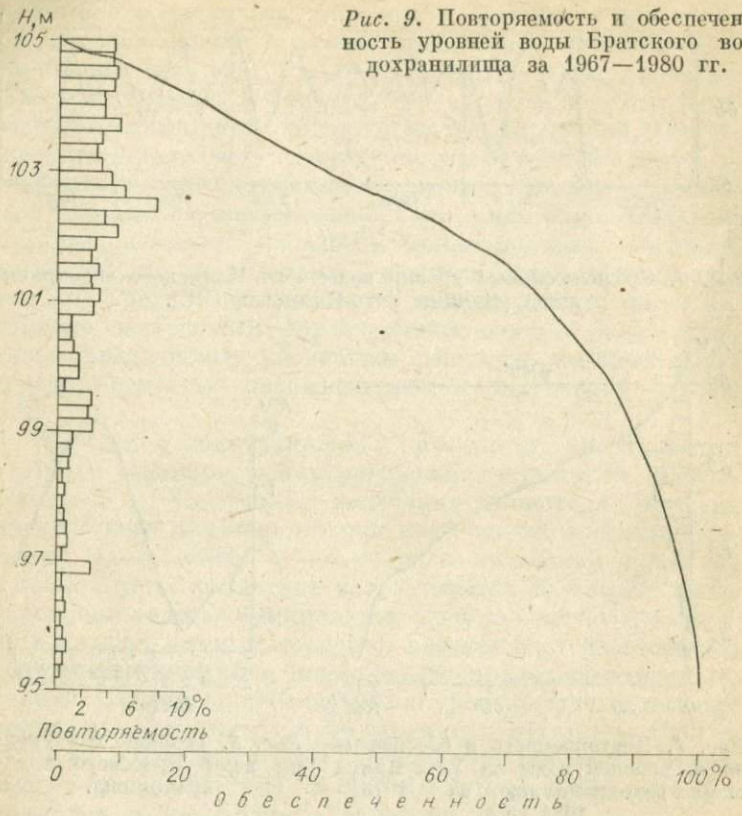


Рис. 9. Повторяемость и обеспеченность уровней воды Братского водохранилища за 1967—1980 гг.

ловиях темпы размыва берегов оказываются максимальными. В многолетнем разрезе в режиме уровня отмечаются два периода с высоким положением уровня — 1967, 1968 и 1971—1974 гг. и два периода с низкими уровнями — 1969, 1970 и 1975—1981 гг. Наиболее низкие уровни отмечались в зимние периоды 1980 и 1981 гг., когда они достигли отметок, предусмотренных проектом. Статистические характеристики уровенного режима водохранилища за весь период эксплуатации показаны на рис. 9. Повторяемость уровней в пределах всей зоны сработки приведена для интервалов в 20 см. Как видно, наибольшая повторяемость приходится на уровни верхней трехметровой призмы сработки. Однако даже в этой призме повторяемость выделенных интервалов не превышает 7%, а преобладающее количество имеет повторяемость 3—5%.

Различия в уровенном режиме определяют своеобразие формирования береговых отмелей и развитие некоторых других процессов, распространенных в береговой зоне. Ниже приводятся некоторые особенности развития берегоформирующих процессов на водохранилищах Ангарского каскада ГЭС.

На Иркутском водохранилище при зимних сработках уровня происходит осушение прибрежных отмелей на величину 23—90 м. При весенне-летнем повышении уровня происходит смыв верхнего слоя с поверхности осушаемой отмели. Мощность ежегодно смываемого слоя составляет 10—25 см. При этом примерно 50% мощности слоя составляют отложения в «коренном» залегании, а вторая, верхняя, половина сложена наносами, отложившимися в предыдущий период более высокого положения уровня. В результате ежегодных смывов поверхностного слоя постепенно увеличивается глубина в каждой точке отмели в периоды высокого положения уровня воды. За период с 1961 по 1973 г. поверхность отмелей, сложенных лессовидными суглинками, углубилась примерно на 1,0 м. В результате на всех участках берегов в рыхлых отложениях не отмечалось уменьшение интенсивности размыва, а суммарная величина размыва составила 27—30 м [Иркутское водохранилище, 1980].

В период 1973—1981 гг., в условиях постепенно опускающегося уровня воды, на поверхности осушающихся частей отмели образовались вторичные уступы высотой до 0,2 м, фиксирующие положение уреза водохранилища в отдельные штормовые сезоны или годы. В течение всего периода происходил размыв береговых отмелей и их углубление. Размыв первичных береговых уступов был менее интенсивным. Отмели в течение всего периода были преимущественно абразионными. Ширина размыва за весь период эксплуатации на берегах, сложенных лессовидными суглинками, достигла 50—60 м, а на берегах в песчаниках юрского возраста не превысила 10 м.

Формирование отмелей на берегах Усть-Илимского водохранилища происходит при уровенном режиме, не способствующем интенсивному размыву береговых склонов. Водохранилище вскрывается ото льда при высоком уровне и минимальной интенсивности ветрового волнения. В течение летнего сезона при постоянном пониженном уровне отмечается слабый размыв отложений отмели и перемещение наносов преимущественно на большую глуби-

ну. В наиболее штормовой период уровень находится на минимальных отметках, и проявляющиеся размывы деформируют в основном отмель и не разрушают участки береговых склонов на отметках НПГ и выше. Осеннее повышение уровня происходит при наступлении отрицательных температур воздуха, когда образуются забереги и начинается промораживание осушенных частей отмелей, и в этом случае размыв берегов практически отсутствует. Из изложенного следует, что при таком режиме уровня воды весьма слабо проявляются размывы берегов на отметках НПГ. В начальной стадии эксплуатации водохранилища размываются береговые склоны на отметках уровней сработки. В связи с этим отмечается довольно медленное увеличение уклонов отмели в пределах НПГ и подготавливаются благоприятные условия для более интенсивного размыва в будущем (рис. 10). Однако здесь интенсивность размыва берегов значительно слабее, чем на Иркутском и Братском водохранилищах.

Формирование отмелей на Братском и Иркутском водохранилищах аналогично. И на том и на другом водоеме

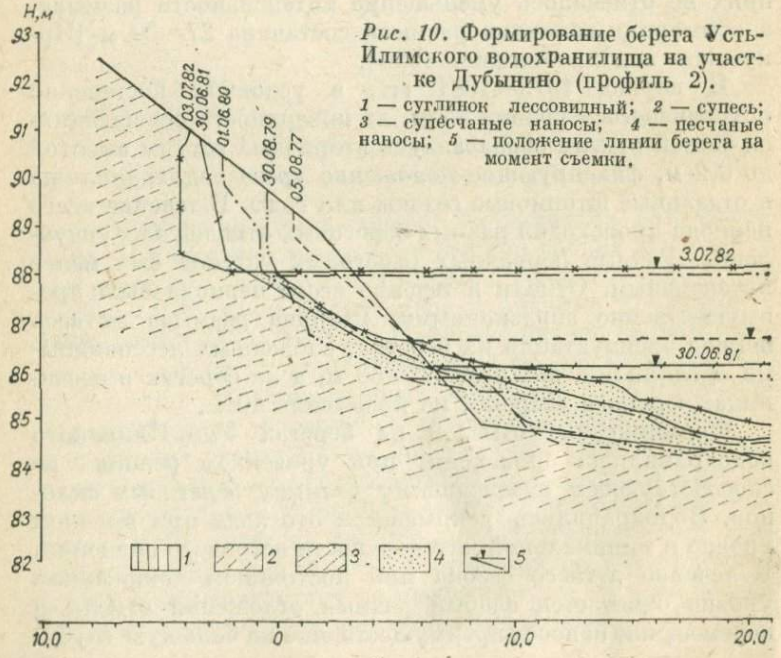


Рис. 10. Формирование берега Усть-Илимского водохранилища на участке Дубынино (профиль 2).

1 — суглинок лессовидный; *2* — супесь; *3* — супесчаные наносы; *4* — песчаные наносы; *5* — положение линии берега на момент съемки.

уровни воды в осенний штормовой период оказываются на наиболее высоких отметках. Однако значительная величина понижения уровня в многолетнем разрезе определяет и важные особенности. Различия заключаются в том, что в первые годы наполнения водохранилища в период высокого положения уровня преобладало поперечное перемещение наносов. В пределах внешнего края отмели откладывалось до 60—80% объема размытых горных пород, формируя аккумулятивную призму мощностью до 2—3 м, значительно увеличивающую ширину отмели и уменьшающую ее уклон. Так, параметры отмели (табл. 3.1) имели следующие размеры:

	Ширина, м	Уклон, °
В лессовидных суглинках на приглубых берегах	До 35	До 10
» отмелых »	60—80	2,5
В супесчаных отложениях	До 50	До 4

При размыве склонов, сложенных скальными и полускальными породами ангарской свиты кембрия, ширина отмелей не превышала 5—7 м при углах наклона 8—20°. При размыве пород верхоленской свиты кембрия ширина отмели достигала 20—25 м, угол наклона равнялся 10—11°. Ширина отмели и наклон в породах мамырской свиты колебались от 13 до 44 м и от 5,5 до 7,0° соответственно. На сформировавшихся широких отмелях появились вдольбереговые потоки наносов и образовались достаточно крупные аккумулятивные формы в устьевых частях заливов.

В 1969—1970 гг. уровень водохранилища понижался и его наиболее высокое положение было на 3,0 и 4,5 м ниже НПГ. В этот период весьма интенсивно размывались ранее сформировавшиеся отмели. Ширина их резко уменьшилась, и преобладаю-

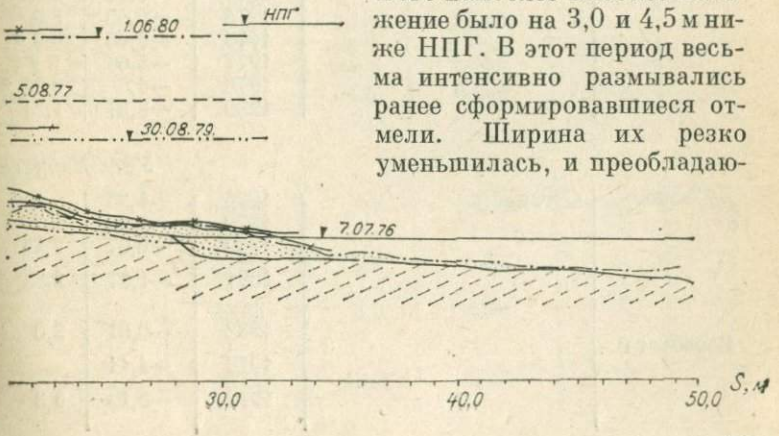


Таблица 3.1

Морфометрические показатели состояния берегов на участках Братского и Усть-Илимского водохранилищ

Участок	Геологическое строение	Год	Отметка уровня от НПГ, м	Высота уступов, м	Ширина отмели от уреза воды до глубины 3 м, м	Уклон отмели, t_q	Ширина зоны осушки, м	Уклон зоны осушки	Объем размыва, м³	Объем аккумуляции, м³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				Братское водо	*хранилище*					
Устье Ии	Песчаники нижнемамырской подсвиты ордовика	1967	—2,22	3,3	11,8	0,254	—	—		
		1968	—0,48	3,7	29,8	0,101	—	—	115	14
		1969	—4,64	1,5 *	13,2	0,227	26,5	0,175		
		1970	—2,61	1,1 *	23,2	0,129	13,0	0,201	36	20
		1971	—0,56	4,4	25,0	0,120	—	—		
		1974	—0,37	4,8	28,0	0,107	—	—	82	6
		1975	—1,93	0,25 *	20,0	0,150	21,0	0,092		
		1977	—4,19	0 *	16,5	0,182	33,2	0,126	26	21
		1978	—4,56	0 *	18,0	0,167	32,0	0,143		
		1980	—8,49	0,85 *	9,0	0,333	55,3	0,154	54	9
Миндей	Песчаники верхнемамырской подсвиты ордовика	1968	—0,64	0,8	17,5	0,171	6,3	0,102	19	12
		1969	—4,07	0 *	15,0	0,200	29,1	0,140		
		1970	—2,87	0,55 *	24,0	0,125	18,6	0,154	8	6
		1971	—0,62	0,6	28,0	0,107	4,1	0,151		
		1974	—1,53	2,1	28,0	0,107	15,9	0,096	54	36
		1975	—3,37	0 *	16,0	0,188	34,7	0,097		
		1977	—4,42	0 *	10,0	0,300	41,6	0,106	32	6
		1978	—4,76	0,45 *	14,5	0,207	40,1	0,119		
		1980	—8,53	0,90 *	8,0	0,375	60,1	0,142	15	26
Первомайский	Суглинок лессовидный	1967	—0,24	—	59,0	0,051	—	—		
		1968	—0,75	3,5	61,0	0,049	—	—	220	44
		1969	—4,03	2,0 *	26,5	0,113	19,2	0,210		
		1970	—3,01	1,3 *	39,0	0,077	11,9	0,253	53	—
		1971	—0,70	3,8	36,0	0,083	—	—		
		1974	—0,65	3,9	86,0	0,035	—	—	264	156
		1975	—3,05	0,9 *	43,5	0,069	50,8	0,060		
		1977	—3,66	0 *	41,0	0,073	53,5	0,068	42	1
		1978	—4,8	0,27 *	23,0	0,130	69,3	0,069		
		1980	—8,37	1,21	10,0	0,300	94,6	0,089	60	29
				Усть-Илимское	*водохранилище*					
Дубынино	Суглинок	1976	—4,25							
		1979	—2,20	1,7	—	0,075	3,7	0,243	10	2
		1980	—0,07	2,45	23,7	0,075	—	—	13	10
		1981	—1,97	2,85	16,0 / (1,55) **	0,100	7,8	0,256	14	11
		1982	—0,61	3,0	22,2	0,135	3,5	0,171	18	17
Воробьево		1976	—4,11							
		1979	—2,19	0,3	8,9 / (0,5) **	0,056	18,3	0,055	10	1

1	2	3	4	5
		1980	—0,04	0,85
		1981	—1,96	0,9
		1982	—1,15	0,9
Нижнеилимский	Песчаники, алевролиты братской свиты	1977 1982	—0,22 —0,47	3,9
Брусничный	Песчано-галечные	1977 1982	—0,22 —0,47	1,0

Окончание табл. 3.1

6	7	8	9	10	11
29,9 / (2,6) **	0,084	—	—	15	5
11,0 / (0,4) **	0,036	23,5	0,064	17	4
—	0,053	—	—	18	1
—	0,060	1,2	0,750	57	1
19,1	0,157	1,9	0,290	14	1

* Высота вторичных уступов, м.
** В числителе — ширина отмели, м, в знаменателе — соответствующая глубина, м.

щими путями перемещения размытого материала вновь оказались поперечные потоки, переносящие наносы на большие глубины. При размыве отмелей на них образовались вторичные береговые уступы высотой до 2,5 м. В течение этого периода все наносы, отложившиеся при высоком уровне, были смыты. Кроме того, оказался смытым слой «коренных» отложений. Мощность смытого слоя определяется устойчивостью отложений к размыву. На отмелях в лессовидных суглинках мощность слоя достигает 2,5 м, в скальных и полускальных породах — около 1,0 м (рис. 11). В конце этого периода урез водохранилища на размываемых берегах почти повсеместно переместился к основанию первичного уступа.

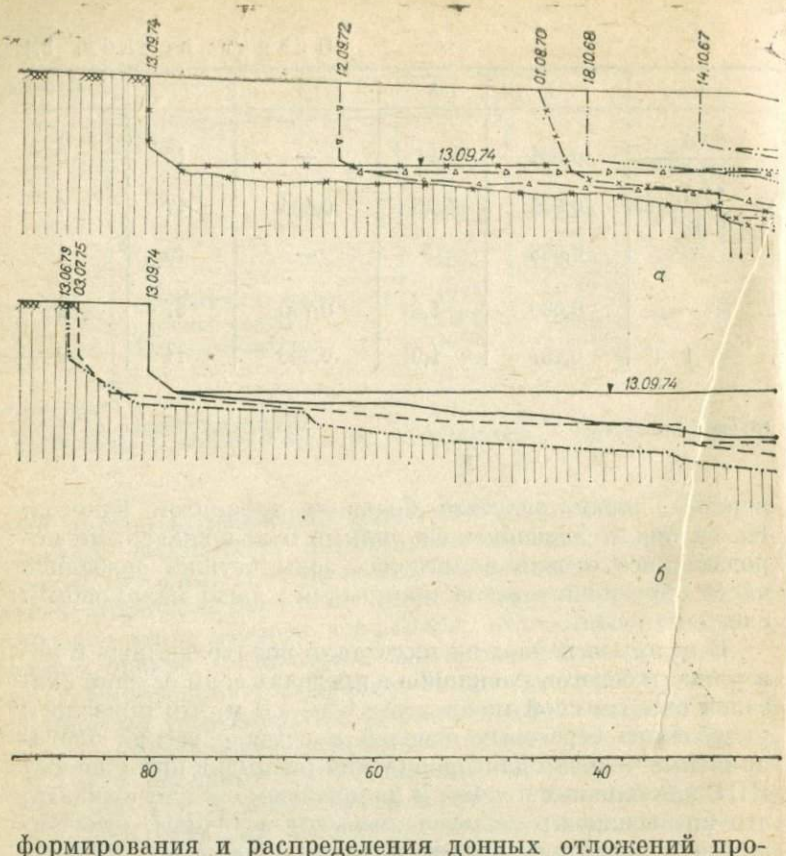
Следующий период высокого положения уровня (1971—1974 гг.) характеризовался значительным увеличением ширины отмели и уменьшением ее уклонов. Интенсивно размывались береговые уступы, и на участках с повышенной абразией объемы размыва достигали 270 м³ с 1 пог. м берега. В лессовидных суглинках ширина отмели увеличилась до 140 м, а уклоны уменьшились до 1,5°. В трудноразмываемых породах ширина отмели составила 50 м.

В 1975—1981 гг. уровень водохранилища вновь постепенно понижался и к концу периода оказался на 10 м ниже НПГ. Как и в первый период понижения уровня, происходило постепенное перемещение на большие глубины ранее отложившихся наносов и срезание слоя «коренных» отложений, т. е. углубление отмели. Конец этого периода характеризуется большим дефицитом наносов. На склонах, сложенных скальными и полускальными породами, все отмели в пределах зоны осушки оказались чисто абразионными, не прикрытыми даже маломощным слоем наносов.

В целом за период эксплуатации водохранилища с поверхности береговых склонов в пределах зоны осушки оказался смытым слой мощностью 1,5—4,0 м, что привело к углублению береговых отмелей и создало весьма благоприятные условия для проявления размывов при уровнях НПГ или близких к нему. В дальнейшем следует ожидать, что интенсивность размыва превысит величины, отмечавшиеся в последний период высокого положения уровня, и приблизится к величинам начальной стадии формирования берегов.

§ 2. К прогнозу заиления Братского водохранилища при низком уровенном режиме

Как уже отмечалось, условия образования донных отложений водохранилища определяются в основном величиной гидродинамической активности, составом и свойствами пород берегового уступа, морфологией и составом отложений прибрежной отмели. При изменении или исключении одного из этих факторов перестраивается весь процесс осадконакопления. Подобная ситуация в характере



формирования и распределения донных отложений произошла на Братском водохранилище, где с 1975 по 1982 г. наблюдался низкий уровенный режим. В результате этого, особенно в расширенных частях водохранилища (Балаганском, Заярском, Долоновском и др.), уменьшились площадь водного зеркала, объем водной массы и увеличилась проточность.

Источниками образования донных отложений на Братском водохранилище при низких уровнях являются в основном материал размыва отмелей, твердый речной сток и продукты распада растительности. При этом абразия — процесс размыва береговых уступов, самый значительный источник осадочных образований,— отсутствует, что существенно сокращает приходную составляющую донных отложений. Так, в Балаганском расширении такое сокращение составляет примерно 300 тыс. м^3 в год, в Калтукском рас-

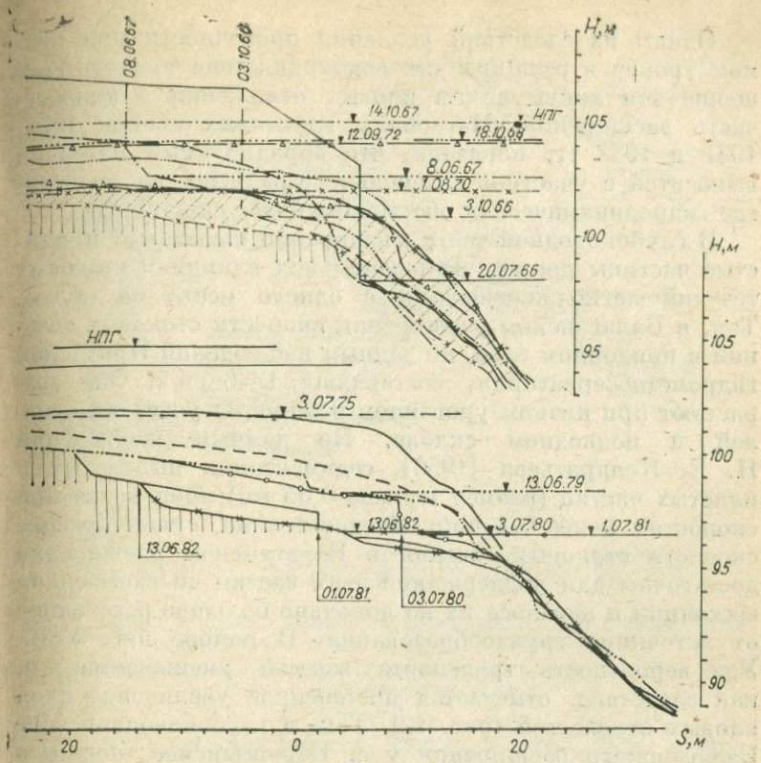


Рис. 11. Формирование берега Братского водохранилища на участке Первомайское:

а — 1966—1974 гг.; *б* — 1974—1982 гг. Усл. обозн. см. рис. 10.

ширении — 265 тыс. м³. На фоне этого в пределах подводного склона резко возрастает доля поступления материала за счет размыва отложений прибрежных отмелей, меньшее его количество идет на седиментацию в глубоководной части водохранилища. Осадконакопление за счет твердого речного стока и продуктов распада растительности остается постоянным как при низком уровне, так и при уровне, близком к НПГ.

Преобладающим типом отложений, образовавшихся в глубоководной части расширений, являются мелкоалевритовые и алевритово-глинистые илы, т. е. иловые отложения [Карнаухова, 1980].

Одним из следствий усиления проточности при низком уровне в расширениях водохранилища явилось смещение зон аккумуляции иловых отложений в нижнюю часть расширений. Материалы грунтовых съемок 1977, 1981 и 1982 гг. показали, что абрадируемый материал выносится с участков интенсивного размыва на участки, где гидродинамическая обстановка более спокойна.

В глубоководной части расширений пылеватые и илистые частицы донных отложений под влиянием стоковых течений легко переносятся с одного места на другое. Так, в Балаганском расширении скорости стоковых течений в придонном слое, по данным наблюдений Иркутской гидрометобсерватории, составляют 1—6 см/с. Они возрастают при низком уровенном режиме на участках отмелей и подводном склоне. По данным наблюдений Н. Е. Кондратьева [1956], седиментация пылеватых и илистых частиц (размер меньше 0,05 мм) происходит при скоростях менее 0,4 см/с. Следовательно, существующие скорости стоковых течений в Балаганском расширении достаточны для поддержания этих частиц во взвешенном состоянии и переноса их на довольно большое расстояние от источника грунтообразования. В районе пос. Усть-Уда вероятность транспорта взвесей уменьшается, и, как следствие, отмечается постепенное увеличение слоя иловых отложений (рис. 12). Так, в глубоководной зоне Балаганского расширения у с. Первомайское мощность слоя иловых отложений при уровне, близком к НПГ, составляла 8—10 см, тогда как в районе пос. Усть-Уды заиление дна водохранилища практически не отмечалось. В 1981 г. в районе с. Первомайское иловые отложения мощностью всего 1—3 см наблюдались только по бывшему руслу р. Ангары (глубоководная зона). На участках затопленных речных террас иловые отложения были смыты полностью. Севернее с. Балаганска дно при уровне, близком к НГП, было покрыто наилком толщиной 0,5 см, а в 1982 г. мощность иловых отложений увеличилась уже до 3—4 см (см. рис. 12).

В Заярском, Долоновском и Калтукском расширениях процесс смещения зон аккумуляции иловых отложений при низком уровне проявляется слабо вследствие глубоководности и малой их проточности.

В узких заливах при понижении уровня и увеличении проточности возрастает вынос материала и происходит накопление иловых отложений на устьевых участках.

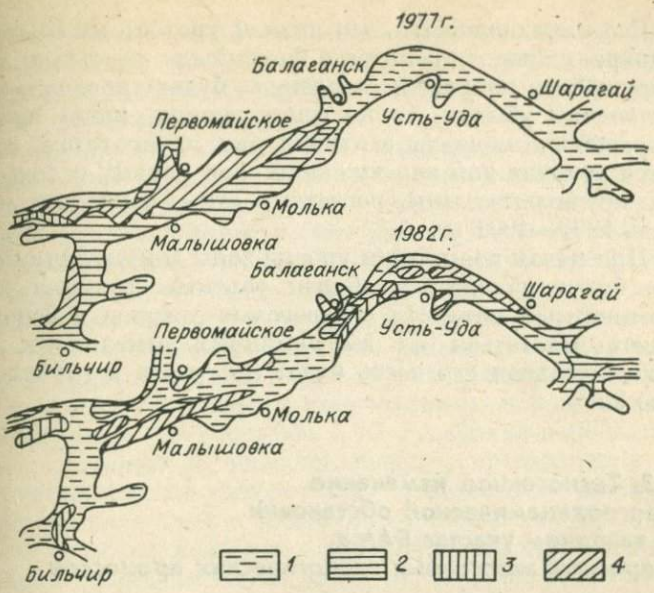


Рис. 12. Схема заиления Братского водохранилища в районе Балаганского расширения за 1977 и 1982 гг.

1 — мощность илов менее 1 см; *2* — то же, от 2 до 5 см; *3* — то же, от 6 до 10 см; *4* — то же, более 10 см.

Так, в устье заливов Одисса, Татон, Каткон, Када и других мощность иловых отложений к 1982 г. достигла 10 см и более. Ранее же мощность илов составляла всего 0,5—1,0 см.

Как показывают наши наблюдения, вследствие увеличения проточности в глубоководной зоне и уменьшения глубины водохранилища постепенно сокращаются площади заиления. Например, к 1977 г. в Балаганском расширении илы были распространены на площади 545,5 км², что составляло около 50% территории дна расширения при средней мощности отложений 6 см. За четыре последующих года площадь, занятая илами, уменьшилась до 292,4 км². В 1982 г. площадь заиления сократилась еще примерно на 65 км². За счет увеличения степени уплотнения уменьшились и объемы иловых отложений. В 1981 г. объем их равнялся 1591 тыс. м³, а в 1982 г.— 1289 тыс. Темп же заиления как при низком уровне, так и при НГП остался постоянным — в среднем по всему расширению около 3 мм/год.

Если предположить, что низкий уровень на Братском водохранилище сохранится в ближайшие несколько лет и сокращение площадей зарления будет продолжаться, постепенно убывая, то наступит период, когда процесс сокращения площади зарления дна прекратится, создадутся условия для наращивания слоя иловых отложений. По предварительным расчетам, этим периодом могут стать 1990—1991 гг.

При новом повышении уровня зоны аккумуляции осадков будут находиться вблизи объектов размыва, т. е. размываемый материал с береговых уступов в основном станет отлагаться на выработанных отмелях, и лишь незначительная его часть будет поступать в глубоководную зону.

§ 3. Техногенное изменение экзогеодинамической обстановки на западном участке БАМа и прогноз экзогенных геологических процессов

Изучение и прогноз экзогенных геологических процессов осваиваемых территорий представляет важную задачу как с инженерных, так и с экологических позиций. В зоне БАМ значение этой проблемы особенно ощутимо, во-первых, из-за большого разнообразия и сложности условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений, во-вторых, из-за повышенной, по всеобщему признанию, уязвимости природных комплексов и, в-третьих, из-за чрезвычайной трудности предсказания в некоторых ситуациях реакции многокомпонентных геосистем на инженерно-хозяйственные мероприятия.

Сведения, накопленные за время строительства и эксплуатации железной дороги Усть-Кут — Даван и притрассовых сооружений, позволяют в определенной мере оценить изменчивость экзогеодинамической обстановки, техногенные преобразования некоторых типов геологических процессов и обрисовать существенные для этой территории проблемы, связанные с геодинамическими прогнозами.

Западный участок БАМа пересекает три крупных природно-территориальных комплекса: Ангаро-Ленское плато, Предбайкальский прогиб, Байкальскую рифтовую зону. Они существенно отличаются по всему набору при-

родных условий и факторов, своеобразные сочетания которых определяют не только типы, локализацию и интенсивность процессов, но и различную их реакцию на техногенное вмешательство.

Геологическое строение и инженерно-геологические условия этой территории за последние годы изучены и освещены довольно подробно. Здесь целесообразно отметить те их особенности, которые определяют развитие экзогенных геологических процессов: глубокое расчленение рельефа, особенно Байкальской рифтовой зоны, обуславливающее наличие крутых высоких склонов и соответственно высокую энергию рельефа; чередование в разрезе (плато и прогиба) жестких массивных скальных и относительно пластичных полускальных пород; наличие карстующихся карбонатных и сульфатно-карбонатных пород; широкое и неравномерное распространение зон тектонической трещиноватости; особенности разгрузки трещинно-пластовых и трещинно-карстовых вод ордовика, образующих на контакте с водоупорными красноцветами кембрия сосредоточенные очаги на склонах и питающих грунтовый горизонт в делювии; особенности строения и состава делювия склонов глубоко врезанных речных долин Лены, Таюры и др., состоящего из водопроницаемого верхнего и водоупорного нижнего слоев. Для восточной части территории характерна высокая сейсмичность — от 9 баллов в осевой части Байкальского хребта до 6 у западной границы Предбайкальского прогиба. Для горной части территории немаловажна значительная (до 70—80% площади) обнаженность пород, способствующая интенсивному физическому выветриванию.

Специфические черты экзогеодинамической обстановки района связаны с распространением и характером многолетней мерзлоты. Последняя достаточно широко развита в виде островов и линз в заболоченных днищах долин, на низких террасах и склонах преимущественно северной экспозиции. Мощность многолетнемерзлых пород колеблется обычно от 4—7 до 30—50 м, температура на подошве слоя годовых колебаний — от —0,2° до —0,8°, реже — до —1,6°С. По нашим представлениям, многолетняя мерзлота в районе относится к деградационному типу, на что указывают отчетливо выраженные элементы криогенных текстур, вскрытые выработками на различных мезоформах рельефа. По-видимому, с деградацией мерзлоты связано также образование обширных участков вторичного забо-

лачивания, окружающих «сохранившиеся» острова мерзлоты.

Климат района отличается резкой континентальностью с отрицательными (—1 ÷ —4°С) среднегодовыми температурами воздуха, большими суточными (до 30—35°С) и годовыми (до 80—90°С) амплитудами и заметно варьирующими по площади и во времени (430—900 мм/год) осадками.

В ходе естественно-исторического формирования природных комплексов в них установилось определенное динамическое равновесие, при котором развитию геологических процессов препятствовал также целый ряд условий и факторов. Среди последних целесообразно отметить преобладание (в платформенной части территории) широких уплощенных водораздельных поверхностей, морфология которых неблагоприятна для гравитационных и гидродинамических процессов; отсутствие многолетней мерзлоты на водоразделах, склонах южных экспозиций, нередко на террасах; почти сплошная задернованность и залесенность поверхности (в пределах платформы); широкое распространение в долинах мохово-торфяного покрова, «консервирующего» многолетнюю мерзлоту; сосредоточенная или субаквальная разгрузка подземных вод, в определенных условиях не благоприятствующая наледеобразованию; низкая температура трещинно-карстовых вод (обычно не выше 1,5—2,5°С), понижающая их растворяющую способность.

В естественных условиях в притрассовой зоне БАМ развиты мерзлотные, гидродинамические, гравитационные, карстово-суффозионные, биогенные процессы и явления. Строительство железной дороги и притрассовых сооружений вызвало существенные, хотя и узко локализованные изменения морфологии и ландшафта, которые повлекли за собой изменение условий теплообмена; условий стока и разгрузки поверхностных и подземных вод и соответственно перераспределение стока и инфильтрации; нарушение равновесного состояния склонов; образование наклонных поверхностей с обнаженными, легко размываемыми грунтами. Возведение насыпей и мостов в горной части изменило условия транзита селевой массы. Глубокая подрезка коренных склонов открыла для выветривания различные по составу и свойствам породы.

Хотя для размещения трассы БАМа выбран, по нашему убеждению, наиболее оптимальный вариант (в том

числе и с точки зрения геодинамики), эти изменения привели к заметной активизации, а на отдельных участках — к зарождению новых процессов и явлений. При этом скорость и масштабы реакции различных их типов весьма неодинаковы.

Наледи. В притрассовой зоне распространены наледи подземных и поверхностных вод, которые условно можно разделить на четыре разновидности:

1) ключевые склоновые наледи, связанные с сосредоточенной разгрузкой трещинно-карстовых вод нижнего ордовика;

2) ключевые и грунтово-ключевые наледи в днищах долин малых водотоков;

3) русловые наледи смешанного питания в днищах долин малых рек;

4) грунтовые наледи, периодически (в наиболее суровые малоснежные зимы) возникающие у оснований пологих склонов.

Наибольшее влияние линейное строительство оказало на наледи первой разновидности на Ленском и Таюрском склонах. Здесь изменение условий стока и разгрузки трещинно-карстовых и грунтовых вод привело к уменьшению ключевых наледей и возникновению грунтовых (с объемами льда до 18—50 тыс. м^3), вытянутых вдоль железной и автомобильной дорог и частично перекрывающих их (рис. 13). По существу, возник новый тип наледей, питающихся за счет фронтальной рассредоточенной разгрузки грунтового потока, стекающего по верхнему слою делювия в условиях мерзлотного подпора под днищами придорожных канав и траншей. Создание противоналедных сооружений (горизонтальный открытый и закрытый дренаж с отводом за пределы трассы на Ленском склоне и неглубокий вертикальный дренаж со сбросом в зону экзогенной трещиноватости на Таюрском склоне) привело к снижению объема наледей до 2—5 тыс. м^3.

На формирование наледей второй разновидности, примером которых могут служить наледи на руч. Мельничном (г. Усть-Кут) и Гремячем (верховья р. Нии), линейное строительство принципиального влияния не оказало, поскольку основная область их питания лежит вне зоны воздействия линейных сооружений. Для них характерна миграция наледной аккумуляции к искусственным сооружениям (под мостами и трубами и выше по потоку), связанная с нарушением условий циркуляции

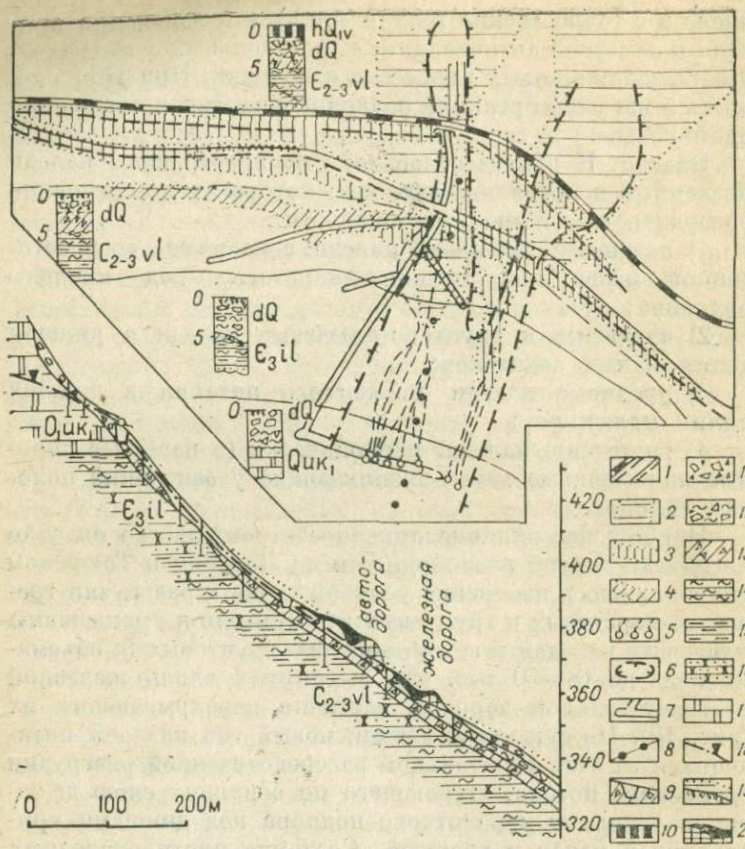


Рис. 13. **Техногенные изменения условий наледеобразования на Ленском склоне.**

1 — линейные сооружения, включающие железную и притрассовую автомобильную дороги и нагорные кюветы; *2* — ключевая наледь, формировавшаяся в естественных условиях; *3* — грунтовая наледь, возникшая после строительства линейных сооружений; *4* — место формирования той же наледи после создания противоналедных траншей; *5* — пластовый выход трещинно-карстовых вод; *6* — контур распространения многолетнемерзлых пород; *7* — противоналедные траншеи; *8* — скважины (на разрезе и колонках на схеме); *9* — противоналедная водосборная траншея; *10* — торф; *11* — глыбово-щебнистый делювий с суглинком; *12* — глыбово-щебнисто-суглинистый делювий; *13* — тяжелые суглинки и глины со щебнем и глыбами; *14* — аргиллиты; *15* — алевролиты; *16* — песчаники; *17* — доломиты; *18* — уровень подземных вод; *19* — ключевая наледь, формировавшаяся до строительства линейных сооружений; *20* — грунтовая наледь, возникшая после строительства.

поверхностного, подруслового и грунтового склонового потоков.

Русловые наледи, сосредоточенные на реках Ния и Берея, отличаются значительно большими объемами, чем наледи других разновидностей (до 1 млн. м^3). Определяющим фактором их локализации является, по-видимому, отсутствие на отдельных участках долин субаквальной разгрузки подземных вод, в то время как на смежных участках она препятствует не только наледеобразованию, но в отдельные зимы и ледоставу. Существенное значение имеют морфология русла и наличие под ним многолетнемерзлых пород, хотя последние наблюдаются относительно редко. Упорядочение русел рек в притрассовой зоне и концентрация за счет этого речного потока привели к некоторому снижению интенсивности наледеобразования и сдвигу его начала к более поздним срокам.

Возведение линейных сооружений в местах выклинивания водоносных горизонтов на склонах привело к образованию наледей на ряде участков, где ранее они не возникали. Такая наледь объемом до 4—5 тыс. м^3 возникла зимой 1975/76 г. на склоне пади Колпашной. В последующие годы эта и другие аналогичные, но меньшие по объему наледи прекратили существование. Определенную роль здесь сыграла локальная сработка ресурсов подземных вод за счет целенаправленного и сопутствующего дренажа.

В целом режим наледеобразования в районе достаточно сложен. При явной тенденции уменьшения объемов наледей в период с 1975 по 1983 г. (табл. 3.2) в отдельные годы в притрассовой зоне наблюдалось увеличение их объемов и количества.

Как показывают наблюдения, в естественных условиях и при стабильном влиянии техногенных факторов режим наледеобразования зависит от взаимодействия таких факторов, как морозность и снежность зимы, ресурсы и режим подземных и поверхностных вод, промерзание грунтов. Параметры, характеризующие эти факторы, особенно в начале наледного периода, будут иметь существенное значение для прогноза интенсивности наледеобразования, в частности максимального объема наледей, с заблаговременностью 2—4 мес. Однако ряды наблюдений для таких прогнозов еще недостаточны, так как охватывают, по существу, только ветвь «спада».

Явления, связанные с деградацией многолетней мерзлоты. Термокарст в рассматриваемом районе пред-

Максимальные объемы наледей

Участок	Период нале		
	1975/76	1976/77	1977/78
Усть-Кут (Мельничный ручей)			
Ленский склон (21 км)	45000	50106	2824 *
Колпашный (42 км)	Около 5000	420	0
Таюрский склон (60 км)	Около 18000	2775 *	810
Гремячий (127 км)			

* После устройства противоналедных сооружений.
** После «заплывания» дна противоналедной траншеи.

ставляет собой незатухающий процесс. Морфологически он выражен двумя разновидностями. Первая, упоминающаяся выше, — это довольно обширные, неправильной формы, заполненные водой понижения, чередующиеся с относительно плоскими буграми, сложенными мерзлым грунтом. По нашим представлениям, образование таких форм в днищах долин связано с неравномерным вытаиванием текстурообразующих льдов за счет общего (векового) потепления, на которое наложилось влияние многочисленных лесных пожаров, следы которых встречаются почти повсеместно.

Вторая разновидность — блюдцеобразные западины округлой или овальной формы, от 3—5 до 12—15 м в поперечнике и глубиной до 0,5—1,5 м. Их образование связано с вытаиванием линз и прослоев льда, в данном районе обычно маломощных (0,2—0,4 м).

Наблюдения за температурным режимом пород на различных элементах рельефа в течение 1977—1982 гг. выявили определенную и устойчивую тенденцию к повышению температуры как мерзлых, так и немерзлых пород в нарушенных условиях (рис. 14). На отдельных участках наблюдается исчезновение маломощных линз многолетнемерзлых пород или образование несливающейся мерзлоты. В днищах долин, где трасса БАМ проложена по так называемым «маревым» участкам (Таюра, Ния, Берея, Киренга), через 2—3 года после освоения зафиксировано появление «свежих» термокарстовых форм. Это либо относительно изометричные, но неправильные в плане

Таблица 3.2

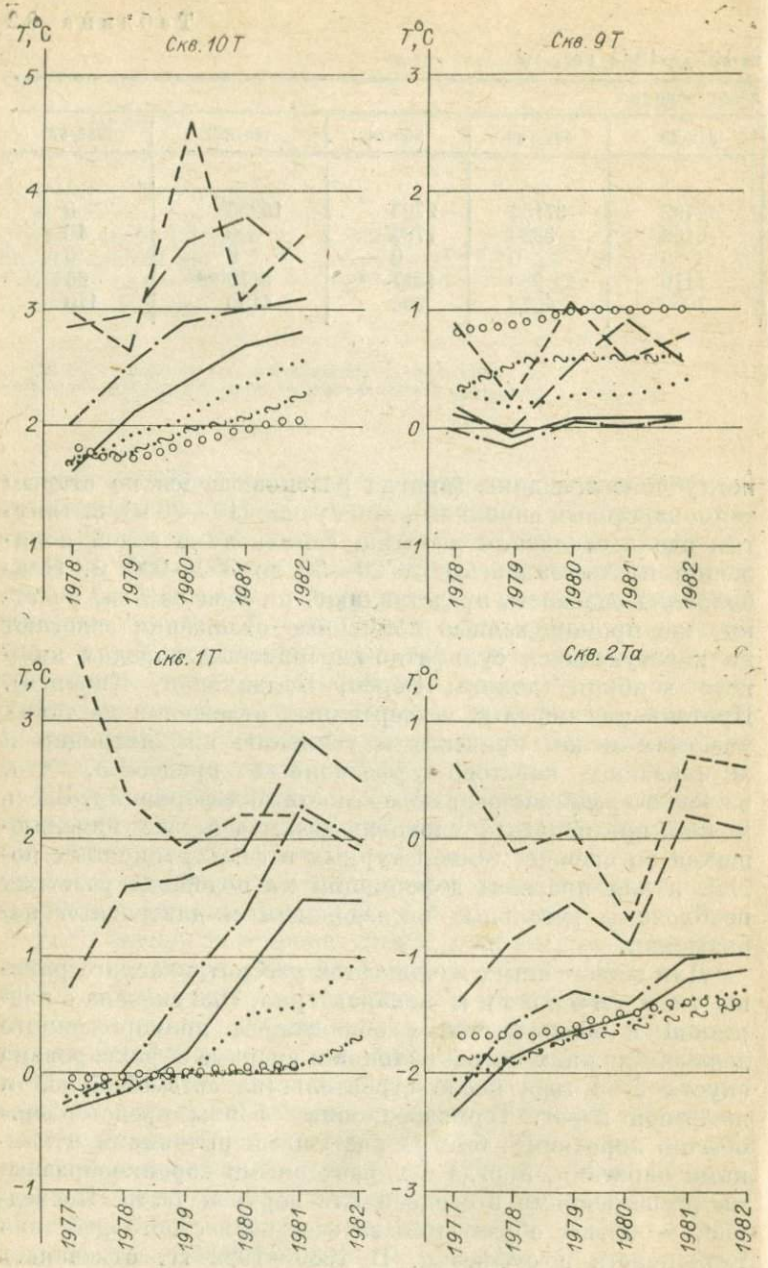
в 1975—1983 гг., м³

деобразования

1978/79	1979/80	1980/81	1981/82	1982/83
44492	37156	9703	16255	0
6156	3320	1796	900	10
0	0	0	0	0
1170	980	1517 **	3170 **	66
7050	4678	964	1190	110

неглубокие западины (иногда развивающиеся по старым термокарстовым воронкам), либо узкие (10—30 м), вытянутые вдоль основания полотна, заполненные водой понижения протяженностью от 20—50 до 300—600 м. Наибольшую опасность представляют, на наш взгляд, участки, где промороженные пойменные отложения залегают на карстующихся сульфатно-карбонатных породах нижнего кембрия (долины Береи, Балдахиньи, Киренги). Протаивание мерзлых четвертичных отложений на таких участках может привести к усилению инфильтрации и активизации карстово-суффозионных процессов, что, в свою очередь, вызовет поверхностные деформации. Здесь можно предполагать сложное взаимодействие изменяющихся во времени температурных и фильтрационных полей, и для прогноза деформаций на подобных участках необходимы детальные исследования и длительные наблюдения.

Для естественных ландшафтов рассматриваемого района термоэрозия нехарактерна. Она связана с подрезкой и искусственным обнажением промороженного делювия нижних частей склонов и впервые зафиксирована спустя 3—4 года после строительства автомобильной и железной дорог. Термоэрозионные формы представлены обычно короткими, быстро растущими рытвинами и мелкими оврагами, иногда с характерными воронкообразными расширениями в средней или верхней части. Последние, вероятно, образуются за счет совместного действия термокарста и суффозии. В 1980—1982 гг. отмечалась


Скв. 10Т
T,°C
5
4
3
2
1
1978
1979
1980
1981
1982
Скв. 9Т
T,°C
3
2
1
0
-1
1978
1979
1980
1981
1982
Скв. 1Т
T,°C
3
2
1
0
-1
1977
1978
1979
1980
1981
1982
Скв. 2Та
T,°C
1
0
-1
-2
-3
1977
1978
1979
1980
1981
1982

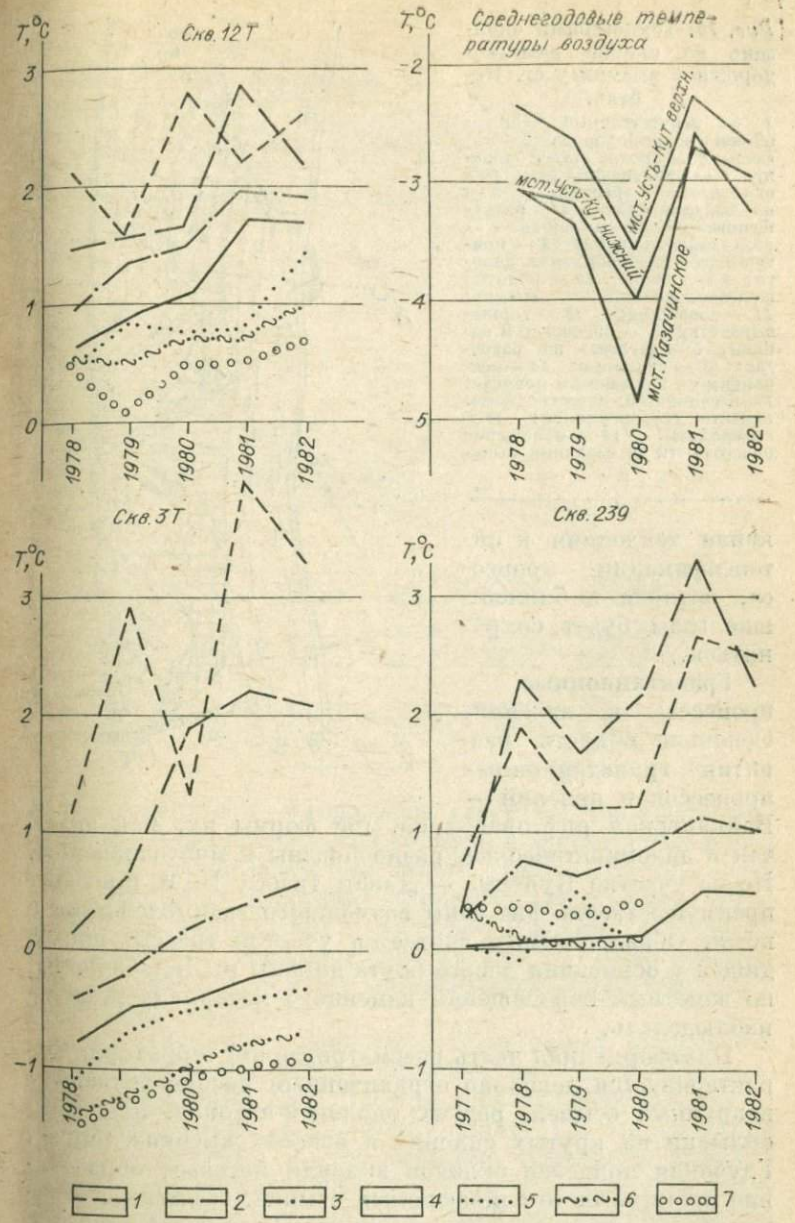


Рис. 14. Графики изменения среднегодовых температур пород. Глубина замера: *1* — 1,0 м; *2* — 2,5 м; *3* — 5,0 м; *4* — 7,5 м; *5* — 10 м; *6* — 15,0 м; *7* — 20 м.

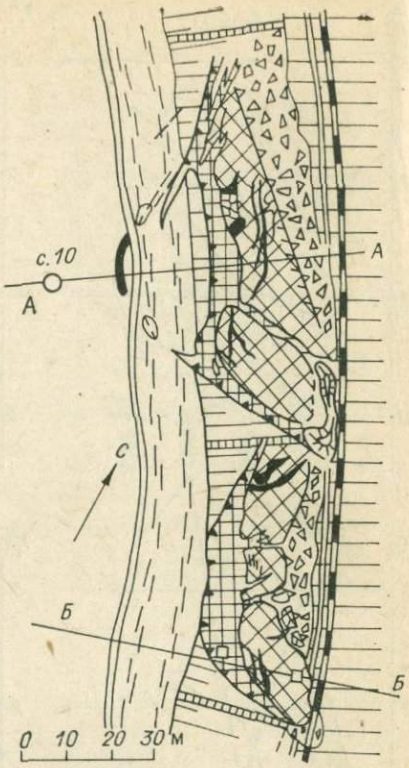


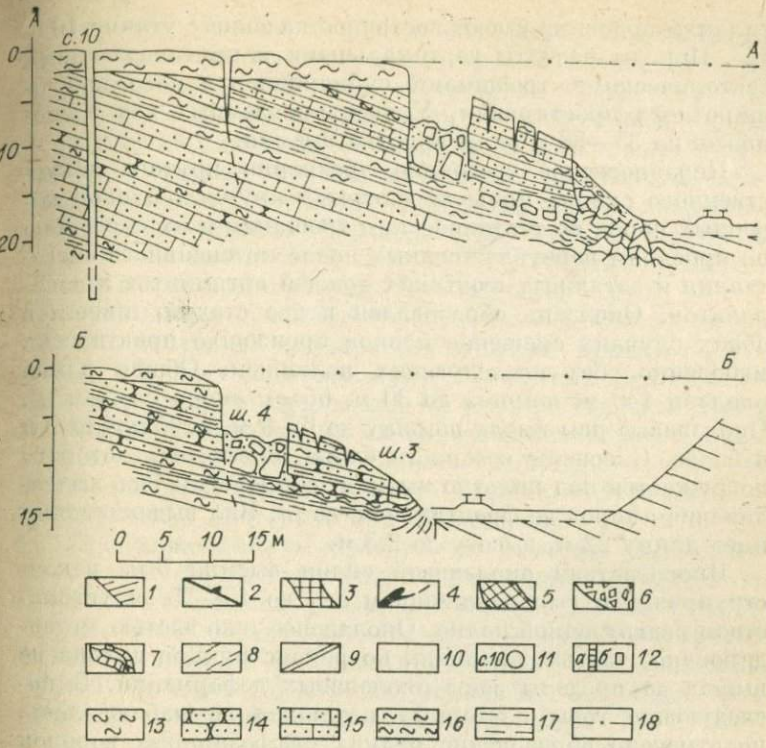
Рис. 15. Техногенный оползень на склоне железнодорожной выемки у ст. Небель.

1 — искусственный склон (склон железнодорожной выемки); *2* — бровка срыва оползня; *3* — оползневые рвы; *4* — оползневые трещины; *5* — оползневые блоки; *6* — разрушенные оползневые блоки; *7* — вал выдавливания; *8* — притрассовая автомобильная дорога; *9* — кюветы; *10* — полотно железнодорожной выемки; *11* — скважина; *12* — горные выработки: *а* — расчистки и канавы, *б* — шурфы; на разрезах: *13* — суглинок; *14* — песчаники на железистом цементе; *15* — песчаники на известковистом цементе; *16* — аргиллиты; *17* — алевролиты; *18* — положение поверхности до создания выемки.

явная тенденция к интенсификации процесса, которая в ближайшие годы будет сохраняться.

Гравитационные процессы и явления. Основная область развития гравитационных процессов и явлений — Байкальская рифтовая зона, где формы их, как экзо-, так и эндокинетические, разнообразны и многочисленны. Но на участке Кунерма — Даван трасса БАМ проходит преимущественно вне зоны возможного взаимодействия с ними. Обвалоопасным считается участок трассы, проходящей у основания левого борта долины р. Дельбичинды, но заметных перемещений каменного материала пока не наблюдалось.

Платформенная часть рассматриваемой территории характеризуется довольно ограниченным распространением некрупных осыпей, редких оползней-потоков, оползней-оплывин на крутых склонах и откосах высоких террас. Глубокая подрезка склонов вызвала массовое образование мелких, часто сливающихся осыпей, оплывин, развивающихся совместно с мелкоструйчатой эрозией, иногда с солифлюкцией. Наиболее интенсивно эти процессы разви-



вались в первые 3—4 года после строительства в зоне распространения красноцветов кембрия и терригенных пород ордовика. В последующий период (1981—1982 гг.) отмечено некоторое затухание процесса, закрепление оплывающего делювия растительностью. Прежняя активность сохраняется в основном на крутых и вертикальных искусственных склонах с обнажениями терригенно-красноцветными породами.

Самое крупное проявление техногенных оползневых деформаций представляет оползень на склоне железнодорожной выемки у ст. Небель, образовавшийся в мае — июне 1978 г. (рис. 15). Выемка длиной 1,2 км, глубиной до 15 м, с крутыми (25—40°) бортами пройдена в широком плоском днище сквозной эрозионно-тектонической долины, соединяющей верховья рек Нии и Береи. Вскрытые ею тонкопереслаивающиеся песчаники, алевролиты и ар-

гиллиты ордовика имеют восточное падение с углами 10—14°. Породы разбиты вертикальными и крутопадающими тектоническими трещинами субмеридионального и субширотного простирания. Уровень подземных вод расположен на 35—38 м ниже полотна выемки.

Неравновесное состояние чрезмерно крутого искусственного склона привело к отрыву крупных блоков коренных пород по тектоническим трещинам и их смещению по прослоям переувлажненных после интенсивного снеготаяния и затяжных июньских дождей аргиллитов и алевролитов. Оползень образовался в две стадии, причем в обоих случаях смещение блоков произошло практически мгновенно, без последующих подвижек. Общая длина оползня 140 м, ширина до 30 м, объем около 25 тыс. м^3. Оползневые рвы имели ширину до 6—9 м, глубину до 7 м и более. Смещение северного блока, сместитель которого погружается под полотно выемки, сопровождалось выдавливанием пород во фронтальной части. Вал выдавливания имел длину 22 м, высоту до 2,5 м.

Впоследствии оползневой склон выемки был реконструирован с выполаживанием его до 15—25° и устройством разгрузочной полки. Оползневое тело частью ликвидировано, частью засыпано, но реконструкция склона не вышла за пределы зоны оползневых деформаций. В последующие годы повторных подвижек не наблюдалось, но отмечено образование мелких суффозионных воронок по засыпанным оползневым трещинам и мелких трещин. Реконструкция склона полностью не устранила опасность повторных деформаций, которые могут быть вызваны переувлажнением пород и динамическими нагрузками.

Карстово-суффозионные процессы и явления. Карстообразование в районе связано с терригенно-карбонатными породами нижнего ордовика и сульфатно-карбонатными породами нижнего кембрия. Интенсивность и активность карста в современную эпоху невысока. Большинство известных в приграссовой зоне поверхностных форм — коррозионно-суффозионные, коррозионно-просадочные или провальные воронки, старые и древние. Вскрытие карстующихся пород выемками, карьерами и другими выработками привело к образованию на нескольких участках в районе разъезда Чудничного, ст. Таюра, Улькан и других мелких и средних (от 0,5 до 2—3 м в поперечнике, от 0,5—0,7 до 2,0—2,5 м в глубину) суффо-

зионно-просадочных и провальных форм. С доломитами ордовика связаны обычно мелкие формы, с гипсами и известняками кембрия — более крупные. Образование их вызвано усилением инфильтрации в обнаженные породы и суффозионным выносом продуктов карстового разрушения в коррозионно-тектонические полости или через них. С развитием процесса будет, несомненно, возрастать роль выщелачивания. Последнее, вероятно, будет протекать более интенсивно, чем на аналогичных участках с ненарушенным почвенно-растительным слоем.

Ликвидация карстово-суффозионных форм путем засыпки и забутовки не устраняет основных причин их развития. Поэтому возобновление деформаций и появление новых форм весьма вероятно. На наш взгляд, при проектировании ответственных сооружений необходим и принципиально возможен пространственный прогноз этих явлений на основании детального анализа структурно-геологической и тектонической обстановки.

Гидродинамические процессы и явления. Существенную опасность для линейных сооружений представляют селевые паводки в бассейне верхнего течения р. Кунермы. Следы неоднократного их прохождения зафиксированы в долинах ее левых притоков (руч. Каменистый, Дикий, Вредный, Медвежий, Осиновый), имеющих сравнительно небольшие водосборные площади (5—12 км^2), но значительные уклоны (0,12—0,22). Селевые бассейны имеют некоторые специфические черты условий селеформирования: сосредоточение селевых очагов в средних частях бассейнов, совмещение зон питания (твердой составляющей) и транзита. Основные типы селевых очагов — сдвигово-эрозионные и эрозионные. Характерной чертой является раннее прохождение водно-ледово-каменных потоков, в жидком питании которых основная роль принадлежит весеннему снеготаянию. Заметную роль в доставке обломочного материала к селевому руслу играют снежные лавины.

Как уже указывалось, область селеформирования расположена вне зоны влияния транспортных коммуникаций, но возведение насыпей и мостов заметно ухудшило условия транзита и аккумуляции селевой массы. По предварительным данным, частота прохождения катастрофических селей здесь может составлять 1 раз в 15—30 лет. Однако даже прохождение на руч. Вредном в 1980 г. маломощного паводка привело к полному закры-

тию селевой массой просветов железнодорожного и автомобильного мостов.

Эрозия и плоскостной смыв начали активно развиваться повсеместно на обнаженных и искусственных склонах сразу после их вскрытия. Местами образовалась настолько густая сеть эрозионных борозд и рытвин, что откосы и склоны приобрели характерную ребристую поверхность. Соответственно имело место интенсивное заплывание кюветных выемок. Наиболее интенсивное развитие эрозии наблюдалось в весенне-летний период 1978 г. (год высокой водности). Обследования 1981—1982 гг. показали некоторое затухание эрозии, что связано преимущественно с естественным и целенаправленным закреплением склонов. В дальнейшем, поскольку строительство и обустройство трассы БАМ в основном завершено, развитие эрозии будет определяться гидрозлиматическими факторами. Наблюдения в притрассовой коне западного участка БАМа показали, насколько существенны изменения экзогеодинамической обстановки, вызванные линейным строительством. Оказав влияние практически на все типы процессов, оно в некоторых случаях породило новые явления, ранее этой территории не свойственные. При этом степень реакции ЭГП (время от начала техногенного воздействия до начала развития процесса, названного нами периодом инерции) и период релаксации весьма различны. Для некоторых процессов и период инерции и тем более период релаксации значительно превосходят период проведенных наблюдений. Из сказанного вытекает необходимость продолжения наблюдений за развитием ЭГП теперь уже в условиях стабилизации основных видов техногенного воздействия.

Наибольший интерес для дальнейшего изучения представляют наледи, криогенные деформации, техногенные оползни, карстово-суффозионные явления, сели и селеформирующие процессы и явления. Задачи пространственного их прогноза уже получили определенное разрешение. В уточнении нуждаются лишь прогнозы криогенных и карстово-суффозионных деформаций. Переход к другим видам прогнозов требует решения промежуточных задач. Ближайшая из них, по нашему мнению,— разработка функциональных моделей геодинамических систем, порождающих указанные выше процессы, что позволит выделить наиболее значащие режимообразующие факторы и ха-

рактеризующие их параметры. Целенаправленные комплексные наблюдения на этой основе позволят перейти к прогнозам интенсивности и активности процессов.

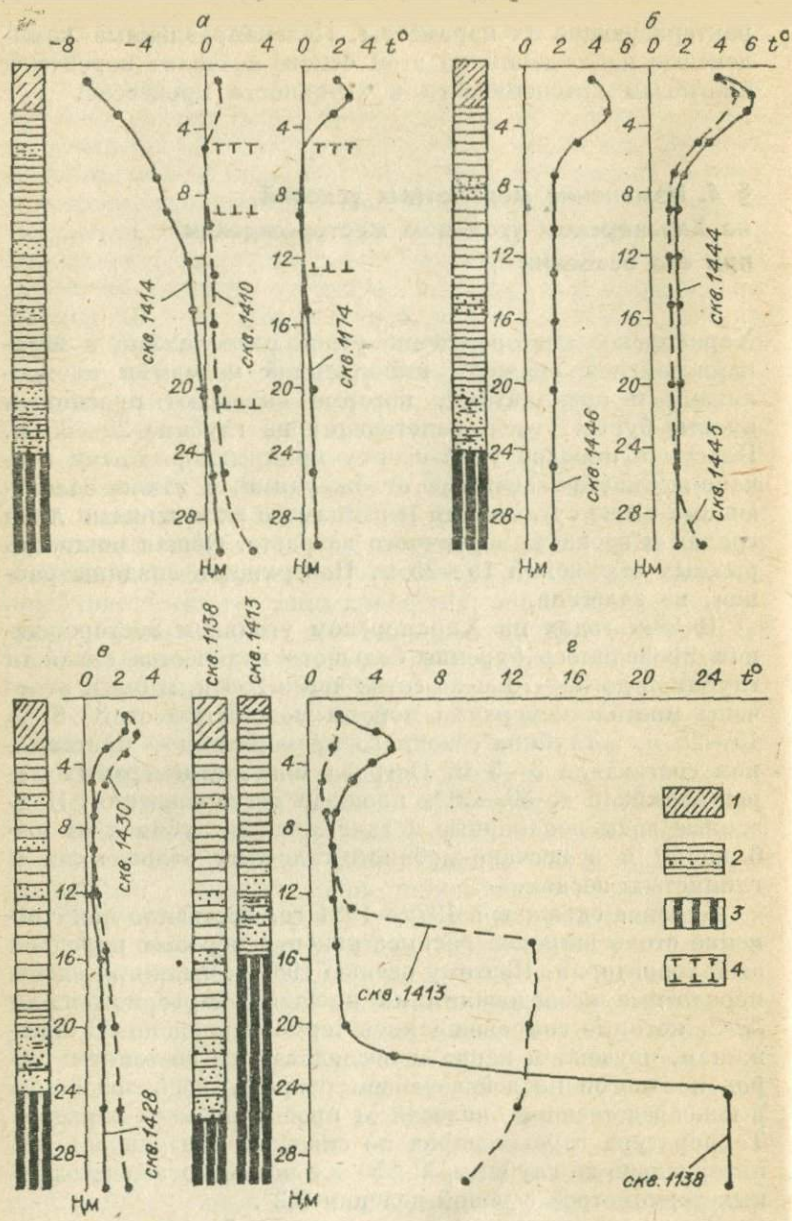
§ 4. Изменение мерзлотных условий на Харанорском угольном месторождении при его освоении

Харанорское месторождение углей расположено в мезокайнозойской впадине, выполненной меловыми алевролитами и аргиллитами, которые включают прослои и пласты бурых углей, залегающих на глубине 20—35 м. Пласты и прослои угля сверху прикрыты рыхлыми песчано-щебнисто-галечными отложениями, а также залегающими выше суглинками и глинами с включениями линз гравия и песка четвертичного возраста. Общая мощность рыхлых отложений 15—25 м. Поверхность впадины ровная, не залесена.

В 50-х годах на Харанорском угольном месторождении проводилось бурение большого количества скважин глубиной до 50—70 м по сетке через 250 м, и были отмечены многолетнемерзлые породы мощностью от 3—8 до 15—25 м, а глубина сезонного промерзания — протаивания составляла 3—5 м. Острова многолетнемерзлых пород занимали до 30—40% площади месторождения. Подземные воды ненапорные и залегали на глубинах от 5—6 до 40 м в песчано-щебнисто-галечных отложениях и глинистых песках.

Бурение скважин в 1979—1981 гг. поставило под сомнение столь широкое распространение мерзлых пород на этой территории. Поэтому осенью 1981 г. были проведены мерзлотные исследования на площади карьерного поля № 2, которые сопровождались термометрией по 22 скважинам, изучением керна и обследованием состояния пород и откосов на действующем разрезе, расположенном в непосредственной близости от проектируемого карьера. Температура горных пород по скважинам изучалась поинтервально до глубины 30—50 м с помощью заленивленных термометров с ценой деления 0,2°.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что на площади месторождения бурых углей


а
-8 -4 0 4 0 2 4 t°
скв. 1414
скв. 1410
скв. 1174
Н,м
б
0 2 4 6 0 2 4 6 t°
скв. 1444
скв. 1446
скв. 1445
Н,м
в
0 2 4
скв. 1430
скв. 1428
Н,м
скв. 1138
скв. 1413
г
0 4 8 12 16 20 24 t°
скв. 1413
скв. 1138
Н,м
1
2
3
4

многолетнемерзлые породы в основном деградировали, и этот процесс продолжается.

Средняя годовая температура горных пород (на подошве слоя годовых колебаний 10—12 м) на участках, где прежде была многолетняя мерзлота, в настоящее время равна $+0{,}2 \div +0{,}6°$ (рис. 16). В местах, где многолетняя мерзлота вообще отсутствовала, температура горных пород составляет $+1{,}2 \div +1{,}8°$. Небольшие линзы многолетнемерзлых пород мощностью до 5—10 м с температурой $-0{,}1 \div -0{,}2°$ отмечаются при бурении скважин лишь в краевых частях месторождения. Причем верхняя поверхность мерзлых пород иногда не сливается с сезонномерзлым слоем и находится на глубине 8—9 м.

Деградация многолетнемерзлых пород на рассматриваемой площади связана со следующими факторами. Во-первых, действующий соседний разрез и большое количество разведочных скважин создали на месторождении значительную зону аэрации, за счет чего уровень подземных вод понизился с 5,6 до 44—52 м. Верхние пласты углей и перекрывающие их глины и супесчано-щебнисто-галечные отложения оказались обезвожены. В результате в образовавшейся мощной зоне аэрации резко изменились условия теплообмена в горных породах. Во-вторых, при попадании воздуха в скважины бурые угли начали активно окисляться и разогреваться, что, в свою очередь, привело к повышению температуры окружающих горных пород. Так, в ряде скважин в верхних горизонтах бурых углей на глубинах свыше 15 м зафиксированы температуры до $+14 \div +26°$ (см. рис. 16). Тогда как неокисливщиеся угли на этих же глубинах имеют температуру $+2 \div +3°$.

Под воздействием воздуха и атмосферных осадков окисление и разогрев бурых углей происходит и в действующем карьере, на бровке уступа угольного пласта. Снег на поверхности угля тает, и отмечается парение угольного пласта. При этом температура на поверхности угля составляет $+20 \div +25°$ при температуре наружного воздуха в конце октября $-10 \div -15°$.

Таким образом, понижение уровня подземных вод, наличие большого количества разведочных скважин, хо-

---

Рис. 16. Температура горных пород на участках.

а — с мерзлотой; б — без мерзлоты; в — мерзлота деградирована; г — с окислением углей. 1 — супесь и суглинок пылеватые; *2* — глина с включениями песков, в основании залегают песчано-щебнисто-галечные грунты; *3* — бурый уголь; *4* — верхняя и нижняя границы мерзлых пород.

ротая окисляемость бурых углей явились основными причинами деградации многолетнемерзлых пород на этой площади за последние 30 лет. Поэтому деградацию многолетнемерзлых пород и изменение гидрогеологических условий месторождения следует рассматривать как следствие техногенного воздействия. Подобная ситуация наблюдается и на Азейском месторождении бурого угля. Здесь при отработке угля в открытых карьерах мерзлые породы отмечаются эпизодически на локальных участках, которые не осложняют работу экскаваторов. В период изысканий месторождения (50-е годы) многолетняя мерзлота встречалась в виде островов, занимая до 10% площади месторождения, а мощность мерзлых пород составляла 10—15 м, повышаясь иногда до 20 м.

При обследовании бортовых откосов на действующем разрезе Харанорского месторождения установлено, что глины, суглинки в талом состоянии при естественной влажности 20—25%, а также песчано-щебнисто-галечные отложения хорошо сохраняют вертикальные уступы. Глины находятся в тугопластичном состоянии, при высыхании становятся плотными и покрываются сетью трещин шириной до 0,1—1 см.

Приведенные материалы позволяют сделать вывод, что при проектировании и создании разреза на карьерном поле № 2 в бортовых откосах не следует ожидать больших деформаций в глинистых пластах. Имеющие место небольшие линзы многолетней мерзлоты также не окажут заметного влияния на состояние откосов. Многолетнемерзлые породы деградируют при создании карьера.

Выявленные особенности изменения мерзлотных и гидрогеологических условий на Харанорском буроугольном месторождении следует учитывать при освоении других месторождений бурого угля, расположенных в области островного распространения термически неустойчивой многолетней мерзлоты (Тугнуйском, Мугунском, Ишидейском, Тулунском и др.). Это позволит более рационально подойти к решению инженерных задач, связанных с проектированием и отработкой угольных месторождений на юге Восточной Сибири.

§ 5. Прогноз изменения геологической среды при отработке глубоких горизонтов месторождений Ангарской железорудной провинции

Проектирование и строительство подземных сооружений, выбор эффективных технологических схем ведения горных работ при освоении месторождений полезных ископаемых требуют изучения процессов, происходящих в массиве горных пород. Динамика процессов во времени и в зависимости от характера освоения территорий является основой прогноза изменений геологической среды. Механические процессы в горных породах, закономерности их формирования и изменения, безусловно, требуют специального изучения свойств горных пород в массиве на образцах и моделях. В этой связи в комплексе работ по совершенствованию методики разведки глубоких горизонтов железорудных месторождений особое внимание должно уделяться оценке и прогнозу изменений инженерно-геологических условий глубоких (свыше 600 м) горизонтов и выявлению основных факторов, обусловливающих устойчивость и прочность горных пород на больших глубинах [Гольдштейн, 1969; Инструкция..., 1975].

Важнейшими из них, определяющими состояние массива пород при их взаимодействии с инженерными сооружениями, будут: морфоструктура рудного тела, структура массива, определяемая составом, слоистостью, трещиноватостью, неоднородностью, анизотропией, направленностью и обводненностью. Эти факторы выявляются на начальных этапах исследований с постановкой экспериментов по изучению длительной прочности пород и руд, текучести, упругих характеристик при различных скоростях нагружения. В пределах Ангарской провинции на примере Копаевского, Рудногорского и Коршуновского месторождений установлено многообразие механических процессов, протекающих в глубоких горизонтах, не свойственных платформенным областям.

Для решения вопросов прогноза горно-технических условий эксплуатации этих месторождений использованы методы теории упругости, пластичности и предельного равновесного состояния, что обусловлено различными структурными связями в горных породах, сформировавшимися в процессе их образования постгенетическими изменениями.

Ангарская железорудная провинция расположена в пределах Сибирской платформы, в южной части Тунгусской синеклизы. Геологическое строение территории характеризуется широким развитием осадочных пород нижнего палеозоя, мезозоя и кайнозоя. Изверженные породы — траппы — встречаются среди сплошного поля осадочных образований отдельными изолированными пятнами. В тектоническом отношении этот район является областью сплошного дробления платформы с наличием региональных глубинного типа разломов.

Характерным элементом тектоники является весьма пологое погружение осадочного комплекса пород на северо-запад. На фоне этого общего погружения выделяются антиклинальные складки северо-восточного простирания, которые осложнены более мелкими складками северо-западного направления. Структуры, образующие целую зону локальных складок, связаны с разрывами глубоких слоев фундамента платформы. Эти разрывы нарушили сплошность слоев или привели к образованию крутых флексурных изгибов в покрывающем фундамент осадочном чехле. Зона таких «шовных складок» и является зоной сосредоточения железорудных месторождений.

Месторождения локализуются в отложениях платформенного чехла от нижнего кембрия до нижнего триаса включительно и приурочены, как правило, к зонам пересечения крупных разрывных нарушений субширотного и субмеридионального простираний. Месторождения по структуре, морфологии рудных тел, вещественному составу, типу руд и вмещающих пород имеют много общего. В плане они имеют овальную, изометричную, неправильную формы, в разрезе — воронкообразную. Породы, вмещающие месторождения в непосредственной близости к ним, раздроблены, интенсивно трещиноваты, наклонно залегая к рудному телу под углом 20—50°, иногда 70—80°, образуют брахисинклинальные структуры. Это терригенные, терригенно-карбонатные, карбонатные и в нижней части разреза галогенно-карбонатные разности; часто переслаивающиеся песчаники, алевролиты, аргиллиты, мергели, известняки, доломиты.

Терригенные породы преимущественно кварц-полевошпатового состава, чаще массивной текстуры. Песчанистые, с хорошей и средней окатанностью обломков, на гидрослюдистом и гидрослюдисто-карбонатном цементе, по типу контактово-поровом базальном. Карбонатные по-

роды — массивные, мелко- и скрытозернистые известняки и доломиты — распространены в нижних частях разреза в составе ангарской, литвинцевской, верхоленской и усть-кутской свит.

Толща осадочных пород вблизи рудного тела нередко затронута процессами хлоритизации, серпентинизации и карбонатизации. Изменение вмещающих пород разнообразно, весьма неравномерно и зависит от их состава, структурно-текстурных особенностей и тектонических условий: степени трещиноватости и раздробленности пород. Наиболее интенсивные метасоматические преобразования проявляются в известковистых разностях пород: известняках, известковистых песчаниках, мергелях. Глинистые породы и кварцевые песчаники с глинистым цементом подвержены незначительным изменениям. Породы осадочной толщи относятся к скальным и полускальным. Наиболее прочные структурные связи характерны для карбонатных отложений известняков и доломитов, сопротивление одноосному сжатию которых составляет 800—900 и даже 1000 кгс/см^2. Менее прочны терригенные разности: песчаники, алевролиты и аргиллиты. Сопротивление сжатию песчаников составляет 150—200 кгс/см^2, аргиллитов и алевролитов — 50—100 кгс/см^2. Измененные породы, в особенности хлоритизированные разности, обладают малой прочностью ($R_{сж} < 25$ кгс/см^2) и при вскрытии горными выработками легко выветриваются и переходят в группу несвязных пород. Железорудные месторождения предусматривается отрабатывать открытым и в последующем подземными способами. Два из них — Коршуновское и Рудногорское — отрабатываются в настоящее время карьерами.

Опыт эксплуатации показал, что разработка месторождений связана с определенными трудностями горно-геологического характера, такими как подтопление подземными водами и возникновение в пределах горных выработок инженерно-геологических процессов и явлений. На основе геолого-структурного анализа, петрографических особенностей и физико-механических свойств горных пород и полевых исследований установлено, что возникновение инженерно-геологических процессов предопределяется прежде всего структурно-тектоническими условиями месторождений, петрографическими особенностями пород и сложнонапряженным состоянием массива на глубинах 600—1000 м.

Изучение физико-механических свойств пород и руд Ангарской провинции проводилось на монолитах ненарушенной структуры при естественной влажности. В качестве основных показателей свойств были выбраны плотность, пористость, временное сопротивление одноосному сжатию, растяжению с оценкой коэффициента Пуассона, напряженное состояние, ползучесть, слеживаемость руд, устойчивость горных пород и руд в подземных горных выработках и бортах карьеров. В целом исследования позволили установить зависимость свойств пород от целого ряда геологических факторов и прежде всего от литологических особенностей, текстуры, структуры, тектонической нарушенности, трещиноватости и контактовых изменений. Комплекс перечисленных факторов позволил выделить на глубину до 1500 м двадцать семь инженерно-геологических элементов. Среди руд выделено пять элементов: руды массивные, брекчиевидные, вкрапленные, прожилково-вкрапленные и мартитовые. По показателю объемной дробимости выделены труднодробимые, среднедробимые и легкодробимые. К труднодробимым отнесены массивные и прожилково-вкрапленные руды с показателем дробимости $4{,}8 \cdot 10^{-6}$ м^3, к среднедробимым — брекчиевидные и мартитовые руды с показателем дробимости $18{,}6 \cdot 10^{-6}$—$22 \cdot 10^{-6}$ м^3, к легкодробимым — вкрапленные, показатель дробимости для которых составил в среднем $24{,}6 \cdot 10^{-6}$ м^3 [Ляхов, 1974; Инструкция..., 1975].

Наибольшие значения объемной массы характерны для массивных и прожилково-вкрапленных руд (3,48—3,7 г/см^3), наименьшее (2,6 г/см^3) — для мартитовых руд. Изменения объемной массы обусловлены минеральным составом, о чем свидетельствуют значения объемной массы скелета руд и полной влагоемкости. Пористость руд снижается от брекчиевидных и мартитовых рыхлосвязанных до прожилково-вкрапленных и массивных. Для анализа возможных изменений свойств горных пород на глубинах 900—1500 м предварительно оценена естественная пористость массива по формуле $N_м = (1 - \gamma_м/\Delta) \cdot 100\%$, где $N_м$ — естественная пористость массива; Δ — удельная плотность; $\gamma_м$ — объемная масса руд в массиве.

Максимальные значения естественной пористости на глубоких горизонтах достигают 27% для мартитовых руд и 20% — для вкрапленных. Это указывает на сложные горно-технические условия при отработке глубоких го-

ризонтов, на возможность значительного уплотнения массива при взрывных работах и перераспределения напряжений при проходке горизонтальных подземных выработок.

По прочности руды весьма неоднородны, прочность руд на одноосное сжатие изменяется от 78 до 1507 кгс/см², наиболее прочные — массивные руды.

Специальные опыты по изучению ползучести горных пород производились на образцах под постоянной нагрузкой. Некоторые разновидности пород и руд обладают ползучестью, что выражается в изменении деформации при постоянной нагрузке. Для массивных руд величина деформации стабилизировалась в течение 7—46 суток при нагрузках, близких к пределу прочности, что свидетельствует о возможной слеживаемости руд и пород.

Подобные факты позволяют отметить, что взаимодействие основных показателей свойств пород и руд нашло отражение в напряженном состоянии пород массива. В этой связи были организованы экспериментальные исследования напряжений. Оценки давались для природного массива, находящегося в равновесном состоянии, и измененного в процессе отработки.

Расчетами, проведенными для природного нетронутого массива горных пород, было выявлено не свойственное для платформенных областей напряженное состояние. На глубинах 600—1200 м (Копаевское и Рудногорское месторождения) горизонтальная составляющая полного тензора напряжений почти в 2 раза превосходит вертикальную составляющую. Подобный факт объясняется нами (на данном этапе исследований) генетическими особенностями месторождений. В период формирования трубок взрыва силы внутреннего давления в значительной степени превосходят геостатические. На отдельных горизонтах эта наследственность сохранилась. При этом такие жесткие породы, как известняки, песчаники, обладают большей наследственностью, отдельные типы руд обладают текучестью, проявлением реологических свойств. Вмещающие горные породы имеют значительный распор. Любое вскрытие массива приведет к перераспределению напряжений и необратимости целого ряда механических процессов на глубоких (свыше 600 м) горизонтах и активизирует приповерхностные.

Поэтому в процессе исследований особое внимание уделено прогнозу изменения напряженного состояния мас-

сива при отработке глубоких горизонтов и влиянию его на геологическую среду.

Характер напряжений вокруг выработки будет определяться многими факторами: формой выработки, влиянием способов проходки, свойствами пород и руд, особенностями естественного напряженного состояния массива. Количественно все эти факторы оцениваются коэффициентом концентрации напряжений K, равным отношению величины напряжений до проходки выработки к величине напряжений после проходки в оцениваемой точке или другом элементе [Кацауров, 1981]. Расчет произведен для ствола шахты круглого сечения диаметром 8 м для глубин 600, 700, 800, 900, 1000 и 1100 м в районе скв. 32-Г Копаевского и для скважин в центральной части одиннадцатого профиля Рудногорского месторождений.

Оценка напряжений производилась по формуле

$$\sigma_z = \gamma \cdot H;\ \sigma_x = \sigma_y = \mu \cdot \gamma \cdot H(1 - \mu),$$

где σ_z, σ_x, σ_y — главные напряжения; γ — объемная масса породы; H — глубина расчета; μ — коэффициент Пуассона.

Для измененных условий (для условий после проходки выработок) учитывалась разгрузка напряжений условной величиной «отрицательной нагрузки». На глубине 700 м коэффициент концентрации напряжений по периметру составит 2, на забое шахты — 3,2; на глубине 800 м по периметру — 2,5, на забое — 3,5; на глубинах 1000—1100 м — 2,5 по периметру, на забое — 3,4. Вокруг шахтного ствола круглой формы возникнут радиальные σ_r и нормальные $\sigma_н$ напряжения. Ствол шахты будет устойчивым в случае $\sigma_н = R_{сж}$ и $\sigma_r = R_р$, т. е. по величине нормальные и радиальные напряжения будут меньше прочности на сжатие и на разрыв.

Нормальные и радиальные напряжения определялись аналитически по формуле

$$\sigma_н = M/(1 - \mu) \cdot \gamma \cdot H(1 - R^2/r^2);\ \ \sigma_r = M/(1 - \mu) \cdot \gamma \times \times H(1 - R^2/r^2),$$

где R — радиус ствола шахты; r — расстояние от точки, в которой определялось напряжение.

При оценке напряжений на забое и в горизонтальной выработке в кровле и почве применялась формула Дин-

ника и Савина [Кацауров, 1981]:

$$\sigma_r = K \cdot M/(1 - \mu) \cdot \gamma \cdot H,$$

где K — коэффициент концентрации напряжений.

В соответствии с приведенными расчетами наибольшая устойчивость горных пород ожидается на глубинах 300—600 м от поверхности, ниже этой отметки коэффициент запаса на действие сжимающих сил немногим более единицы (1,25—1,07); на действие растягивающих напряжений массив пород при вскрытии теряет устойчивость, в десятки раз усилия сдвига превосходят прочность породы на разрыв. Таким образом, незакрепленный ствол шахты будет находиться в неустойчивом состоянии, при расчете крепи необходимо учитывать коэффициент структурного ослабления горных пород в зависимости от технологии проходки выработок. Горизонтальные подземные горные выработки будут неустойчивы, возможно развитие пластических деформаций, а также вывалов и выстрелов.

§ 6. Прогноз водопритоков на Коршуновском железорудном месторождении методом моделирования

Исследуемая территория находится в зоне складок Непского типа, расположенных в пределах Ангаро-Ленского краевого прогиба, и занимает площадь, равную 210 км^2. Своеобразие развития этого региона определило его структурно-геологические и гидрогеологические особенности.

Как показывает анализ фактического материала и последующее математическое моделирование, ведущим фактором при распределении и формировании подземных вод в зоне свободного водообмена является структурный. В соответствии с этим выделяются следующие гидрогеологические структуры [Степанов, 1980]: 1) гидрогеологические бассейны; 2) гидрогеологический массив; 3) обводненные разломы.

Гидрогеологические бассейны. В геологическом строении бассейнов принимают участие четвертичные отложения, коллекторами подземных вод в которых являются поры. Тип вод порово-пластовый. Воды разгружаются в виде родников с дебитом 0,6—0,8 л/с с минерализацией

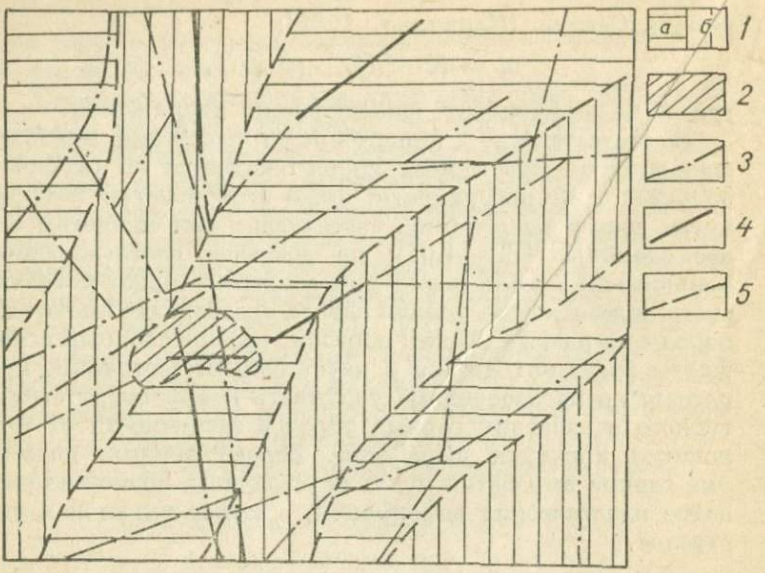


Рис. 17. Структурно-гидрогеологическая схема района Коршуновского месторождения.

1 — бассейны: *а* — брахисинклинального типа, *б* — брахиантиклинального типа; *2* — гидрогеологический массив; *3* — тектонические нарушения; *4* — зоны обводненных разломов; *5* — границы гидрогеологических структур.

до 0,2—0,3 г/л и в общем притоке в карьер месторождения играют незначительную роль.

Ниже лежит наиболее обводненная толща терригенно-карбонатных пород ордовика. Коллекторы подземных вод — трещины, а в нижней части разреза — карстовые полости, развиты трещинно-пластовый и трещинно-карстовый типы вод.

По систематизации В. М. Степанова, на площади по морфоструктурным особенностям, связанным с различным положением кровли регионального водоупора, в зоне свободного водообмена выделяются краевые открытые гидрогеологические бассейны: а) брахисинклинального типа; б) брахиантиклинального типа.

В связи с недостатком гидрогеологической информации границы бассейнов на рис. 17 проведены в соответствии с закономерностями образования трещиноватости в процессе формирования складок. Коэффициенты трещинной пустотности имеют максимальные значения в зоне шарниров пликативных дислокаций, уменьшаются по

падению крыльев и становятся минимальными у их середины. В соответствии с этим линия, проходящая по середине крыльев складок, была принята за условную границу гидрогеологических структур.

Бассейны различного типа отличаются по степени водообильности, характеризующейся родниковым стоком, по мощности водовмещающих пород, уровню подземных вод. Воды бассейнов брахисинклинального типа вскрываются на глубине до 46 м. Дебиты родников изменяются от 1,5 до 11,0 л/с. Подземные воды бассейнов второго, брахиантиклинального, типа вскрыты на глубине до 70 м и более. Родники имеют дебиты 0,08—3,0 л/с. Минерализация подземных вод бассейнов обоих типов преимущественно 0,20—0,58 г/л, химический состав гидрокарбонатный кальциево-натриевый. Питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка происходит в виде родников.

Платформенный кольцевой вулканогенный гидрогеологический массив континентального типа. Он ограничен вулкано-тектонической структурой трубки взрыва и выполнен туфогенными породами пермотриасового возраста. Ему соответствуют подземные воды трещинно-грунтового типа. На данный момент трещинно-грунтовые воды дренированы и участия в обводнении месторождения не принимают.

Обводненные разломы. Это линейно вытянутые зоны дробления, имеющие ширину до нескольких десятков метров и резко отличающиеся от окружающих пород повышенными фильтрационными свойствами.

На площади развиты щелевые и каверновые сбросы и надвиги с внутри- и межструктурными связями, имеющие локальный и транзитный характер. Эти структуры являются наложенными и выделяются как в пределах бассейнов, так и в пределах массивов. По структурному признаку обводненные разломы объединены в два типа: а) приповерхностные; б) глубокие.

Приповерхностные разломы секут ордовикскую и частично верхоленскую толщи пород и не выходят за пределы зоны свободного водообмена. Родники, дренирующие их, имеют достаточно высокую водообильность — до 47,3 л/с, минерализация вод 0,34—0,40 г/л, состав гидрокарбонатный кальциево-магниевый. Глубокие разломы прорывают вилнекембрийские отложения, включая и водоупорную верхоленскую толщу, и достигают зоны затрудненного

водообмена. Удельные дебиты скважин, вскрывших эти структуры, составляют 0,02—0,07 л/с. Минерализация вод варьирует от 2—4 до 80 г/л, преобладающий состав — хлоридный натриевый. Питание трещинно-жильных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и перетекания подземных вод из смежных гидрогеологических структур. Разгружаются они родниками.

Вопрос об оценке притоков в карьер Коршуновского ГОКа и их прогнозе при дальнейшем развитии горных работ остро стоял уже с начальных этапов разведки и освоения месторождения. Первые данные были получены в процессе геолого-разведочных работ 1948—1955 гг., проведенных геологами Иркутского геологического управления М. А. Иващенко, П. А. Шуваловым. Прогнозные величины по их данным составили 357—615 м³/ч. В 1964 г. институтом Гипроруда был разработан проект осушения карьера, где расчетный водоприток равен 6600 м³/ч. Для проверки проектных решений и оценки эффективности предложенной системы осушения институтом ВНИМИ (г. Ленинград) в 1967 г. накопленная информация была обработана с целью последующего моделирования на установке ЭГДА. По этим данным величина водопритока более 10 000 м³/ч. Гидрогеологами Коршуновского ГОКа под руководством Н. К. Наумова с привлечением гидрогеологических материалов ПГО «Иркутскгеология» методами аналогий, аналитическим и балансовым был сделан прогноз водопритока в карьер на конец 1981 г.— 1500 м³/ч. Фактические водопритоки по данным водопонижения изменялись от 380 м³/ч в 1966 г. до 2200 м³/ч в 1974 г. На настоящий период притоки составляют около 1900 м³/ч.

Таким образом, расчетные величины водопритоков, определенные различными исследователями на различных стадиях разведки и освоения месторождения, изменяются в достаточно широких пределах — от 350 до более 10 000 м³/ч. Такое расхождение можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, недостатком гидрогеологической информации, что особенно характерно для начальных этапов исследований. Во-вторых, использованием общепринятых подходов к задачам прогноза, применяющихся в платформенных условиях с послойным залеганием пластов, и недооценки роли структурно-тектонических особенностей региона, имеющих в данном случае решающее значение при распределении и формирова-

нии подземных вод. В-третьих, при расчетах исследователи значительно осредняли фильтрационные параметры, тем самым серьезно искажая природную картину. В-четвертых, приток воды из зон разломов и фильтрация из хвостохранилища, сильно влияющие на конечный результат, в расчетах учтены не были.

Предлагаемая методика прогноза основывается на анализе большей части материалов периодов разведки и освоения месторождения и структурно-гидрогеологическом подходе при решении поставленных задач. Кроме *того*, учитывается *резкая* фильтрационная неоднородность водовмещающих пород, детализировано влияние границ первого и второго рода, учтены некоторые другие *факторы. В результате получена карта распределения* гидрогеологических параметров, дан дифференцированный по отдельным структурам прогноз водопритоков в карьер на различные моменты времени.

В соответствии с проведенным структурно-гидрогеологическим анализом решалась задача прогноза водопритоков в карьер Коршуновского месторождения. Первый этап работы — типизация и схематизация гидрогеологических условий и составление первичной схемы объекта.

Фильтрационный поток представлен как плановый безнапорный, нестационарный, с вертикально-горизонтальным водообменом в резко анизотропной среде [Гавич, 1980], с весьма высокими значениями фильтрационных параметров в пределах зон обводненных разломов, более низкими — по осям пликативных дислокаций и минимальными — на их крыльях. Обоснование параметров *проводилось комплексным методом. Задача решалась по* принципу конечных разностей. Выделенная схема описывается уравнением Буссинеска:

$$K\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\frac{\partial H}{\partial y}\right)\right]=\mu(x, y)\frac{\partial H}{\partial t}.$$

Для ведущих критериев модели $K_м$ и объекта $K_о$ устанавливается автомодельная область их влияния с учетом прогнозируемой величины H по зависимости

$$\Delta H=f\left(\frac{K_о-K_м}{K_о}\right).$$

Соответствующая электрическая модель описывается со-

гласно закону Кирхгофа уравнением типа

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{U_{i_1 t} - U_{o_1 t}}{R} + \frac{U'_{o_1 t} - U_{o_1 t}}{R_{об._1 t}} = 0 \quad \text{при} \quad n = 1, 2, 3, 4.$$

Расчет модели проводился с помощью масштабных коэффициентов $\alpha_R = R/\Phi$; $\alpha_U = U/R$. При решении прогнозной задачи используется масштабный коэффициент $\alpha_Q = \alpha_U/\alpha_R = 0{,}5\Delta h^2/(\Delta U \Phi)$, где α_R — масштаб сопротивлений, (м²·Ом)/сут; α_U — масштаб напоров, В/Ом; R — электрическое сопротивление, Ом; Φ — фильтрационное сопротивление, сут/м²; U — напряжение, В; Δh —(разность максимальной и минимальной отметок уровней подземных вод, м.

Заметим, что достоверность выполненной схематизации проверялась сначала решением обратной задачи, включающей в себя идентификацию гидрогеологического объекта и его математической модели, в частности, определялись и уточнялись значения гидрогеологических па-

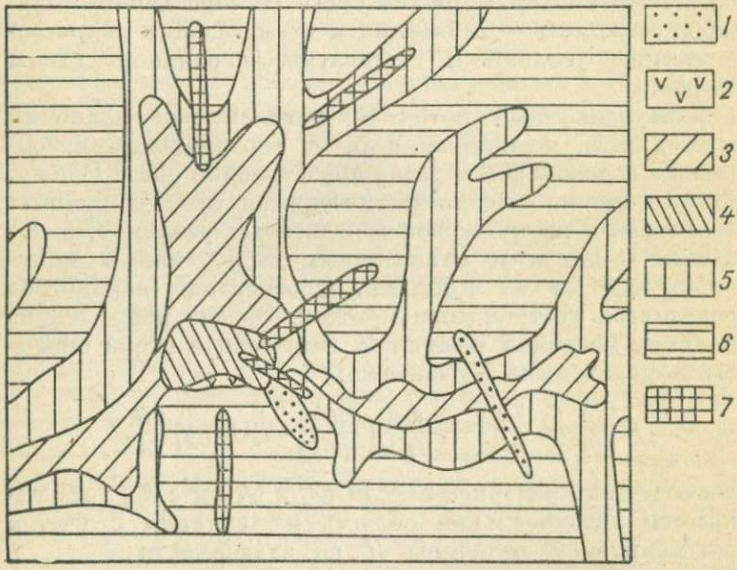


Рис. 18. Схема распределения коэффициентов фильтрации горных пород по результатам моделирования.

Значения $K_ф$ в зонах неоднородности: *1* — 0; *2* — до 0,04 м/сут; *3* — до 0,08 м/сут; *4* — 1—10 м/сут; *5* — до 20 м/сут; *6* — до 113 м/сут; *7* — до 1500 м/сут.

раметров (рис. 18), гидродинамическая роль границ, было подтверждено наличие зон обводненных разломов, выделенных на первом этапе по ряду косвенных признаков, и оконтурены их границы. Близость модельной картины расположения уровней грунтовых вод в начальный период времени к натурной явилась мерой адекватности модели исследуемому объекту.

Далее проверка происходила методом эпигнозного моделирования по схеме Либмана по общепринятой методике [Жернов, Павловец, 1976] в приращениях напоров H_t на расчетные моменты Δt, начиная с начального момента $t = 0$ (естественный режим).

Последний шаг по времени t_4 дал возможность сделать прогноз водопритоков в карьер на момент отработки всей толщи ордовикских отложений (около 450 м). Водоприток в карьер за счет гидрогеологических бассейнов составил 3030 м³/ч, причем большая доля приходится на воды бассейнов брахисинклинального типа; приток за счет обводненных разломов — 1960 м³/ч; суммарный водоприток в карьер — 4990 м³/ч. Таким образом, около 60% от общего водопритока составляют подземные воды гидрогеологических бассейнов, 40% — воды разломов.

Полученные результаты характеризуют максимально возможный кратковременный водоприток, дифференцированный по различным гидрогеологическим структурам, позволяют выделить наиболее обводненные участки и составить рациональную схему осушения месторождения с учетом вскрытия высокопроницаемых зон разломов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиально новый этап освоения производительных сил Сибири связан с внедрением на ее территории крупных народнохозяйственных объектов. Сооружение каскада ангаро-енисейских ГЭС, строительство БАМа, формирование крупных ТПК, открытая разработка полезных ископаемых — вот далеко не полный перечень капитального строительства. Вместе с тем эта обширная территория характеризуется сложными и разнообразными инженерно-геологическими условиями, во многом определяющими специфику освоения и охраны геологической среды. Народнохозяйственное использование территории вносит существенные изменения в природные условия, приводит к их перестройке. Антропогенное преобразование современного рельефа вызывает активизацию и интенсификацию геологических процессов и явлений, которые в свою очередь существенно осложняют строительство и эксплуатацию инженерных сооружений и нарушают сложившееся природное равновесие. Кроме того, вмешательство человека в геолого-геоморфологическую обстановку приводит к формированию явлений техногенного характера, характеризующихся меньшими площадями распространения, но развивающихся очень интенсивно.

Таким образом, при хозяйственном освоении территории Сибири без должного учета состава и свойств горных пород, наличия мерзлоты, повышенной сейсмики, особенностей развития экзогенных геологических процессов и их активизации, изменения режима, состава и ресурсов подземных вод часто возникают нежелательные изменения геологической среды. Чем лучше познаны инженерно-геологические особенности конкретных участков, тем обоснованнее проведено строительство, надежнее эксплуатация сооружений и экономически более оправданно выполня-

ются мероприятия по охране и рациональному использованию природных ландшафтов. Поэтому среди широкого круга изучаемых проблем главной является проблема комплексной инженерно-геологической оценки отдельных регионов.

Особое положение с этой точки зрения занимают площади, тяготеющие к каскаду водохранилищ Ангаро-Енисейской системы гидроэлектростанций. Зона влияния этих сооружений охватывает территорию в несколько сотен тысяч квадратных километров. Создание таких гигантских водоемов отразилось на изменении природных условий. Формируется новая береговая линия, в пределах которой активно развивается абразия, резко нарушился ход эрозионных процессов, активизировались экзогенные геологические процессы, изменились условия водообмена поверхностных и подземных вод и т. д. Изучение названных процессов имеет большое научное значение, ибо геологическая деятельность водохранилищ является грандиозным натурным геодинамическим экспериментом, позволяющим разработать теорию активизации различных природных явлений.

Серьезное воздействие на геологическую среду оказывает и деятельность крупных предприятий горно-добывающей промышленности. Открытые разработки полезных ископаемых и создание отвалов — современных техногенных форм рельефа, повышают селеопасность горных районов Сибири, провоцируют активизацию оползней, сплывов, осыпей, существенно изменяют гидрогеологические условия. Аналогичные изменения вызывает строительство различных линейных сооружений, и в первую очередь БАМа. Все это заставляет нас уже сейчас предусматривать такие способы использования природных ресурсов, при которых компенсация всех видов ущерба была бы наиболее эффективной.

Как показывает опыт освоения отдельных районов Сибири, изменения геологической среды, особенно под техногенным воздействием, осложняют не только строительство и эксплуатацию промышленных и гражданских сооружений, но и использование земель в качестве сельскохозяйственных угодий. Все это обязывает обратить серьезное внимание на проблемы прогноза изменений геологической среды. И если отдельные вопросы оценки инженерно-геологических условий разработаны довольно хорошо, то проблема прогноза еще далеко не разре-

шена. На данной стадии исследований крайне необходимо обратить внимание на разработку общей теории прогнозирования изменений геологической среды и методику отдельных видов прогноза конкретных геологических процессов, а это, в свою очередь, требует использования современных методов исследований с применением математического аппарата, моделирования, экспериментального и теоретического анализа кинематики процессов.

Таким образом, задачи ближайшего будущего сводятся к следующему:

разработка теоретических основ инженерно-геологической оценки геологической среды и методов познания ее изменчивости во времени и в пространстве;

дальнейшее изучение экзогенных геологических процессов и явлений при усилении теоретического, регионального и экспериментального познания процессов, возникающих в литосфере под влиянием деятельности человека;

разработка методов количественного прогноза изменений геологической среды, в том числе природных и инженерно-геологических процессов и явлений.

ЛИТЕРАТУРА

Бондарик Г. К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород.— М.: Недра, 1971.— 269 с.

Бондарик Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии.— М.: Недра, 1981.— 318 с.

Бондарик Г. К., Горальчук М. И., Сироткин В. Г. Закономерности пространственной изменчивости лессовых пород.— М.: Недра, 1976.— 233 с.

Братское водохранилище. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР.— Л.: Гидрометеоиздат, 1978.— 165 с.

Братское водохранилище. Инженерная геология территории.— М.: Изд-во АН СССР, 1963.— 275 с.

Бровкин А. Н. Типизация инженерно-геологических условий г. Усть-Илимска.— В кн.: Методы типизации и картирования геологической среды городских агломераций для решения задач планирования инженерно-хозяйственной деятельности (тезисы докладов).— М.: изд. МосЦТИСИЗ ПО «Стройизыскания», 1981, с. 100—101.

Бровкин А. Н. Применение показателя интенсивности выветривания при инженерно-геологических исследованиях.— В кн.: X конференция молодых научных сотрудников по геологии и геофизике Восточной Сибири. Иркутск: изд. Ин-та земной коры СО АН СССР, 1982, с. 73—75.

Вакин Е. А., Пилипенко Г. Ф., Пономарев В. В. и др. Возникновение новой группы термальных источников на вулкане Алаид (Северные Курилы).— В кн.: Гидротермальный процесс в области тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1977, с. 73—84.

Габриелян Г. К. Об изучении склоновой денудации экспериментальным методом. Некоторые результаты.— Науч. тр. Ереванского университета. Сер. геогр. науки, 1956, т. 58, вып. 3, с. 97—110.

Гавич И. К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии.— М.: Недра, 1980.— 358 с.

Гаджиев С. М. Гидрогеохимические особенности термальных вод северо-восточного склона Большого Кавказа.— В кн.: Материалы научно-теоретической конференции молодых ученых. Кн. 3. Баку: Изд-во АН АзССР, 1969, с. 18—19.

Гвишиани Д. М. Материалистическая диалектика— философская основа системных исследований.— В кн.: Системные исследования М.: Наука, 1980, с. 7—28.

Геологические и экологические прогнозы.— Новосибирск: Наука, 1984.— 217 с.

Гидрогеология СССР. Т. XIX. Иркутская область.— М.: Недра, 1968.— 495 с.

Голодковская Г. А. Инженерно-геологические карты как основа прогноза изменений геологической среды.— В кн.: Методы типизации и картирования геологической среды городских агломераций для решения задач планирования инженерно-хозяйственной деятельности (тезисы докладов). М.: МосЦТИСИЗ ПО «Стройизыскания», 1981, с. 50—54.

Гольдштейн М. Н. Развитие динамических методов исследования строительных свойств грунтов.— В кн.: Динамика оснований фундаментов. Т. 1. М.: изд. Госстроя СССР, 1969, 180 с.

Горшков С. П. О денудации суши и роли хозяйственной деятельности человека в ее ускорении.— Изв. Всесоюз. геогр. о-ва, 1979, т. III, вып. 2, с. 106—112.

Горшков С. П. Экзодинамические процессы освоенных территорий.— М.: Недра, 1982.— 286 с.

Грим Р. Е. Минералогия глин.— М.: Изд-во иностр. лит., 1959.— 452 с.

Грунтоведение/Под ред. Е. М. Сергеева.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971.— 594 с.

Данилов-Данильян В. И., Толмачев И. Л., Шуршалов В. В. Об имитационном моделировании систем с развивающейся структурой.— В кн.: Системные исследования. М.: Наука, 1980, с. 191—209.

Демьянович М. Г., Авдеев В. А. Инженерно-сейсмогеологические условия Северо-Муйского участка трассы БАМа.— В кн.: Сейсмические и сейсмогеологические исследования на центральном участке БАМа. Якутск, 1978, с. 12—22.

Ерохин М. Н. Перспективы использования Эссовского месторождения термальных вод на Камчатке.— В кн.: Использование тепла Земли для производства электроэнергии. М.: Энергия, 1975, с. 132—133.

Жернов И. Е., Павловец И. П. Моделирование фильтрационных процессов.— Киев: Вища школа, 1976.— 192 с.

Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья.— М.: Наука, 1966.— 231 с.

Закономерности и прогнозирование природных явлений.— М.: Наука, 1980.— 271 с.

Золотарев Г. С. Основные проблемы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания.— В кн.: Докл. науч. семинара «Вопросы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания» М.: Изд.-во Моск. ун-та, 1971, с. 4—25.

Золотарев Г. С. Современные задачи инженерно-геологического изучения оползней, обвалов и селевых потоков в горно-складчатых областях.— В кн.: Геологические закономерности развития оползней, обвалов и селевых потоков. Вып. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976, с. 5—34.

Изменчивость природных явлений во времени.— Новосибирск: Наука, 1982.— 224 с.

Изучение режима оползневых процессов.— М.: Недра, 1982.— 255 с.

Инженерная геология Прибайкалья.— М.: Наука, 1968.— 188 с.

Инженерно-геологические аспекты рационального использования и охраны геологической среды.— М.: Наука, 1981.— 240 с.

Инструкция по изучению инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых при их разведке.— М.: Недра, 1975.— 50 с.

Информационная основа прогноза природных процессов.— Новосибирск: Наука, 1980.— 183 с.

Иркутское водохранилище. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР.— Л.: Гидрометеоиздат, 1980.— 140 с.

Карнаухова Г. А. Механический состав донных отложений Братского водохранилища.— В кн.: Тезисы докладов IX конференции молодых научных сотрудников по геологии и геофизике Восточной Сибири. Иркутск: изд. Ин-та земной коры СО АН СССР, 1980, с. 94—95.

Кацауров И. Н. Механика горных пород.— М.: Недра, 1981.— 159 с.

Комарова М. В., Штенгелов Е. С. Опыт карстологического районирования юга УССР с целью прогноза изменения инженерно-геологической обстановки.— Экспресс-информация ВИЭМС. Сер. Гидрогеология и инженерная геология, 1977, № 5, с. 1—13.

Комарова М. В., Крыжановская И. Н., Штенгелов Е. С. Влияние зон новейшего раздвижения земной коры на пространственное распределение инженерно-геологических процессов при создании водохранилищ.— В кн.: Тезисы докладов к V совещанию по изучению берегов сибирских водохранилищ. Иркутск: изд. Ин-та земной коры СО АН СССР, 1980, с. 24—25.

Комарницкий М. И. Влияние зон и поверхностей ослабления в породах на устойчивость откосов.— М.: Наука, 1966.— 144 с.

Кондратьев Н. Е. Прогноз переформирования водохранилищ под действием ветровой волны.— Тр. ГГИ, 1956, вып. 56 (110), с. 5—26.

Косов Б. Ф. Овражная эрозия в СССР и пути ее преодоления.— Вестн. МГУ. Сер. биологии, почвоведения, геологии, географии, 1957, № 4, с. 203—209.

Котлов Ф. В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека.— М.: Недра, 1978.— 263 с.

Кофф Г. Л., Попов И. В. Прогнозы как метод и цель геологических исследований.— В кн.: История и методология естественных наук. Вып. 13. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974, с. 171—175.

Лапердин В. К., Тржцинский Ю. Б. Экзогенные геологические процессы и сели Восточного Саяна.— Новосибирск: Наука, 1977.— 103 с.

Лапердин В. К., Тржцинский Ю. Б. Техногенное изменение рельефа и вопросы охраны природы.— В кн.: Некоторые вопросы геоморфологии Восточной Сибири. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1981, с. 89—104.

Лаудон Т. ЭВМ и машинные методы в геологии.— М.: Мир, 1981.— 318 с.

Лещиков Ф. Н. Мерзлые породы Приангарья и Прибайкалья.— Новосибирск: Наука, 1978.— 141 с.

Логачев Н. А., Ломоносова Т. К., Климанова В. М. Кайнозойские отложения Иркутского амфитеатра.— М.: Наука, 1964.— 195 с.

Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика.— Л.: Недра, 1977.— 479 с.

Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология.— Л.: Недра, 1978.— 496 с.

Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах.— М.: Недра, 1974.— 192 с.

Матвеев Ю. Д. К методике изучения выветривания пород в инженерно-геологических целях.— В кн.: Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968, с. 36—47.

Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики.— М.: Мир, 1968.— 408 с.

Методика мерзлотной съемки.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979.— 385 с.

Методические аспекты прогнозирования природных явлений Сибири.— Новосибирск: Наука, 1980.— 144 с.

Методические рекомендации по определению физико-химических свойств почв и грунтов при инженерно-геологических и почвенно-мелиоративных изысканиях/Под ред. Л. И. Кульчицкого.— М.: изд. ВСЕГИНГЕО, 1977.— 68 с.

Методические рекомендации по стационарному изучению криогенных физико-геологических процессов.— М.: изд. ВСЕГИНГЕО, 1979.— 72 с.

Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород/Под ред. Е. М. Сергеева и др. Т. 1.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968.— 346 с.

Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200 000 (1 : 100 000—1 : 500 000).— М.: Недра, 1978.— 319 с.

Нашпельбаум Э. Л. Системный анализ как программа научных исследований — структура и ключевые понятия.— В кн.: Системные исследования. М.: Наука, 1980, с. 55—57.

Николаев В. В., Хилько С. Д. Сейсмотектоническая активизация в зонах с низкими градиентами скорости и контрастностью вертикальных тектонических движений (на примере некоторых сейсмоактивных зон Азиатского горного пояса).— В кн.: Геофизические исследования в сейсмоактивных зонах. Материалы заседаний комиссии по изучению сейсмоопасных зон методами разведочной геофизики МСССС. (Сессия секции сейсмологии) 25—29 мая 1970. М.: изд. ВНИИГеофизика, 1971, с. 59—62.

Огоноченко В. П. Цифровые коды геологического строения городских территорий как средство их типизации и районирования.— В кн.: Методы типизации и картирования геологической среды городских агломераций для решения задач планирования инженерно-хозяйственной деятельности (тезисы докладов). М.: МосЦТИСИЗ ПО «Стройизыскания», 1981, с. 37—38.

Одинцов М. М. Геологические науки в естественном и общественном производстве.— В кн.: Геологические исследования в развитии производительных сил Восточной Сибири за 60 лет. Иркутск: изд. ВСФ СО АН СССР, 1978, с. 58—68.

Орлов В. О., Дубнов Ю. Д., Меренков Н. Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений.— Л.: Стройиздат, 1977.— 183 с.

Павлов С. Ф., Кашик С. А., Ломоносова Т. К. Кайнозойские коры

выветривания и осадочные формации Западного Прибайкалья.— Новосибирск: Наука, 1976.— 144 с.
Печеркин И. А. Геодинамика побережий Камских водохранилищ. Т. II.— Пермь: изд. Пермск. ун-та, 1969.— 308 с.
Писарский Б. И., Шерман С. И. Параметры трещиноватости и их значение при гидрогеологических исследованиях.— В кн.: Формирование и геохимия подземных вод Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1967, с. 25—29.
Полевые геокриологические (мерзлотные) исследования.— М.: Изд-во АН СССР, 1961.— 423 с.
Попов В. Н., Тржцинский Ю. Б. Изменение состава и свойств осадочных пород в зоне гипергенеза.— В кн.: Напряженно-деформированное состояние и устойчивость скальных склонов и бортов карьеров. Фрунзе: Илим, 1979, с. 384—391.
Попов И. В. Инженерная геология СССР. Ч. I.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1961.— 178 с.
Пуляевский Г. М., Овчинников Г. И. Некоторые особенности динамики береговой зоны Братского водохранилища.— В кн.: Региональная гидрогеология и инженерная геология Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1978, с. 92—97.
Рященко Т. Г. Корреляционно-регрессионный анализ и прогнозирование при инженерно-геологическом изучении состава и свойств четвертичных пород.— В кн.: Закономерности и прогнозирование природных явлений. М.: Наука, 1980а, с. 135—142.
Рященко Т. Г. Опыт применения кластер-анализа при инженерно-геологических исследованиях.— Инженерная геология, 1980б, № 3, с. 108—114.
Сергеев Е. М. Рациональное использование геологической среды.— Природа, 1977, № 1, с. 85—93.
Сидоренко А. В. Человек, техника, Земля.— М.: Недра, 1967.— 58 с.
Скворцов Г. Г., Романовская Л. И. Инженерно-геологические исследования и прогнозы при разведке месторождений полезных ископаемых.— М.: Недра, 1966.— 160 с.
Солоненко В. П. Очерки по инженерной геологии Восточной Сибири.— Иркутск: Иркут. кн. изд-во, 1960.— 88 с.
Солоненко В. П. Сейсмодислокации и сопутствующие явления.— В кн.: Гоби-Алтайское землетрясение. М.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 258—357.
Солоненко В. П. Сейсмогеология и сейсмическое районирование трассы БАМа и зоны ее экономического влияния.— Новосибирск: Наука, 1979.— 67 с.
Солоненко В. П. Уникальный инженерно-сейсмогеологический эксперимент в экономической зоне Байкало-Амурской железной дороги.— В кн.: Международный геологический конгресс, 26-я сессия. Доклады советских геологов. Гидрогеология, инженерная геология и строительные материалы. М.: Наука, 1980, с. 129—143.
Солоненко В. П. Сейсмогеологические условия зоны строительства БАМа.— Иркутск: изд. Ин-та земной коры СО АН СССР, 1981.— 47 с.
Степанов В. М. Гидрогеологическая зональность в горных районах Восточной Сибири.— В кн.: Труды второго совещания по подземным водам и инженерной геологии Восточной Си-

бирп. Вып. 1. Иркутск: изд. Вост.-Сиб. геол. ин-та СО АН СССР, 1959, с. 71—84.

Степанов В. М. Гидрогеологические структуры Забайкалья.— М.: *Недра*, *1980*.— 176 с.

Тржцинский Ю. Б., Будз М. Д., Зарубин П. Е. Оползни, сели, термокарст в Восточной Сибири и их инженерно-геологическое значение.— М.: Наука, 1969.— 135 с.

Трофимов В. Т. Инженерно-геологическая типизация и районирование территории.— Инженерная геология, 1982, № 6, с. 47—52.

Усть-Илимское водохранилище. Подземные воды и инженерная геология территории.— Новосибирск: Наука, 1975.— 218 с.

Файбушевич В. М., Дрынкин А. П., Молдованова Л. Г. Минеральный источник Арасан-Булак.— Тр. Узб. Ин-та курортологии и физиотерапии, *1961*, *вып. 16*, с. 97—107.

Феропонтова В. И. Экономическая оценка ущерба, наносимого природохозяйственным объектам железорудной промышленностью КМА.— Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1979, № 2, с. 34—40.

***Филиппов* В. М., Тржцинский Ю. Б.** Формирование и динамика карстовых пещер речных долин Приангарья.— В кн.: Тезисы докладов на Всесоюзном совещании «Состояние и задачи карстово-спелеологических исследований.» М.: Наука, 1975, с. 144—147.

Флоренсов Н. А. О неотектонике и сейсмичности Монголо-Байкальской горной области.— Геол. и геофиз., *1960*, № 1, с. 74—90.

Чистотинов Л. В., Невечеря В. Л. Количественные методы прогноза криогенного пучения грунтов. Обзор. Гидрогеология и инженерная геология.— М.: изд. ВИЭМС, 1975.— 68 с.

Шешуков А. А. *Моделирование геологических* полей в целях оптимизации объемов опробования при инженерно-геологической разведке (на примере территории Тольяттинского промышленного комплекса). Автореф. канд. дис.— М.: изд. ВСЕГИНГЕО, 1978.— 26 с.

Demyanovich N. I., Popov V. N., Ryaschenko T. G., Trzhtsinsky U. B. The importance of lithogenesis in the formation of sedimentary rock properties in the central Priangaria region.— Bull. of IAEG, 1975, N 11, p. 61—63.

Carlé W. Die Thermalphänomene im Bruchfeld der vulkanischen Taupozone auf der Nordinsel von Neusseeland.— Geol. Jahrb., 1980, C, N 26, S. 127—257.

Chariat M., Ghafouri M. R. Etude des eaux minerales d'Abé-Ali et d'Abé-Alborz Iran.— Tetter et eaux, 1971, N 66, p. 22—25.

Franko O., Kullman E. The relationship between the rainfall and the regime of cold and thermal karst waters of the West Carpthians.— Geol. práce GUDŠ. SAV. Zprávy, 1968, N 44-45, p. 291—301.

Herbst G. Untersuchungen an den Burtscheider Thermalquellen in Aachen.— Z. Dtsch. Geol. Ges., 1954, (1955), Bd 106, N 1, S. 195—198.

Margomenou-Leonidopoulou G. Preliminary report of the research of Aidipsos thermometallic waters.— In: International con-

gress on thermal waters. Geothermal energy and vulkan. Mediterranian Area. V. 2. Athens, 1976, p. 340—351.
Marler G. D. Effects of Hebgen Lake earthquake of August 17, 1959 on the hot springs of the Firehole geyser basins, Yellowstone National Park.— Geol. Surv. Process. Paper, 1964, N 435, p. 185—197.
Marler G. D., White D. E. Seismic geyser and its bearing on the origin and evolution of geysers and hot springs of Yellowstone National Park.— Bull. Geol. Soc. Amer., 1975, v. 86, N 6, p. 749—759.
Motoya Y. Geophys. Bull. Hokkaido Univ., 1981, v. 39, p. 71—80.
Noguchi K., Ueno S., Aikawa Y., Kunitomo K. J. Balneol. Soc. Jap., 1970, v. 21, N 3-4, p. 134—144.
Pelikán V. Geologicke výsledky pruzkumu vyvery teplé vody v Brne.— Časop. minéral. a geol., 1959, v. 4, N 1, p. 134.
Pfannenstil M. Der Ausbruch des Paricutin-Vulkans in Mexiko im Jahre 1943.— Naturwiss. Rundschau, 1955, Bd 8, N 3, p. 100—103.
Plafker G., Ericksen G. E., Conchd J. E. Geological aspects of the May 31, 1970, Peru earthquake.— Bul. Seism. Soc. Amer., 1971, v. 61, N 3, p. 543—578.
Sato K. J. Soc. Eng. Mineral. Springs, Jap., 1977, v. 12, N 2, p. 65—73.
Sobotha E. Recherches sur la situation dés sources thermales et á acide carbonique.— Stud. tehn. si econ. Inst. geol. si geofiz., 1975, E., N 12, p. 149—153.
Спирев Б. Термоминерални извори в Южна България, привързани към тектонски разломни структури.— Списание Бълг. геол. дружества, 1960, т. 21, № 2, с. 8—32.
Spiriev B. Les sources thermominérales en Bulgarie du Sud et leurs relations avec les failles tectoniques.— Compt. rend. 6-es Journées hydraul. Soc. hydrotechn. France Nancy, 1960; v. 2, Grenoble, 1961, p. 495—498, 631; Discuss, p. 530—532.
Trzcinsky Y. B. Gravitationsprozesse in Ostsibirien.— Z. angew. Geol., 1979, H. 11, S. 539—543.
Trzhtsinsky Yu. B., Laperdin V. K. Seismogenic phenomena in the Baikal rift zone.— In: Proc. 4-th inter Congr. IAEG. V. VIII. New Delhi, 1982, p. 67—75.
Vidal T. R. Mecanica del deslisamiento de Ccochacay en el rio Mantoro.— Bol. Soc. geol. Perù, 1976, N 52, p. 73—90.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава 1. **Методы инженерно-геологической оценки геологической среды и прогнозирования ее изменений** 8

§ 1. Структура информационной системы прогноза инженерно-геологических условий (С. К. Рудаков) —

§ 2. Системный анализ при региональном прогнозе экзогенных геологических процессов (В. Н. Попов) 13

§ 3. О построении прогнозных карт инженерно-геологических параметров на ЭВМ (В. Н. Попов, А. А. Шешуков, И. А. Шиверских) 20

§ 4. Составление инженерно-геологических карт для прогнозирования изменений геологической среды (А. Н. Бровкин) 26

§ 5. К методике прогноза физико-химической активности пород и минерального состава их глинистых фракций (Т. Г. Рященко, Т. Ф. Данилова) . . 36

§ 6. Инженерно-геологические исследования трасс подземных магистралей связи и прогноз процессов морозного пучения (И. И. Верхозин, А. Б. Демьянишников). 42

Глава 2. **Изучение закономерностей развития геологических процессов и явлений с целью их прогноза** 49

§ 1. Сейсмотектоника Байкальской рифтовой зоны как основа прогноза экзогенных геологических процессов (В. К. Лапердин, Ю. Б. Тржцинский) . . —

§ 2. Возможности прогноза тектонических явлений по данным о термальных источниках (Л. М. Платонов) 59

§ 3. Выветривание горных пород на юге Восточной Сибири и возможность его прогноза (Ю. Б. Тржцинский, В. Н. Попов, А. Н. Бровкин) 64

§ 4. Эрозионно-суффозионные процессы на Среднем Енисее и их прогноз (В. М. Филиппов, Л. Д. Баскакова) 76

§ 5. О связи современных геологических процессов с трещинно-ослабленными зонами (Н. И. Демьянович, М. В. Комарова, И. Н. Крыжановская) . . 85

Глава 3. **Прогноз антропогенных изменений геологической среды** 93

§ 1. Формирование береговых отмелей Ангарских водохранилищ при различном уровенном режиме (Г. М. Пуляевский, Г. И. Овчинников, В. В. Тарасов) 93
§ 2. К прогнозу заиления Братского водохранилища при низком уровенном режиме (Г. А. Карнаухова, Ф. Н. Лещиков) 103
§ 3. Техногенное изменение экзогеодинамической обстановки на западном участке БАМа и прогноз экзогенных геологических процессов (В. М. Литвин) 108
§ 4. Изменение мерзлотных условий на Харанорском угольном месторождении при его освоении (Ф. Н. Лещиков, В. И. Спесивцев) 123
§ 5. Прогноз изменения геологической среды при отработке глубоких горизонтов месторождений Ангарской железорудной провинции (Г. Е. Серова, И. И. Верхозин, А. А. Усынин, Л. В. Чемоданова) 127
§ 6. Прогноз водопритоков на Коршуновском железорудном месторождении методом моделирования (Л. И. Аузина, А. Ю. Чернов) 133
Заключение 140
Литература 143

Федор Николаевич Лещиков
Владимир Николаевич Попов
Генний Михайлович Пуляевский и др.

ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ИХ ПРОГНОЗ

Утверждено к печати
Восточно-Сибирским филиалом СО АН СССР

Редактор издательства *Е. Б. Бирюкова*
Художественный редактор *С. М. Кудрявцев*
Художник *А. И. Смирнов*
Технический редактор *С. А. Смородинова*
Корректоры *В. А. Бирюкова, Г. И. Шведкина*

ИБ № 23622

Сдано в набор 23.10.84. Подписано к печати 28.06.85. МН-01556. Формат 84 × 108 1/32. Бумага типографская № 3. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 8. Усл. кр.-отт. 8,2. Уч.-изд. л. 9. Тираж 1000 экз. Заказ № 441. Цена 1 р. 40 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Наука», Сибирское отделение.
630099, Новосибирск, 99, Советская, 18.

4-я типография издательства «Наука».
630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.

1 р. 40 к.

4560