

ИНЖЕНЕРНО-  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРИ ГИДРО-  
ТЕХНИЧЕСКОМ  
СТРОИТЕЛЬСТВЕ

JANUSZ DZIEWAŃSKI,  
IGOR SERGIEJEWICZ KOMAROW,  
LEW ALEKSANDROWICZ MOŁOKOW,  
FRITZ REUTER

BADANIA GEOLOGICZNE MASYWÓW SKALNYCH  
W BUDOWNICTWIE WODNYM

WYDAWNICTWA GEOLICZNE  
WARSZAWA 1981

INGENIEURGEOLOGISCHE  
UNTERSUCHUNGEN  
FÜR DEN WASSERBAU IM FELS

Doz. Dr. Inż. JANUSZ DZIEWANSKI  
Prof. Dr. IGOR S. KOMAROW  
Doz. Dr. LEW A. MOŁOKOW und  
Prof. Dr. rer. nat. FRITZ REUTER

VEB DEUTSCHER VERLAG FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE LEIPZIG

ИНЖЕНЕРНО-  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРИ ГИДРО-  
ТЕХНИЧЕСКОМ  
СТРОИТЕЛЬСТВЕ



МОСКВА «НЕДРА» 1981

УДК 624.131 : 627.4

Инженерно-геологические исследования при гидротехническом строительстве/  
Я. Дзеваньский, И. С. Комаров, Л. А. Молоков, Ф. Рейтер.—М., Недра,  
1981. 352 с.

Обобщен опыт инженерно-геологических исследований, выполненных в СССР, ПНР и ГДР, при гидротехническом строительстве. Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой условий строительства и учетом различных геологических факторов. Приведены примеры из практики гидротехнического строительства в СССР, ПНР и ГДР. Рассмотрены вопросы взаимодействия сооружений и массивов горных пород и геологические прогнозы, проблемы влияния гидротехнического строительства на окружающую среду. Описана методика геологических исследований. Даны рекомендации по вопросам накопления и обработки информации с использованием ЭВМ по составлению отчетных материалов.

Для инженеров-геологов и других специалистов по изысканиям, проектированию и строительству гидротехнических сооружений.

Табл. 11, ил. 76, список лит.—282 назв.

Авторы:

Я. Дзеваньский (ПНР), И. С. Комаров (СССР), Л. А. Молоков (СССР),  
Ф. Рейтер (ГДР)

Рецензент—

канд. геол.-минер. наук А. Н. Марков (Гидропроект)

Януш Дзеваньский  
Игорь Сергеевич Комаров  
Лев Александрович Молоков  
Фриц Рейтер

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Редактор издательства Л. И. Березовская  
Переплет художника Е. Г. Капустянского  
Художественный редактор Е. Л. Юрковская  
График-иллюстратор А. Т. Царева  
Технический редактор Л. Я. Голова  
Корректор Е. С. Глуховская

ИБ № 858

Сдано в набор 14.04.81. Подписано в печать 13.08.81. Т-24531. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 1. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 22,0.  
Усл. кр.-отт. 22,0. Уч.-изд. л. 24,34. Тираж 4200 экз. Заказ 145/6219-2. Цена 2 руб.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.

© Издательство «Недра» 1981

20806-403  
И 043(01)-81 24-81 3202000000

© WYDAWNICTWA GEOLICZNE 1981  
© VEB DEUTSCHER VERLAG FÜR  
GRUNDSTOFFINDUSTRIE 1981

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Многостороннее сотрудничество между Советским Союзом, Польской Народной Республикой и Германской Демократической Республикой создает надежную основу для развития народного хозяйства этих стран, углубления экономической интеграции. Все более весомый вклад в решение этих задач вносят научно-технические связи между высшими учебными заведениями. Такое сотрудничество успешно развивается уже в течение многих лет между Московским геологоразведочным институтом им. С. Орджоникидзе, Krakowskoy горно-металлургической академией и Фрайбергской горной академией. Данная книга является результатом совместных инженерно-геологических исследований для обоснования проектов гидротехнического строительства.

В настоящее время для успешного решения проблем энергетики и рационального использования водных ресурсов, баланс которых становится все более напряженным, требуется строительство крупных и сложных гидротехнических комплексов, включающих высокие плотины, подземные и наземные здания ГЭС, многокилометровые тунNELи большого сечения и многие другие сооружения. Для возведения таких комплексов необходимо проведение детальных и разносторонних инженерно-геологических исследований с составлением надежных прогнозов взаимодействия проектируемых сооружений с геологической средой и окружающей природой. В результате научно-технического прогресса в области инженерно-геологических исследований появились новые методы и технические средства, которые позволили поднять изыскания на более высокий качественный уровень. Применение аэрокосмической и наземной фототеодолитной съемки, широкого комплекса геофизических методов, использование новых технических средств для проходки буровых скважин и горных выработок расширили возможности инженерно-геологической разведки, но одновременно существенно повысили требования к квалификации специалистов, работающих в этой области. Настоящая книга призвана познакомить читателей с современным состоянием проблемы, задачами и общей структурой инженерно-геологических исследований, применяемыми методами и техническими средствами, а также с инженерно-геологическими условиями некоторых наиболее крупных и интересных гидроузлов, построенных в СССР, ПНР и ГДР в последние десятилетия.

Первая часть книги (главы 1—4) посвящена вопросам, связанным с характеристикой массивов горных пород, их взаимодействием с окружающей средой и проектируемыми

сооружениями, классификацией массивов, а также обобщению опыта изысканий при строительстве сооружений на массивах разных типов в СССР, ПНР и ГДР. При изложении этих вопросов авторы стремились с одной стороны сохранить систему представлений и поднятий, сложившихся в инженерной геологии за длительный период ее развития, а с другой — воспользоваться некоторыми положениями системного анализа, позволяющими более глубоко и полно исследовать массивы горных пород как геологические системы. Для того чтобы избежать разнотечений, авторы старались дать определения всем понятиям, которые отличаются от общепринятых, не прибегая при этом к формализации, которая неизбежно влечет за собой существенное усложнение понятий и может иметь смысл только при создании единой понятийной системы во всей отрасли знания.

Главы 5—6 охватывают вопросы методики инженерно-геологических исследований. Здесь авторы отказались от ставшего традиционным изложения материала по видам или методам исследований (аэрометоды, геофизические методы и пр.), поскольку они достаточно подробно изложены в многочисленных специальных руководствах, и сосредоточили свое внимание на исследовании некоторых узловых вопросов изучения массивов горных пород, которые обычно требуют применения комплекса методов. Это такие вопросы, как оценка структуры массива горных пород, гидрогеологических условий, изучения физических полей, физико-механических свойств пород и др.

Наконец, глава 7 посвящена некоторым специальным вопросам, которые возникают при проектировании крупных гидротехнических сооружений: исследованиям для создания противофильтрационных завес, определению мощности зоны съема, поискам и разведке строительных материалов и др.

Небольшой объем книги заставил отказаться от изложения ряда аспектов проблемы, хотя некоторые из них имеют большое практическое значение. Это относится в первую очередь к водохранилищам, исследование условий создания которых нередко составляет значительную часть всего объема изысканий, а по сложности проблем проектирования они часто не уступают основным сооружениям. Однако изложение этого вопроса даже в самой общей форме привело бы к сокращению других разделов книги, которые и в настоящем виде в ряде случаев изложены с излишней краткостью. По этой причине авторы исключили из рассмотрения данную тему, а также весьма специфические вопросы проведения изысканий для обоснования проектов гидроаккумулирующих станций (ГАЭС).

Книга является совместным трудом специалистов СССР (И. С. Комаров, Л. А. Молоков), ПНР (Я. Дзеваньский) и ГДР (Ф. Рейтер).

Авторы выражают глубокую благодарность А. Г. Лыкошину и А. Н. Маркову за советы, помощь и ценные замечания.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие народного хозяйства СССР и других социалистических стран, рост промышленного производства, интенсификация сельского хозяйства, повышение жизненного уровня населения в большей степени зависят от успешного решения проблемы рационального использования водных ресурсов. Последние сосредоточены главным образом в речном стоке и используются для получения электроэнергии, питьевого и хозяйственного водоснабжения, обводнения и орошения засушливых земель, создания зон отдыха и пр.

Электроэнергия, вырабатываемая гидроэлектростанциями, не только дешевле получаемой на тепловых станциях, но и, что не менее важно, не требует расходования запасов горючих ископаемых — нефти, природного газа, каменного угля и пр. Гидроэнергетический экономический потенциал Советского Союза, на территории которого протекает около 3 млн. рек с расходом около 4 тыс.  $\text{km}^3$  (17 % мирового речного стока), достигает 1095 млрд. кВт. ч, что соответствует примерно 370 млн. т условного топлива. По состоянию на 1977 г. использовалось только 11,5 % этой величины [«Мировая...», 1977]. Значительными гидроэнергетическими ресурсами обладают Польская Народная Республика и Германская Демократическая Республика.

Как показывают экономические расчеты и имеющийся опыт, наиболее выгодным является строительство водохранилищ многоцелевого назначения, обеспечивающих одновременно получение дешевой электроэнергии, водоснабжение, орошение, создание глубоководных транспортных магистралей, осуществление оздоровительных мероприятий и пр.

Речной сток характеризуется значительной неравномерностью как в годовом, так и в многолетнем разрезе, и для его использования в перечисленных выше целях требуется искусственно регулирование, которое достигается созданием водохранилищ. Емкость современных водохранилищ достигает десятков и сотен миллионов кубических метров. В Советском Союзе эксплуатируется в настоящее время около 1000 крупных водохранилища общей емкостью около 830 млрд.  $\text{m}^3$ , из них около половины введено в строй в последние 20—25 лет.

Водохранилища создаются как на горных, так и на равнинных реках, но в последнем случае возникает проблема затопления ценных земельных угодий, что наносит значительный ущерб сельскому хозяйству. В связи с этим на Русской равнине в перспективе будут создаваться только сравнительно небольшие водохранилища, рассчитанные в основном на решение задач водоснабжения, а строительство крупных гидроузлов с большими

водохранилищами многоцелевого назначения переносится в основном в горные районы. Но и здесь имеются свои трудности, связанные главным образом с тем, что малые расходы рек и небольшая ширина долин, часто имеющих характер ущелий, требуют для создания достаточно больших регулирующих емкостей строительства высоких плотин. В настоящее время высота многих плотин уже достигает или приближается к 300 м, но и это, по-видимому, не предел, и можно ожидать, что к концу столетия высота плотин достигнет 400—500 м. Возвведение таких плотин — сложная инженерная задача, требующая получения полных и надежных сведений об инженерно-геологических условиях участка возведения плотин и умения достоверно предсказывать геологические процессы, которые могут быть вызваны строительством. Недостаток информации или ошибки в прогнозах могут привести к разрушению сооружений, что при современном размере водохранилищ грозит катастрофическими последствиями. Отметим в этой связи, что примерно из 9 тыс. высоких плотин, возведенных в мире в период с 1900 по 1965 г., было разрушено около 90 (1 %) и около 200 (более 2 %) получили серьезные повреждения [Stapledon, 1976]. В их число входят такие крупные сооружения, как арочно-гравитационная плотина Сан-Фернандес в США, арочная плотина Мальпассе в Италии и одна из самых высоких арочных плотин в мире — Вайонт во Франции. Аварии плотин сопровождались разрушением населенных пунктов и многочисленными человеческими жертвами. За последние годы произошли две крупные катастрофы — разрушились плотины Вестр Гауздел в Норвегии и Титон в США. Анализ причин произошедших катастроф показал, что примерно в половине всех случаев они были так или иначе связаны с геологией: недостаток геологической информации, неправильная ее интерпретация, недостаточно надежные геологические прогнозы и пр. В Советском Союзе подобного рода катастроф не происходило, что может служить свидетельством надежности выполненных инженерно-геологических исследований и принятых проектных решений.

В Советском Союзе строительство крупных гидроузлов будет осуществляться в перспективе главным образом в горах Кавказа, Средней Азии, в пределах Сибирской платформы, на Дальнем Востоке и в некоторых других регионах. Условия строительства гидроузлов в горах Кавказа и Средней Азии в целом благоприятны. Устойчивое воздымание этих территорий в позднем кайнозое привело к формированию узких и глубоких речных долин, удобных для строительства компактных высоконапорных ГЭС с большими регулирующими емкостями, а прочные скальные породы образуют надежное основание плотин и других сооружений. Однако здесь имеются определенные трудности. Это прежде всего высокая сейсмичность территории, наличие многочисленных тектонических нарушений разрывного ха-

рактера, интенсивное развитие гравитационных процессов (оползней, обвалов и др.), нередко достигающих грандиозных масштабов. В настоящее время в горах Кавказа завершается строительство самой высокой в мире арочной плотины Ингури высотой 271 м, в горах Средней Азии возведены Нурекская каменно-набросная плотина высотой 300 м, Токтогульская гравитационная плотина высотой 215 м и др. В перспективе здесь планируется строительство самой высокой в мире каменно-набросной плотины Рогунской ГЭС на р. Вахш.

Значительными запасами гидроэнергии (700 млн. кВт·ч) обладает Восточная Сибирь, где сосредоточены, кроме того, большие лесные богатства, крупные месторождения угля, черных и цветных металлов и других полезных ископаемых. Строительство ГЭС ускорит экономическое развитие этого края и позволит создать на базе энергоемких предприятий ряд новых промышленно-территориальных комплексов. Территорию Восточной Сибири пересекают крупнейшие реки Советского Союза: Лена, Енисей и др. Предварительные проработки показывают, что только на этих двух реках можно построить 14 гидроузлов общей мощностью около 80 млн. кВт [Кудояров, 1976]. Основные трудности при строительстве гидроузлов в северной части этого региона будут связаны с развитием льдонасыщенных многолетнемерзлых горных пород.

Польская Народная Республика по обеспеченности водными ресурсами занимает одно из последних мест среди европейских стран. В то же время потребности в воде народного хозяйства Польши быстро растут: с 13 км<sup>3</sup> в 1975 г. до 17 км<sup>3</sup> в 1980 г. и 29 км<sup>3</sup> (по прогнозу) в 1990 г. [Грохульский, 1979]. По данным водохозяйственных расчетов это составляет уже в настоящее время около 50 % суммарного стока рек в маловодные годы, а в 1990 г. достигнет почти 100 %. В связи с этим вопрос регулирования речного стока с созданием водохранилищ приобретает для народного хозяйства ПНР особое значение. В ближайшие годы основное внимание будет уделено р. Висле и ее притокам, где будет создан каскад водохранилищ, что значительно улучшит водный баланс страны, позволит создать единую глубоководную транспортную магистраль и даст около 6 млрд. кВт·ч электроэнергии. В последние годы в ПНР выстроены ряд крупных гидроузлов: Мичковце, Солина и др.

Напряженный водный баланс складывается в Германской Демократической Республике, где также уделяется большое внимание регулированию стока рек и созданию водохранилищ. В послевоенный период в ГДР построено значительное число крупных гидроузлов: Ора, Хоэнварта и др. В перспективе строительство новых гидроузлов намечается в основном в пределах средневысотных гор и их предгорий (Рудные горы, Тюрингский лес, Гарц и др.), а также мезозойских мульд в центральных районах страны.

Основанием плотин и других крупных сооружений при строительстве ГЭС в горных районах будут служить прочные скальные породы разного генезиса.

Проблемы строительства плотин на скальных основаниях возникли в СССР с первых шагов осуществления ленинского плана электрификации России (ГОЭЛРО). Первое крупное гидротехническое сооружение в СССР — Волховская ГЭС — было возведено на массиве трещиноватых известняков ордовикского возраста недалеко от Ленинграда. В 1932 г. было завершено строительство Днепровской ГЭС им. В. И. Ленина (Днепрогэс — I) на массиве сильновыветрелых трещиноватых гранитов и гнейсов, разбитых многочисленными тектоническими нарушениями. В последующие годы в СССР было выстроено на скальных массивах значительное число крупных гидроузлов с различными типами плотин (гравитационными, арочными, из местных строительных материалов), с наземным и подземным размещением машинных залов, применением различных защитных и мелиоративных мероприятий и пр. Многие ГЭС расположены в зонах высокой сейсмичности (Ингурская, Токтогульская, Нуруекская и др.), в области развития многолетней мерзлоты (Колымская, Вилюйская и др.), в условиях интенсивного развития древнего и современного карста (Павловская, Каховская, Плявинская ГЭС и др.), гравитационных процессов и пр. В настоящее время в СССР имеется опыт изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных гидроузлов практически в любых природных (в том числе и инженерно-геологических) условиях, которые могут встретиться на территории СССР и других стран мира (за исключением специфических условий тропического пояса). Большой и ценный опыт накоплен также в ПНР и ГДР, где выстроен ряд крупных ГЭС в весьма сложных и неблагоприятных геологических условиях.

Обобщение опыта инженерно-геологических исследований при строительстве крупных гидроузлов на скальных основаниях является основным содержанием этой книги. На основании анализа и обобщения имеющегося опыта даются также общие рекомендации по методике исследований, составлению инженерно-геологических прогнозов и некоторым другим наиболее важным вопросам. При изложении материала авторы придерживались некоторых принципиальных установок, характерных для школы инженерной геологии, сложившейся в СССР и других странах социалистического содружества. Важнейшая из них заключается в том, что задача инженера-геолога при проведении изысканий должна заключаться не только в детальном и всестороннем геологическом описании массивов горных пород — оснований или среды проектируемых сооружений, но и в прогнозе тех геологических процессов, которые могут возникнуть (или активизироваться) в результате формирования природно-техногенной системы «массив горных пород — комплекс инженерных

сооружений...». Сложная организация такой системы, многофакторный характер возникающих процессов, воздействие окружающей среды, а также недостаток и ненадежность получаемой информации делают решение этой задачи особенно трудным, так как требуют широкого комплексного подхода, основанного на умелом сочетании различных методов — от историко-геологического анализа до применения различных моделей, разработанных в механике грунтов, механике горных пород и некоторых других наук физико-математического цикла.

Особенно большие перспективы повышения надежности прогнозов связаны в настоящее время с применением метода инженерно-геологических аналогий на базе громадного фактического материала, который накоплен в СССР и других странах при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений в разной геологической обстановке. Но для применения этого метода необходимо располагать в первую очередь достаточно эффективной классификацией массивов горных пород, без чего невозможно осуществление каких-либо обобщений или экстраполяции. В соответствии с этим в книге рассмотрены некоторые аспекты этой проблемы и предложен вариант классификации, основанный на использовании геоструктурного, формационного, генетического и петрографического принципов, что позволяет учитывать при построении таксономической системы наиболее важные геологические факторы, определяющие условия строительства крупных гидротехнических сооружений. Предложенный вариант классификации, несомненно, требует дальнейшего совершенствования и детализации, но принятый подход к ее построению представляется нам эффективным и отвечающим в достаточной степени теоретическим основам инженерной геологии и практическому назначению классификации. Возражения специалистов против формационного подхода в связи с некоторой неопределенностью самого понятия «формация», трудностью практического выделения формаций и некоторой «размытостью» формационных множеств, не кажутся нам убедительными, так как этими же недостатками страдают и многие другие классификации, например геоструктурные, находящие тем не менее успешное применение и в практике, и в теории. Необходимо также учитывать, что формационные представления в настоящее время интенсивно развиваются и, вероятно, получат в ближайшие годы более строгую, в той или иной степени формализованную основу.

## ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Гидротехнические сооружения принято подразделять на морские, озерные и речные, а последние по назначению — на гидроэнергетические, транспортные, мелиоративные, создаваемые для целей водоснабжения и др. В большинстве случаев сооружения возводятся в комплексе, объединяющем общим назначением и местоположением. Такие комплексы получили название *гидроузлов*. К важнейшему типу гидроузлов относятся *речные*, обычно решающие одновременно водосборные, энергетические, транспортные, ирригационные и другие задачи.

Речные гидроузлы делятся в свою очередь на три основных типа:

а) низко- и средненапорные, состоящие обычно из плотины, здания ГЭС, водозаборных сооружений и шлюзов, входящих в общий напорный фронт (рис. 1.1). Странят такие гидроузлы на равнинных реках с плотинами небольшой высоты — 25—30 м, изредка больше. По этой схеме в СССР построены Волховская, Камская (рис. 1.2), ГЭС им. В. И. Ленина (Днепрогэс) на Днепре, Днепродзержинская и многие другие гидроузлы.

б) высоконапорные, в состав которых входят те же сооружения, но здание ГЭС вынесено в нижний бьеф и вода к турбинам подается с помощью водоводов (рис. 1.3). Такие гидроузлы имеют значительно более высокий напор (до 100—120 м) и возводятся обычно в предгорьях с глубоким врезом речных долин. В СССР по такой схеме сооружены Братская (рис. 1.4), Усть-Илимская, Красноярская и другие крупные ГЭС. Особенно хорошо видна компоновка такого гидроузла на рис. 4.10 (Мингечаурская ГЭС);

в) деривационные — для создания напора вода направляется в деривационные каналы или туннели, имеющие меньшие уклоны, чем естественный водоток. Из деривации вода подводится к турбинам с помощью трубопровода (рис. 1.5). В состав деривационного узла входят: головные сооружения (плотина и водозабор), деривация, уравнительная шахта или башня, напорный бассейн, турбинный водовод и здание ГЭС. В деривационных гидроузлах здание ГЭС может быть отнесено от плотины на значительное расстояние (десятка километров). Высота плотины в этом случае не играет определяющей роли и может изменяться от нескольких метров до десятков или сотен метров, а суммарный напор может измеряться несколькими

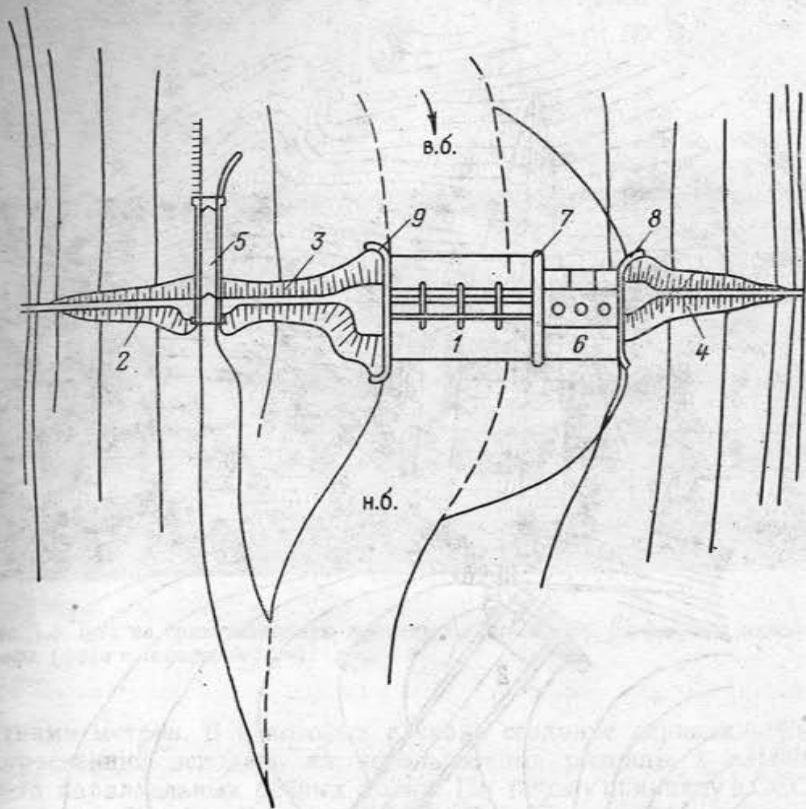


Рис. 1.1. План низконапорного речного гидроузла.  
1 — водосливная бетонная плотина; 2, 3, 4 — глухие земляные плотины; 5 — судоходный шлюз; 6 — здание ГЭС; 7, 8, 9 — раздельные и сопрягающие устои

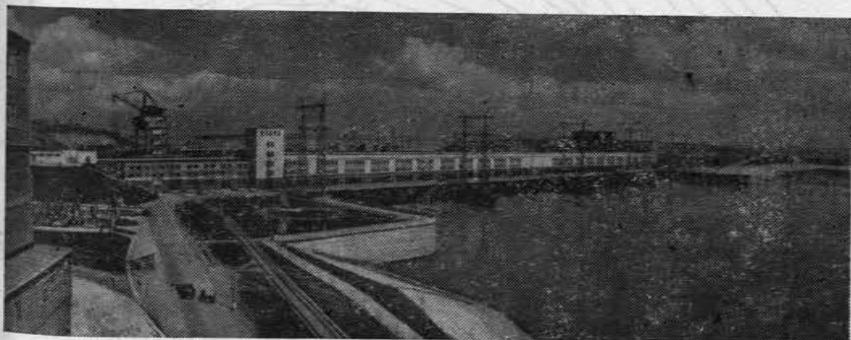


Рис. 1.2. Вид на низконапорный речной гидроузел со стороны нижнего бьефа, Камская ГЭС. По Г. К. Маменко [1967]

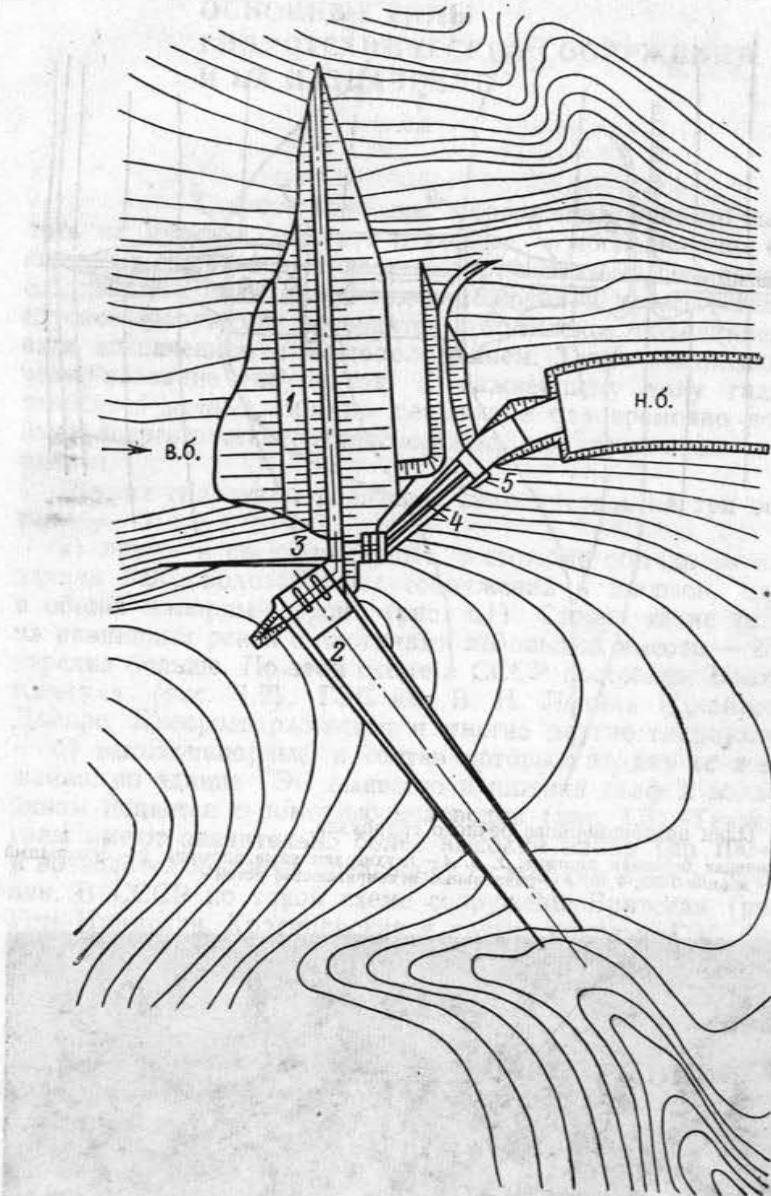


Рис. 1.3. План высоконапорного речного гидроузла в горной местности.

1 — глухая земляная плотина; 2 — водосброс; 3 — водозабор; 4 — трубопровод; 5 — здание ГЭС

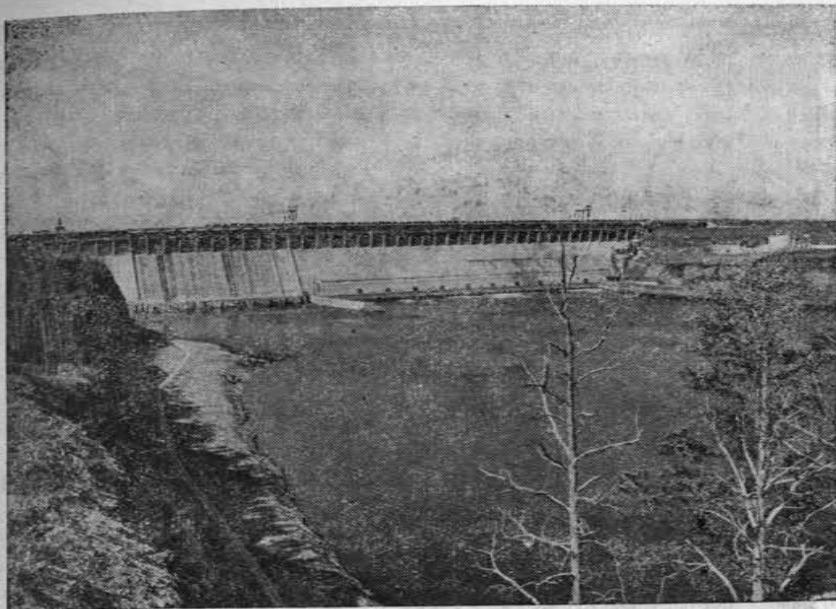


Рис. 1.4. Вид на гравитационную плотину Братской ГЭС со стороны нижнего бьефа (фото «Информэнерго»)

сотнями метров. В некоторых случаях создание деривационных гидростанций основано на использовании разницы в глубине вреза параллельных речных долин. По такому принципу в СССР построена Теребля-Рикская ГЭС в Закарпатье. Этот узел состоит из плотины на р. Теребля высотой около 40 м, деривационного туннеля длиной 4 км и напорно-станционного узла на склоне долины р. Рики, долина которой врезана на 200 м глубже, чем долина р. Теребля. Таким образом, общий напор составил 240 м.

Остановимся кратко на характеристике отдельных сооружений.

### 1.1. Плотины

По назначению все плотины принято делить на водоподъемные и водохранилищные. Первые служат для улучшения условий судоходства, водозaborа и пр. и не создают в большинстве случаев обширных водоемов, вторые — для накопления воды и последующего расходования ее для тех или иных целей. Обычно это высокие плотины, образующие емкие водохранилища, которые позволяют регулировать и перераспределять расход реки по временам года (сезонное регулирование)

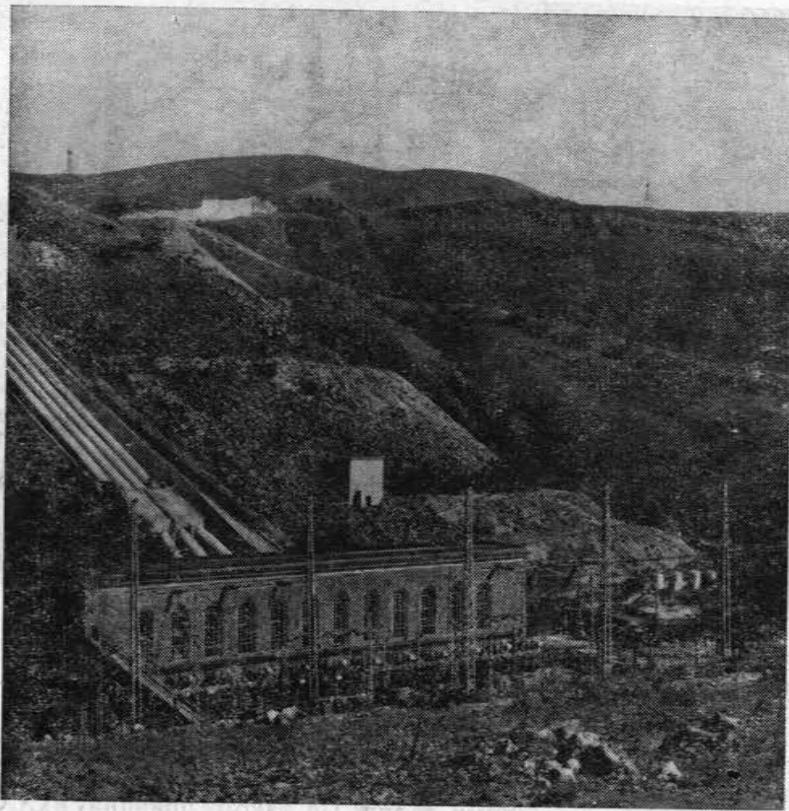


Рис. 1.5. Напорный трубопровод и машинный зал Гюмушской ГЭС (фото «Информэнерго»)

или в течение ряда лет (многолетнее регулирование). По условиям пропуска воды различают плотины водосливные, допускающие перелив воды через гребень сооружения или через специальные отверстия, и глухие, где для этой цели сооружаются специальные водосбросы — донные трубы, быстротоки и др.

Перегораживая реку, плотина находится под постоянным воздействием воды и в свою очередь изменяет естественный режим рек. Образование напора на плотине (разность уровней между ее верхним и нижним бьефом) вызывает развитие горизонтального давления на тело плотины, которое стремится сдвинуть ее или опрокинуть. Одновременно под телом плотины формируется фильтрационный поток, который давит на ее подошву (противодавление) и вместе с гидростатическим напором взвешивает плотину и снижает ее устойчивость. Фильтрационный поток может вызвать также ряд опасных явлений в основании сооружения: супфозию (механическую и химическую), выпор

(в местах выхода фильтрационного потока на поверхность и др.). При наличии в основании плотины сильноводопроницаемых пород развитие фильтрации может привести к большим и недопустимым потерям воды из водохранилища. Для борьбы с этими явлениями применяются специальные дренажные и противофильтрационные устройства, закладываемые в основание и бортовые примыкания плотины.

По материалу, используемому для сооружения плотин, последние подразделяются на два типа: бетонные плотины и плотины, возводимые из местных строительных материалов.

### 1.1.1. Бетонные плотины

Бетонные плотины — широко распространенный тип водонапорных сооружений, возводимый в различных инженерно-геологических условиях. По конструкции они делятся на гравитационные, контрфорсные и арочные. Применяются также комбинированные плотины, когда в состав напорного фронта включаются арочные, гравитационные и контрфорсные плотины в разных сочетаниях. Часто они сопрягаются также с плотинами, выполненными из местных строительных материалов.

Высокие бетонные плотины строятся на скальных основаниях, сложенных различными магматическими, метаморфическими и осадочными породами, нередко сильно дислоцированными и трещиноватыми. Современные методы укрепления скальных массивов и снижения их водопроницаемости позволяют успешно «лечить» основания, имеющие даже весьма значительные дефекты — разломы, зоны дробления, крупные карстовые пустоты и др., поэтому наличие таких дефектов в настоящее время не может явиться причиной отказа от строительства бетонных плотин. Это относится и к высокой сейсмичности территории. Имеющийся опыт свидетельствует о том, что высокие бетонные плотины выдерживают без серьезных повреждений землетрясения силой 8—9 баллов.

Гравитационные плотины (см. рис. 1.2, 1.3, 1.5, 1.7) представляют собой конструкцию из крупных монолитов бетона, имеющую значительную массу и оказывающую сопротивление давлению воды со стороны верхнего бьефа главным образом за счет сил трения, развивающихся по основанию сооружения. Форма гравитационных плотин зависит от прочности основания, а протяженность контакта с основанием — от требований устойчивости плотины на сдвиг. При опирании на прочные породы даже высокие плотины могут иметь весьма обжатый профиль.

По общей стоимости и расходу цемента гравитационные плотины менее экономичны, чем другие типы бетонных плотин, поэтому в настоящее время для экономии бетона применяются

различные конструктивные мероприятия: надрезы, расширенные швы, полости и др.

Гравитационные плотины строятся в широких речных долинах, где отношение  $L/H$  ( $H$  — высота плотины,  $L$  — ее длина), обычно называемое коэффициентом створности, превышает 10. Такие долины наиболее характерны для предгорий и платформенных равнин.

Высокие гравитационные плотины передают на естественное основание значительные нагрузки (3—6 МПа), что позволяет возводить их только на скальном основании. Большую опасность представляет сдвиг плотин по контакту бетон—скла и различным субгоризонтальным поверхностям ослабления. Поэтому выветрелые или другие слабые разности пород удаляют, с тем чтобы плотина опиралась на невыветрелую прочную скалу. Все косые и вертикальные трещины закрепляют нагнетанием цемента, а горизонтальные прорезают бетонными зубьями. Весьма жесткие требования предъявляются к производству работ по вскрытию котлованов с целью обеспечения сохранности естественного основания. Для обеспечения надежного сопряжения между телом плотины и основанием подошве плотины придают пилообразную форму или закладывают верховой и низовой зубья. Кроме того, контакт и подстилающие породы цементируют путем нагнетания раствора в неглубокие скважины. Для снижения фильтрации в основании и примыканиях плотины предусматриваются противофильтрационные устройства. Основным видом противофильтрационных устройств являются цементационные завесы, создаваемые путем нагнетания цемента в скважины. При большой мощности сильноводопроницаемых пород устраивают завесы переменного профиля — более тонкие на глубине и более мощные вблизи контакта с сооружением. Иногда применяются цементно-глинистые растворы, битумы и некоторые виды смол. Для перехвата вод под плотиной и снижения противодавления применяются также дренажные устройства, состоящие из галерей и вертикальных скважин.

В СССР имеется большой опыт строительства плотин этого типа. Первая гравитационная плотина высотой 20 м была выстроена в составе Волховского гидроузла еще в 1926 г. В 1932 г. была возведена Днепровская ГЭС им. В. И. Ленина (ДнепроГЭС) с плотиной высотой 62 м. Высота многих гравитационных плотин, выстроенных в СССР в последние десятилетия, превышает 100 м: Братская на Ангаре — 125 м (см. рис. 1.5), Красноярская на Енисее — 118 м (рис. 1.6) и Токтогульская на Нарыне — 215 м (см. рис. 4.13). В ГДР наиболее высокой гравитационной плотиной является Раппбоде — 105 м, в ПНР — Солина — 76 м.

Контрфорсные плотины воспринимают давление воды плоскими, арочными или купольными перекрытиями, опирающимися на опоры — контрфорсы, которые передают давление на

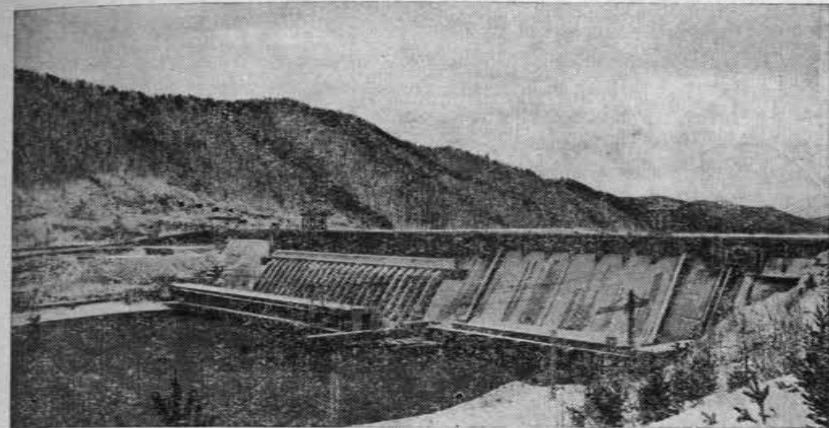


Рис. 1.6. Бетонная гравитационная плотина Красноярской ГЭС (фото «Информэнерго»)

основание. Для повышения устойчивости плотин напорная грань перекрытий делается наклонной в сторону верхнего бьефа, благодаря чему сооружение оказывается прижатым к основанию давлением воды. Плотины этого типа строят преимущественно из железобетона, поэтому их конструкция обладает легкостью и требует значительно меньше бетона (в среднем около 50 % от расхода бетона на гравитационные плотины). Соответственно ниже и их стоимость — около 90 % от стоимости гравитационных [Бечин, 1974].

Контрфорсные плотины наиболее целесообразно возводить в сравнительно широких долинах с  $L/H$  в пределах 6—10, но иногда они строятся и в более узких створах.

Устойчивость контрфорсных плотин обеспечивается сопротивлением сдвигу опор — контрфорсов, поэтому основание под ними должно быть достаточно надежным. Весьма ответственным элементом контрфорсных плотин является также сопряжение напорного перекрытия с основанием. Оно выполняется обычно в виде зуба — заглубления, доводимого до сохранных пород в основании плотины или до тела цементационной завесы, которая является обязательным элементом сооружения, воздвигнутого на трещиноватых скальных породах. Дренаж основания контрфорсных плотин обычно не предусматривается, но в местах выхода фильтрующихся вод на дневную поверхность часто устраиваются специальные противосуффозионные устройства в виде обратных фильтров и систем разгружающих скважин.

В СССР опыт строительства контрфорсных плотин небольшой. В 1977 г. была выстроена Зейская массивная контрфорсная плотина высотой 113 м, а в 1978 г. — Андижанская контрфорсная плотина на р. Карадарье высотой 85 м.

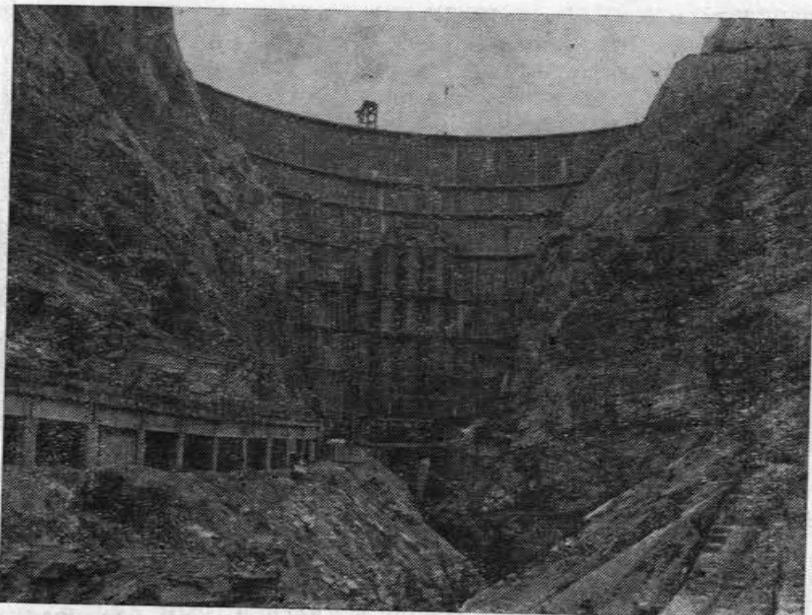


Рис. 1.7. Вид на арочную плотину Чиркейской ГЭС со стороны нижнего бьефа (фото «Информэнерго»).

В бортах долины обнажаются тонкослоистые известняки с прослойками мергелей и глин

**Арочные плотины** (криволинейной формы в плане), в отличие от гравитационных и контрфорсных плотин, работают на распор и передают основную часть усилия, создаваемого давлением воды, на скальные берега или специально возведенные устои. Идеальными для строительства арочных плотин считаются глубокие V-образные долины с симметричным профилем при коэффициенте створности  $L/H < 2$ , но для многих арочных плотин, выстроенных в последние годы, это соотношение составляет 3—5, а иногда и больше (до 6—8). Для строительства арочных плотин не является препятствием и асимметричный профиль долины. Поскольку арочные плотины передают на борта речных долин большие усилия (до 10 МПа), борта должны быть сложены прочными и достаточно монолитными породами без крупных нарушений. Трещиноватость в той или иной степени свойственна всем породам, поэтому для «омоноличивания» береговых упоров применяется комплекс укрепительных мероприятий: цементация, анкерование и др.

Для характеристики арочных плотин используется специальный показатель — коэффициент стройности, характеризующий относительную толщину плотины и выражаемый отношением  $B/H$  ( $B$  — толщина плотины у основания,  $H$  — высота плотины). По этому показателю арочные плотины делятся на тонкие

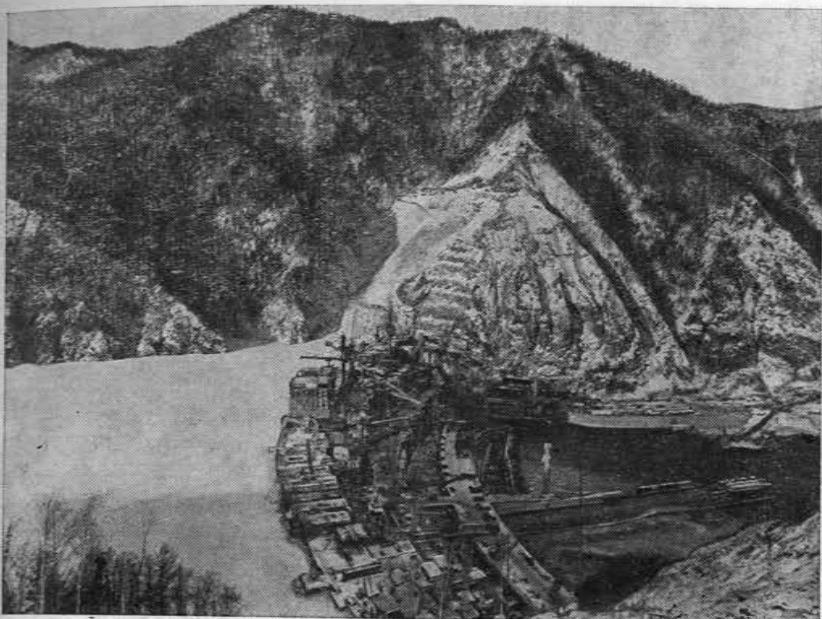


Рис. 1.8. Вид на арочно-гравитационную плотину Саянской ГЭС в период строительства.

На заднем плане в левобережном примыкании обнажаются метаморфические породы (фото «Информэнерго»)

( $B/H < 0,2$ ), толстые ( $0,20 < B/H < 0,40$ ) и арочно-гравитационные ( $0,40 < B/H < 0,6$ ). Арочные плотины различаются также по форме. В узких ущельях возводятся главным образом цилиндрические или слабо искривленные плотины. В широких ущельях по конструктивным причинам приходится увеличивать наклон арок в сторону нижнего бьефа в верхней части сооружения; такие плотины называются купольными. В настоящее время применяются также плотины сложных очертаний, что обеспечивает более равномерное распределение напряжений в теле плотины.

В СССР первая арочно-гравитационная плотина — Гергебильская на р. Кара-Койсу высотой 62 м — была построена в 1937 г. В 1960 г. была возведена Ладжанурская плотина на реке Ладжанури высотой 70 м, а в 1975 г. сооружена Чиркейская плотина на р. Сулак высотой 232 м (рис. 1.7). В настоящее время заканчивается строительство одной из самых высоких арочных плотин в мире — Ингури-ГЭС на р. Ингури высотой 271 м и арочно-гравитационной плотины Саянской ГЭС на р. Енисее высотой 240 м (рис. 1.8). В ГДР наиболее высокая арочно-гравитационная плотина Хоэнварте (75 м) возведена на р. Заале в 1939 г.

### 1.1.2. Плотины из местных строительных материалов

Этот тип подпорных сооружений находит все более широкое применение в современной практике. Такие плотины надежны и долговечны, могут строиться в любых природных, климатических, геологических и сейсмических условиях. При наличии вблизи створа нужных строительных материалов применение плотин этого типа обеспечивает значительную экономию средств. Плотины из местных строительных материалов принято подразделять на каменно-набросные и земляные.

Каменно-набросные плотины возводят главным образом в горных областях, где можно организовать добычу большого количества прочного камня вблизи строительной площадки. Основную часть таких плотин составляет каменная наброска, которая укладывается в тело плотины без применения вяжущих материалов. Для каменной наброски используют магматические, метаморфические или осадочные породы любого петрографического состава, но достаточно морозостойкие, слабо выветривающиеся и нерастворимые в воде. Размер камней, укладывающихся в плотину, не лимитируется, но желательно, чтобы наряду с крупными глыбами присутствовали мелкие, что обеспечивает более плотную укладку. Для предотвращения фильтрации воды через тело плотины создаются специальные противофильтрационные устройства: экраны, диафрагмы, ядра (чаще всего). Для этой цели также используются местные строительные материалы — однородные глинистые грунты среднего состава (суглинки разного генезиса, иногда лёссы). В последние годы начали использовать, кроме того, разнородные глинистые грунты типа морены или щебенисто-глинистого элювия, что обеспечивает высокую плотность укладки грунта в тело плотины при сохранении достаточной его связности.

Каменно-набросные плотины строятся глухими, и пропуск паводковых вод обеспечивается специальными водосбросными сооружениями, устраиваемыми вне тела плотины в берегах реки (открытые и закрытые водосбросы). Строительство водосбросов нередко сопряжено со значительными техническими трудностями, а связанные с ними затраты составляют существенную часть стоимости всего гидроузла.

В СССР строительство каменно-набросных плотин начало осуществляться с 30-х годов, когда был возведен ряд плотин высотой 25—30 м. В последние годы завершено строительство ряда высоких каменно-набросных плотин, среди которых следует упомянуть Чарвакскую на р. Чирчик высотой 154 м и Нурукскую на р. Вахш, высотой 300 м (рис. 1.9). Значительное число каменно-набросных плотин возведено в ПНР и ГДР.

Строительство каменно-набросных плотин можно вести круглый год (не прерывая работ в зимний период), что имеет боль-

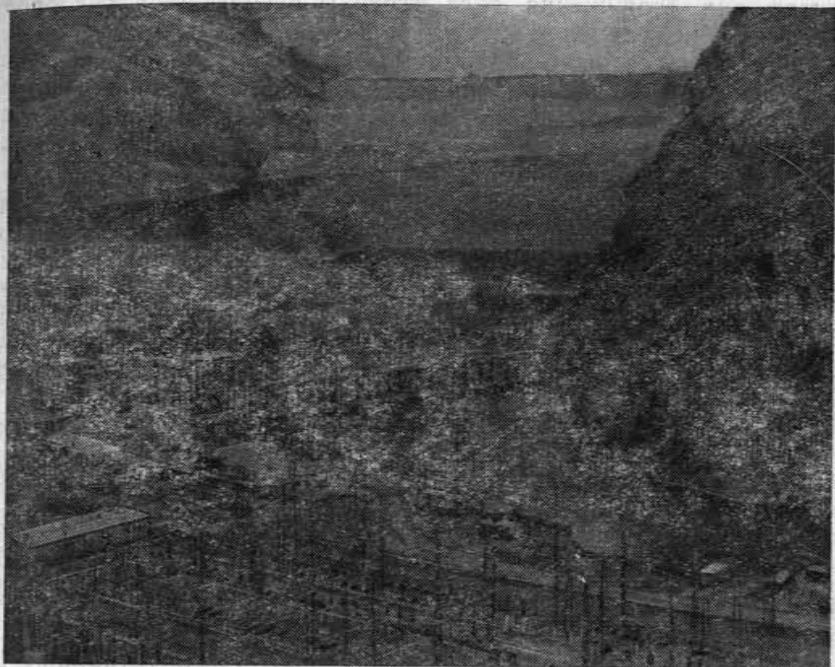


Рис. 1.9. Вид на каменно-набросную плотину Нурукской ГЭС со стороны нижнего бьефа (фото «Информэнерго»).

В береговых примыканиях обнажаются дислоцированные осадочные породы (песчаники, алевролиты)

шое значение в северных и горных районах СССР с суровыми климатическими условиями. Здесь в последние годы возведены Хантайская каменно-набросная плотина на р. Хантайке высотой 60 м и Вилуйская на р. Вилой высотой 65 м.

К каменно-набросным можно отнести также плотины, сооружаемые методом направленного взрыва. В этом случае в тело плотины укладывается горная масса, образующаяся при взрыве сосредоточенных зарядов в склонах речной долины и обладающая в целом невысокой водопроницаемостью. При необходимости снижения фильтрации устраивается противофильтрационный экран из глинистого материала. В СССР построены две крупные плотины методом направленного взрыва: противоселевая в урочище Медео на р. Малая Алмаатинка выше г. Алматы и Байпазинская на р. Вахш.

Земляные плотины отличаются от каменно-набросных тем, что для отсыпки тела плотины используется сравнительно тонкий материал — от гравийно-галечного до песчаного. В зависимости от технологии укладки грунта в тело плотины различают плотины намывные и насыпные. В первом

случае для сооружения тела плотины используется русловой песчаный или гравийно-галечный аллювий, подаваемый к месту укладки землесосными снарядами различных типов, во втором — главным образом аллювий, слагающий высокие речные террасы. Как и каменно-набросные, земляные плотины сооружаются с ядром или другими противофильтрационными элементами. В СССР имеется большой опыт строительства высоких земляных плотин. Еще в 30-х годах при строительстве канала им. Москвы был сооружен ряд земляных плотин высотой до 25 м. После Великой Отечественной войны были выстроены Иркутская плотина на р. Ангаре высотой 44 м, Капчагайская на р. Или высотой 49 м, Мингечаурская на р. Куре высотой 80 м и др. Высокая земляная плотина была возведена при технической помощи Советского Союза на р. Нил в Египте — Асуанская высотой 110 м.

## 1.2. Водосбросные и водопроводящие сооружения

Емкость водохранилищ, как правило, меньше объема полного стока с прилегающей водосборной поверхности. Поэтому в комплекс гидротехнических сооружений обязательно включаются водосбросные сооружения, обеспечивающие сброс в нижний бьеф избыточных количеств воды (эксплуатационные и катастрофические водосбросы), а также пропуск расходов в строительный период. Водосбросные сооружения используются также для сброса в нижний бьеф шуги, льда, строительного мусора, для полного опорожнения водохранилища или до уровня мертвого объема с целью ремонта водонапорных сооружений. Водосбросные сооружения могут быть расположены в теле плотины или в берегах и подразделяются на два типа: открытые и закрытые. К числу первых относятся отверстия, расположенные в верхней части плотины (водосливы) или открытые каналы, закладываемые в береговых примыканиях, к числу вторых — сквозные отверстия в теле плотины (водоспуски) или тунNELи в береговых примыканиях. Бетонные плотины допускают использование всех без исключения типов водосбросов закрытого и открытого типов, в контрфорсных плотинах водосбросы размещаются в теле опор-контрфорсов или береговых примыканиях; наибольшие ограничения в выборе водосбросных сооружений относятся к строительству плотин из местных строительных материалов. Здесь могут применяться различные типы береговых водосбросов, в редких случаях также трубчатые водосбросы, размещаемые в теле или основании плотины. Стоимость водосбросных сооружений составляет значительную часть стоимости всего гидроузла, например для гидроузлов с бетонными плотинами высотой 100 м и более — до 10—15 %, а для плотин из местных строительных материалов — до 20—25 %.

В комплекс гидротехнических узлов входят также водопроводящие сооружения разного назначения: подводящие и отводящие, деривационные (для подвода воды ГЭС и переброски воды из одного речного бассейна в другой) и др. Они представляют собой открытые каналы и гидротехнические тунNELи. Последние являются особенно сложными инженерными сооружениями, поэтому остановимся на их характеристике подробнее.

Протяженность гидротехнических тунNELей может быть весьма различной и зависит от их назначения, типа и размеров плотины, компоновки гидроузла, топографии местности и других факторов. Так, деривационный тунNEL Ингурской ГЭС имеет длину более 18 км, а тунNEL для переброски воды из р. Арпы в оз. Севан — более 48 км. Суммарная протяженность тунNELей на крупных гидроузлах измеряется десятками километров. Пролеты современных тунNELей составляют 8—20 м, а в отдельных случаях и больше, а сечения достигают 250—300 м<sup>2</sup>. Строительство тунNELей большой протяженности требует выполнения значительного объема подземных скальных работ. Так, при строительстве Нурекской ГЭС объем подземных работ составил 2,5 млн. м<sup>3</sup>, а при строительстве Ингури-ГЭС — 3,2 млн. м<sup>3</sup> [Мостков, 1974]. Ввиду больших объемов тунNELных работ и высокой их стоимости предъявляются высокие требования к определению размеров тунNELей, выбору их типов, конструкции обделки, а также способов их проходки в различных инженерно-геологических условиях. Обделка гидротехнических тунNELей работает в сложных условиях, вследствие различного характера передаваемых на нее нагрузок: внутреннего и внешнего гидростатического давления, давления горных пород, дополнительного давления от веса плотины. В связи с переменным режимом работы тунNELей на их обделку передаются различные комбинации этих нагрузок, что существенно усложняет расчеты и требует получения достаточно надежных данных о структуре и свойствах вмещающего скального массива.

Проходка тунNELей в скальных породах ведется с применением буровзрывных работ. В настоящее время разработан ряд модификаций методов проходки, рассчитанных на простые геологические условия. Для сложных условий вполне удовлетворительная технология проходки пока отсутствует.

## 1.3. Здания гидроэлектростанций

В зданиях электростанций размещаются гидравлические турбины и генераторы электрического тока. В большинстве случаев здания приплотинного и деривационного типов возводятся отдельно от других сооружений, но в последние годы все чаще стали применяться компоновки гидроузлов совмещенного типа, где турбины и генераторы располагают в теле

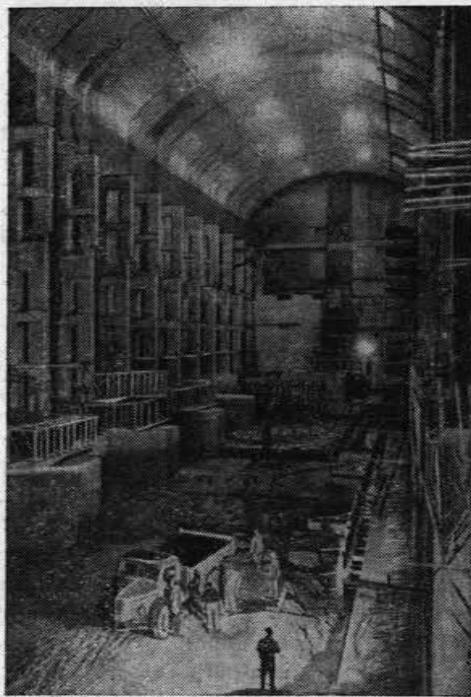


Рис. 1.10. Строительство подземного машинного зала



Рис. 1.11. Разрез по трассе водопроводящих сооружений, Чиркейская ГЭС с подземным машинным залом. По Н. И. Кириченко [1962]

бетонной плотины. По такому типу в СССР сооружены Плявиньская ГЭС на р. Даугаве, Токтогульская ГЭС на р. Нарын и многие другие. При строительстве гидроузлов в условиях особенно сурового климата, а также в горных районах нередко применяется размещение машинных залов в подземных выемках (рис. 1.10). Так построены машинные залы Хантайской ГЭС близ Норильска, Чиркейской ГЭС на р. Сулак (рис. 1.11), ГЭС Ниша-III на Кольском полуострове и др. Здания ГЭС имеют большие размеры, особенно в равнинных гидроузлах. Так, здание ГЭС Саратовского гидроузла, где оно входит в общий напорный фронт, имеет в длину около

1200 м. Выемки для подземных машинных залов достигают следующих размеров: длина 200—250 м, ширина 25—40 м, высота 30—40 м. Сооружение подземного машинного зала является весьма сложной инженерной задачей, требующей всестороннего изучения и учета при проектировании структурных особенностей массива гидрогеологических условий и механических свойств горных пород.

#### 1.4. Компоновка гидроузлов и выбор типа сооружений

При выборе типа сооружений и компоновке гидроузлов учитывается большое число факторов: топографических, гидрогеологических, инженерно-геологических, экономических, технических и производственных [Бечин, 1974; Доманский, 1974; Розанов, 1974].

Несмотря на многообразие этих факторов, гидроузлы должны удовлетворять некоторым общим требованиям [Бечин, 1974]: а) надежности и долговечности; б) удобству в эксплуатации; в) экономичности в строительстве и г) технологичности, обеспечивающей наименьшие трудовые затраты, возможность выполнения строительства в кратчайшие сроки с обеспечением высокого качества и пр. В зависимости от особенностей природной обстановки и других перечисленных выше факторов этим требованиям могут удовлетворять гидроузлы, включающие различные типы сооружений. Наилучшее решение всегда имеет индивидуальный характер и принимается на основе всестороннего изучения природных условий, а также сравнения ряда конкурирующих вариантов.

Топографический фактор (главным образом профиль речной долины) сказывается в первую очередь на выборе типа плотины: в узких долинах заметным преимуществом обладают арочные плотины, в широких — более рациональным может оказаться применение гравитационных, контрфорсных плотин или плотин из местных строительных материалов. При этом решающее значение имеет экономическое сравнение вариантов.

Гидрологические факторы определяют главным образом объемы воды, которые должны быть сброшены из водохранилища в строительный и эксплуатационный периоды, а также при катастрофических паводках. От этого зависит в свою очередь выбор типа водосбросных сооружений, а косвенно, и типа плотин.

Геологические факторы существенно влияют на выбор типа всех сооружений гидроузлов, но особенно плотин. Как отмечено выше, высокие арочные плотины могут возводиться только на весьма прочных скальных породах. Слабые полускальные раз-

ности пород (глинистые сланцы, аргиллиты, мергели, слабые разности песчаников и др.), мощные коры выветривания, тем более рыхлые четвертичные отложения для таких плотин непригодны. Это относится в большой степени и к контрфорсным плотинам. Менее жесткие требования предъявляются к естественному основанию гравитационных плотин, особенно плотин из местных строительных материалов. Последние могут возводиться практически на всех разностях пород и являются в этом отношении наиболее универсальным типом водонапорных сооружений.

## ГЛАВА 2

# МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД

### 2.1. Общие положения, основные понятия, терминология

Ф. П. Саваренский — основоположник советской инженерной геологии — неоднократно подчеркивал в своих работах необходимость изучения толщ горных пород, являющихся основанием или вместилищем инженерных сооружений, в их естественном залегании со всеми присущими им особенностями строения. Это положение нашло дальнейшее развитие в трудах П. Н. Панюкова [1962], который предложил считать основным объектом инженерно-геологических исследований *массив горных пород* и дал ему следующее определение: «массив горных пород — это часть земной коры, находящаяся в сфере инженерного воздействия, исследуемая с целью определения условий производства инженерных работ и эксплуатации сооружений и обладающая инженерно-геологической структурой, отличной от структуры соседних с ним участков земной коры». Идея оказалась плодотворной и получила дальнейшее развитие в трудах Л. Д. Белого, Г. А. Голодковской, А. М. Гуреева, А. Г. Лыкошина, А. Н. Маркова, М. В. Раца, Е. М. Сергеева, С. Н. Чернышева, В. З. Чечота и других исследователей, хотя отдельные авторы вкладывают в это понятие не совсем одинаковое содержание. Так, М. В. Рац [1974, 1976] предлагает понимать под массивом горных пород «связную область земной коры, соизмеримую с основанием инженерных сооружений», Л. Д. Белый [1977] считает, что понятие «массив горных пород» должно быть геологическим, характеризующим важнейшие черты геоструктурного облика того или иного участка земной коры, не осложненным никакими побочными надстройками». В соответствии с этим он предлагает выделять в качестве массивов горных пород геологические структуры низших рангов.

Нам представляется, что при решении этого вопроса следует исходить из соображений практического характера и, придерживаясь этой точки зрения, мы будем понимать под массивом горных пород любую ограниченную в пространстве (по площади и глубине) часть земной коры, соизмеримую с отдельным сооружением или комплексом сооружений, со всеми особенностями ее строения и нарушениями сплошности (разломами, трещинами, пустотами и пр.), содержащимися в ней подземными водами и газами и сформировавшимися в ее пределах физическими полями (напряжений, тепловым и др.).

Такая формулировка оставляет исследователю известную свободу действия: в одном случае за массив пород можно принять целую геологическую структуру, как предлагает Л. Д. Белый (если это оправдывается практическими соображениями), в другом — любую ее часть, отвечающую, например, участку размещения гидроузла или какого-нибудь входящего в него сооружения — плотины, здания гидроэлектростанции и т. п.

В теоретическом плане массив пород можно рассматривать как сложную геологическую систему, обладающую некоторыми общими характеристиками: структурой, вещественным составом, физическим состоянием, определенными свойствами и динамикой.

Понятие «структура» широко используется в геологических науках, но в существенно различных значениях. Мы будем понимать под этим термином *совокупность признаков, характеризующих форму, размеры, пространственное положение и соотношение структурных элементов, а также характер связей или взаимодействий между этими элементами*. Такая трактовка позволяет сохранить единый подход к изучению структуры горных пород и слагаемых или массивов. Различие заключается только в размере и характере выделяемых структурных элементов. В первом случае роль структурных элементов играют отдельные минеральные зерна или их агрегаты, микротрешины и др., во втором — геологические тела различного размера и степени сложности — слои, пачки слоев, различные по форме эфузивные и интрузивные образования, тектонические нарушения и др. Структурные элементы могут изучаться индивидуально или статистически (в совокупности), и решение о целесообразности того или иного подхода определяется практическими соображениями, в первую очередь соотношением с областью взаимодействия и той ролью, которую играет тот или иной элемент в составляемых моделях (механических, фильтрационных). В некоторых случаях даже небольшой прослой (мощностью несколько сантиметров), если он определяет устойчивость основания или склона, должен рассматриваться и изучаться как самостоятельное геологическое тело. Отметим, что со сходных позиций понятие «структура» трактуется в недавно опубликованном «Методическом пособии по изучению структур напластования при инженерно-геологических изысканиях для гидротехнического строительства» [Варга, 1979].

Вещественный состав не входит в понятие «структура», вследствие чего оно имеет чисто геометрическое содержание. В некоторых случаях это создает определенные неудобства, так как взаимодействие между структурными элементами определяется не только их геометрией, но и свойствами слагающих эти элементы пород. Поэтому наряду с термином «структура» мы будем пользоваться более широким понятием — «геологическое

строение», в котором находят отражение и структура массива пород, и вещественный состав структурных элементов.

Массив пород обладает также определенной гидрогеологической структурой, элементами которой являются водоносные горизонты или комплексы, характеризующиеся квазиоднородностью по гидродинамическим и гидрохимическим характеристикам.

Важнейшая особенность структуры массивов пород заключается в ее иерархическом характере, который определяется участием в ее формировании структурных элементов различной величины. Вследствие этого в массивах горных пород в большинстве случаев можно выделить несколько структурных уровней. Так, в массивах с блоковой структурой выделяется, как правило, по меньшей мере три таких уровня: первый, связанный с мелкой блочностью, обусловленной трещинами первичной отдельности, второй, связанный с более крупной блочностью, обусловленной тектонической трещиноватостью, и третий, наиболее высокий, связанный с наличием тектонических разломов. Эти три уровня проявляются различно, в зависимости от соотношения их размеров с размерами возводимых сооружений или масштабом исследуемых геологических процессов.

Вещественный состав определяется в первую очередь горными породами, слагающими отдельные структурные элементы, со всеми присущими им литолого-петрографическими особенностями и свойствами. Существенную роль играют также подземные воды, заполняющие трещины, пустоты и поры в горных породах, а в зоне аэрации — газовая составляющая.

Большое влияние на поведение и свойства массивов горных пород оказывают физические поля, формирующиеся в них в результате внешних и внутренних процессов и взаимодействий. Физические поля материальны по своей природе, но не вещественны, и их следует выделить в самостоятельную категорию. Они являются наиболее подвижной, изменчивой составляющей массивов горных пород и в значительной степени определяют физическое состояние последних (напряженное, мерзлое или талое и др.).

Свойства массивов горных пород определяются, с одной стороны, их структурными особенностями (условиями залегания пород, наличием разрывных нарушений, трещиноватостью и пр.), с другой — составом и свойствами пород, слагающих отдельные структурные элементы. В массивах скальных пород, если они существенно не изменены выветриванием, первый фактор является, как правило, доминирующим. Для инженерно-геологической оценки массивов пород наибольшее значение имеют механические (прочностные и деформационные) и фильтрационные свойства, а также неоднородность, изменчивость и анизотропия.

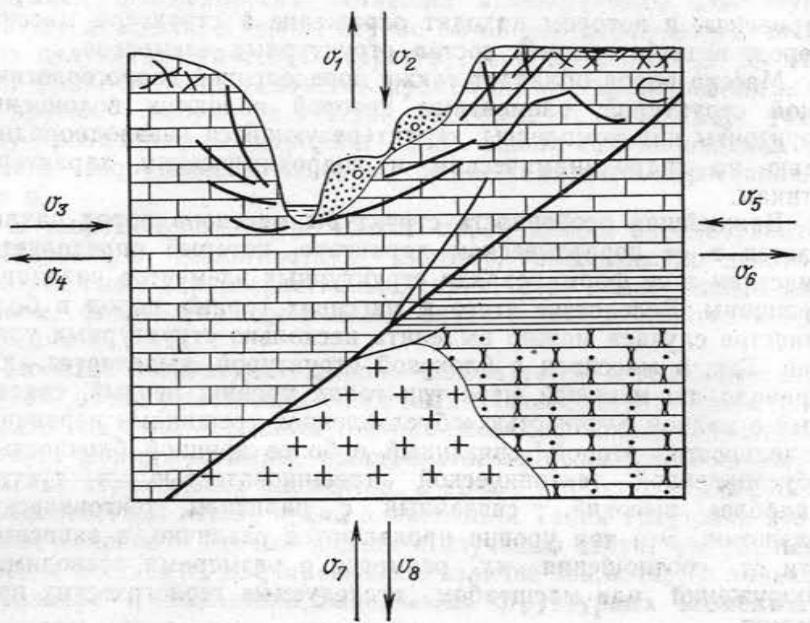


Рис. 2.1. Схема взаимодействия массива горных пород с окружающей средой

Массив пород представляет собой открытую систему, находящуюся в тесном взаимодействии с окружающей средой, под которой следует понимать не только различные внешние сферы Земли (атмосферу, гидросферу, биосферу), но и более глубокие и смежные части литосферы, как показано на рис. 2.1. По физической природе эти воздействия могут быть представлены силами, приложенными к поверхности массива пород (различные сооружения), или разными формами энергомассопереноса (тепловые потоки из космоса или из недр Земли, инфильтрация поверхностных вод или атмосферных осадков с растворенными в них компонентами, упругие колебания, вызываемые землетрясениями, и др.). Изучение связей дает информацию о различных особенностях исследуемой геологической системы, поэтому в определенном смысле они могут рассматриваться как информационные. На использовании таких связей основаны, например, широко применяемые в инженерной геологии и гидрогеологии индикаторные методы, позволяющие на основе изучения различных факторов внешней среды (например, растительности) получить ценную информацию о составе отложений, глубине залегания грунтовых вод, их химическом составе, активности развития некоторых геологических процессов и пр. (индикационная геоботаника, индикационное ландшафтоведение). Более подробно этот вопрос рассмотрен в гл. 6.

Взаимодействие между отдельными компонентами геологической системы (горные породы, подземные воды, газы), а также между этими компонентами и различными факторами внешней среды приводит к изменению во времени различных параметров геологической системы. Наиболее подвижными, изменчивыми являются параметры физических полей — напряжений, теплового и др. Большая изменчивость свойственна параметрам, характеризующим подземные воды (напорам, градиентам, химическому составу). В той или иной степени изменяются также свойства горных пород под влиянием разгрузки, вызванной денудацией, выветриванием и пр.). Структурные параметры обладают наибольшей устойчивостью, но и они могут претерпевать изменения, связанные, например, со смещением блоков пород по существующим или вновь образованным разломам, образованием карстовых пустот и пр. Изменение параметров систем во времени выражают обычно такими терминами как «движение», «поведение», «динамика». Мы будем пользоваться в дальнейшем изложении в основном термином «динамика».

Как следует из вышеизложенного, динамика геологических систем проявляется в основном в развитии различных геологических процессов, исследование которых представляет собой одну из наиболее сложных и важных задач инженерной геологии.

Отметим, наконец, что массив пород представляет собой не только динамическую, но одновременно и исторически развивающуюся систему, изменения параметров которой имеют некоторую общую направленность. Это не исключает возможности периодических колебаний или случайных возмущений, связанных с тектоническими процессами, изменениями климата или другими причинами. Параметры системы, фиксируемые в период изысканий, отражают какой-то момент в цепи ее непрерывных и закономерных изменений. Последнее обстоятельство дает возможность делать обоснованные прогнозы поведения системы в будущем на основании ее ретроспективного изучения.

Геологические системы обладают авторегуляцией, хотя это свойство выражено в них значительно слабее, чем в живых биологических системах. Авторегуляция проявляется в способности системы возвращаться в состояние динамического равновесия, из которого она выведена внешним воздействием, и обусловлена наличием в системе отрицательных обратных связей, противодействующих развитию того или иного геологического процесса. Примерами таких связей могут служить: выделение тепла при замерзании воды в горных породах, препятствующее движению фронта промерзания в глубь массива; образование глинистой корки на поверхности карстовых пустот, приостанавливающее дальнейшее развитие карста; кольматация трещин в результате инфильтрации поверхностных вод, содержащих глинистый материал, и др.

## 2.2. Структура массива горных пород

### 2.2.1. Геологические тела

Структура массивов пород формируется геологическими телами различных размеров и степени сложности. Под геологическим телом принято понимать любую часть массива горных пород, обладающую общими границами и некоторой однородностью (квазиоднородностью) по набору используемых признаков. Геологические тела можно выделять по разным признакам — минералогическому составу пород, их структурным особенностям, показателям физических, механических, фильтрационных свойств. При этом могут быть установлены границы двух типов: безусловные, когда на границе двух тел происходит скачкообразное изменение одного или нескольких признаков (тектонические контакты, границы напластования и др.), и условные, когда изменение одного или нескольких признаков происходит постепенно, и выбор граничных значений зависит от назначения работ и задач исследований (фациальные переходы, постепенное изменение состава и свойств пород по разрезу и пр.). В последнем случае в качестве граничных обычно принимаются значения признаков, разделяющих классы пород в инженерно-геологических классификациях.

Геологические тела могут быть простыми и сложными. Простыми можно считать тела, которые с позиций выполняемых исследований являются элементарными, не требующими более дробного расчленения. Если такие тела выделяются с учетом показателей физико-механических свойств пород и использованием формальных (статистических) критериев, их называют инженерно-геологическими элементами [Коломенский, 1956]. В осадочных породах при спокойном их залегании роль простого геологического тела обычно играет слой или часть слоя с выдержаным минеральным составом и устойчивыми структурными признаками, что определяет в свою очередь квазиоднородность выделенного тела по физико-механическим и фильтрационным характеристикам. Любые более мелкие формы — отдельные минеральные зерна или их агрегаты, мелкие линзы и прослои рассматриваются в этом случае уже как структурные элементы самих пород. Это касается трещин, размер которых изменяется в очень широких пределах (от микротрещин, рассекающих отдельные минеральные зерна, до громадных трещин, пересекающих весь массив горных пород), то в зависимости от соотношения с областью взаимодействия (см. гл. 3) они могут рассматриваться и как самостоятельное геологическое тело, и как структурный элемент горной породы. Поскольку трещины и некоторые другие нарушения, например типа мелких карстовых пустот и каверн, обычно изучаются статистически, введем для их обозначения дополнительный термин — структурные не-

однородности, широко используемый последнее время в литературе.

При изучении кор выветривания в качестве простых геологических тел могут быть выделены отдельные зоны, если они достаточно однородны в инженерно-геологическом отношении (применительно к задачам и этапу исследований).

В вулканогенных образованиях роль простых геологических тел могут играть лавовые потоки, покровы, скопления пирокластического материала, в интрузивных — магматические тела различных типов (лакколиты, силлы, дайки и др.), если они достаточно однородны, или их части, если они различаются по минеральному составу, структурным особенностям или степени трещиноватости.

В сильно дислоцированных толщах задача выделения простых геологических тел существенно усложняется, так как в этом случае приходится учитывать не только состав, структуру и свойства пород, но и характер тектонических нарушений. В скальных массивах с блоковой структурой за простые геологические тела обычно принимают тектонические блоки и разделяющие их тектонические нарушения, резко отличающиеся по инженерно-геологическим характеристикам. В массивах со складчато-блоковой структурой при выделении простых тел нередко приходится учитывать литолого-петрографическую неоднородность изучаемых толщ, складчатые и разрывные нарушения и ранжировать их по степени важности исходя из априорных представлений об их инженерно-геологическом значении.

Сочетания простых геологических тел, обладающих общими границами, образуют сложные геологические тела, сочетание последних — еще более сложные тела, и т. д., в результате чего создается иерархическая система геологических тел различной степени сложности. Для обеспечения единого подхода к решению этой задачи можно придерживаться при выделении сложных тел рекомендаций «Стратиграфического кодекса СССР» [1977], где отмечается целесообразность выделения двух градаций: пачек и толщ. Под пачкой предлагается понимать небольшую по мощности совокупность слоев (пластов), которая характеризуется некоторой общностью признаков или одним общим признаком, что позволяет отличать ее от смежных по разрезу пачек, а под толщей — более крупную совокупность геологических образований, характеризующуюся некоторой общностью входящих в нее пород или их ассоциаций.

Объединение пород в пачки и толщи может быть основано на использовании различных признаков, имеющих инженерно-геологическое значение — состава и структуры пород, их выветрелости, трещиноватости и пр. Целесообразно такое объединение увязать с общей или местной стратиграфической шкалой, что облегчает различные геологические реконструкции. Ассоциации

пород, выделяемые по этому принципу, обычно называют **лито-стратиграфическими комплексами**.

Наиболее крупными ассоциациями осадочных пород, которые целесообразно выделять при инженерно-геологических исследованиях, являются **формации**. Понятие «формация» осадочных пород широко используется в литературе, но в существенно различных значениях. Мы будем придерживаться взглядов, развитых Н. С. Шатским, поскольку они полнее отвечают задачам инженерной геологии «Формация,— писал Н. С. Шатский [1965],— это естественные комплексы, сообщества или ассоциации горных пород, отдельные части которых... тесно, парагенетически связаны друг с другом как в возрастном, так и в пространственном отношении (фациальные смены и др.)». Такое определение не исключает трактовки понятия «формация» и в генетическом смысле, поскольку, как справедливо отмечает В. Е. Хайн [1973], «парагенез указывает если не на тождество, то на определенную общность происхождения», но такой генетический подход требует осторожности и постановки детальных исследований, так как сходные типы формаций могут формироваться в разной тектонической и климатической обстановке.

Для инженера-геолога выделение формаций имеет большое практическое значение, так как позволяет делать обоснованные прогнозы в отношении: а) комплекса горных пород, которые могут принимать участие в строении формации; б) количественных соотношений между этими породами (преобладают, занимают подчиненное положение, встречаются как исключение, полностью исключены); в) пространственного соотношения между этими породами (сменяют друг друга по разрезу, замещаются фациально и т. д.).

Понятие «формация» используется в современной геологической литературе и при описании метаморфических и магматических (интрузивных и эфузивных) пород. Однако при использовании формационных представлений изучения интрузивных пород требуется принципиально иной подход, на котором мы здесь останавливаться не будем. Поэтому в дальнейшем изложении мы будем пользоваться термином «формация» только применительно к толщам осадочных, метаморфических и эфузивных пород.

Формации обычно выделяются перед началом изысканий по имеющимся геолого-литологическим картам, описаниям и другим геологическим материалам, что существенно облегчает решение задач, связанных с составлением априорной инженерно-геологической модели (см. раздел 5.2), разработкой программы инженерно-геологических исследований, выбором комплекса методов изучения, наиболее отвечающих местной геологической обстановке, и пр.

Перейдем теперь к классификации структур массивов пород. Для этой цели можно использовать все признаки, которые во-

шли в определение данного понятия, и в первую очередь размер структурных элементов. Если в пределах массива выявляются соподчиненные структурные элементы разного размера, можно соответственно выделять несколько структурных уровней, например, мезо-, макро- и мегаструктуры (оставим термин «микроструктура» для описания отдельных пород).

Важными признаками для классификации структур массивов пород являются форма, пространственное положение и соотношение структурных элементов. Так, для осадочных толщ платформенного типа наиболее характерной структурой можно считать горизонтально-слоистую, для толщ, нарушенных разрывными нарушениями — блоковую, для толщ с дислокациями складчатого типа — складчатую, а для толщ с нарушениями обоих типов — складчато-блоковую. Для эфузивных толщ наиболее характерна пластово-блоковая структура, а для магматических интрузивных — блоковая.

## 2.2.2. Разрывные нарушения и поверхности ослабления

К важным элементам структуры массивов горных пород наряду с геологическими телами относятся различные нарушения сплошности пород — разломы, трещины разного типа и генезиса, карстовые пустоты и др., а также поверхности ослабления — зоны дробления пород, смятия, расланцевания, контакты между породами различного состава и т. п. Особенно большое значение имеют трещины и разломы.

### 2.2.2.1. Трещины

Трещинами принято называть разрывы сплошности горных пород сравнительно небольшой протяженности (до первых сотен метров), перемещения по которым либо отсутствуют, либо имеют небольшую амплитуду. Трещина представляет собой пространство, ограниченное стенками и имеющее три измерения, но поскольку измерить все три параметра, как правило, невозможно, обычно ограничиваются использованием двух величин: длины, измеряемой по следу на плоскости обнажения, стенки штолни и пр. или фиксируемой по нескольким выработкам, и ширины, или раскрытия, измеряемой по нормали к стенке трещины. Основная особенность трещин, отличающая их от любых других полостей, которые могут быть встречены в толщах пород, заключается в значительном превышении (в десятки—сотни раз) их длины над шириной.

Совокупность трещин, рассекающих массивы пород, называют трещиноватостью. Пересекаясь под разными углами, трещины образуют сложные пространственные структуры — сети трещин. По строению сеть трещин может быть неупорядоченной

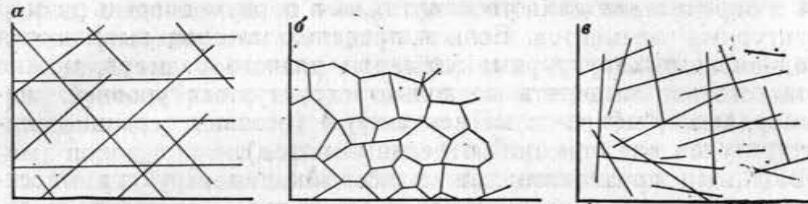


Рис. 2.2. Основные типы сетей трещин: а) системная; б) полигональная; в) хаотическая

(хаотичной) и упорядоченной (закономерной). К наиболее распространенным типам упорядоченной сети трещин относятся решетчатая и полигональная (рис. 2.2).

Основными характеристиками трещин помимо длины и ширины являются их форма, морфология поверхности стенок трещин, наличие и состав заполнителя, ориентировка трещин в пространстве. Для классификации трещин по размеру в качестве основного признака обычно используют их длину, поскольку именно длина определяет главным образом степень опасности трещин для устойчивости сооружения. При построении классификации трещин по этому признаку обычно учитывают практическую сторону вопроса, в частности, возможность изучения трещин в шлифах, образцах, стенках выработок, обнажениях и пр. Соответственно все трещины обычно подразделяют по длине на две группы: микротрещины — размером до 1 см, которые изучаются в основном в прозрачных шлифах под микроскопом, и макротрещины — более значительного размера, изучаемые в образцах, стенках выработок, обнажениях. Последние можно дополнительно разделить на мелкие (от 1 до 10 см), средние (от 10 см до 1 м), крупные (от 1 до 10 м) и очень крупные (от 10 до 100 м). Еще более крупные разрывы сплошности принято называть разломами, или разрывными тектоническими нарушениями.

Значение трещин разного размера для оценки свойств массивов пород неодинаково. Мелкие трещины, изучаемые в лабораторных условиях, влияют на значения показателей механических свойств пород, увеличивая их разброс, что требует для обработки данных применения методов математической статистики. Средние трещины соответствуют области полевого эксперимента и влияют на результаты определения показателей механических свойств пород с помощью штампов, сдвига целиков и пр. Наконец, крупные и очень крупные трещины, соизмеримые с областью воздействия сооружений (или их секций), представляют наибольшую опасность для последних и являются основным объектом исследования при изучении массива горных пород в скважинах, горных выработках или естественных обнажениях.

Вторым важнейшим параметром является ширина трещин, определяющая в значительной степени сжимаемость и водопроницаемость скальных пород. От ширины трещин зависит также возможность применения различных тампонажных материалов.

Трещины с сомкнутыми стенками называют закрытыми. След закрытых трещин обычно хорошо виден на поверхности обнажения. Встречаются, однако, и такие случаи, когда внешние трещины ничем себя не проявляют и обнаруживаются только при взрывных работах или других механических воздействиях; такие трещины называют скрытыми. По-видимому, к их числу относятся, помимо собственно трещин, также различные ослабленные поверхности, по которым легче происходит разрыв сплошности породы. Трещины, стени которых раздвинуты (что не исключает возможности их соприкосновения в ограниченном числе точек), называют открытыми. По ширине трещины могут быть подразделены на очень узкие — до 1 мм, узкие — 1—5 мм, средние — 5—20 мм, широкие — 20—100 мм и очень широкие — более 100 мм.

Ширина трещин обычно непостоянна и изменяется (в пределах отдельных систем) по глубине и с удалением от поверхности склона долины в глубь водораздела. Этот вопрос наиболее полно исследован Э. И. Ткачуком [1978], обобщившим материалы по различным типам пород и геологоструктурным условиям. Статистическая обработка массовых замеров ширины трещин показала, что зависимость этого параметра от глубины может быть в общем виде аппроксимирована степенной функцией

$$b = \alpha H^{-\beta}, \quad (2.1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, численно равный ширине трещин на глубине 1 м и изменяющийся от 0,3 до 200 мм;  $H$  — глубина и  $\beta$  — коэффициент, зависящий от типа пород. Так, для осадочно-туфогенных пород он изменяется от 0,43 до 0,51, магматических — от 0,86 до 1,12.

Близкие зависимости были получены Э. И. Ткачуком и при обработке результатов опытно-фильтрационных работ. Установив такую зависимость для конкретного массива горных пород, можно определить с ее помощью мощность зоны разуплотненных пород.

По форме трещины могут быть прямолинейными, криволинейными, извилистыми и угловатыми. Большим разнообразием характеризуется также морфология поверхности трещин. Поверхность может быть гладкой, шероховатой, волнистой и бугристой с различными размерами и формой неровностей. А. М. Гуреев и С. Е. Могилевская [1972] предлагают использовать для характеристики неровностей стенок трещин три параметра: высоту  $h$ , длину волны  $l$  и угол наклона  $\alpha$ . По высоте  $h$  они подразделяют все неровности на четыре группы: микронеровности,

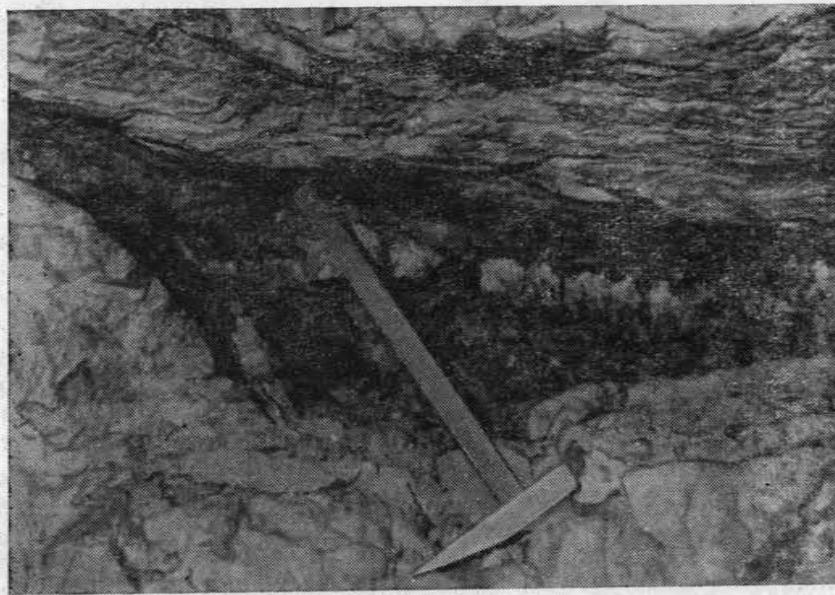


Рис. 2.3. Тектоническая трещина, выполненная глинкой трения

измеряемые миллиметрами или долями миллиметра, макронеровности — сантиметрами, мезонеровности — десятками сантиметров и меганеровности — метрами. На поверхности трещин иногда наблюдаются также зеркала скольжения — сглаженные и отполированные участки поверхности трещин, рассеченные штрихами, бороздами и покрытые чешуйчатыми минералами (хлоритом, серицитом, эпидотом и др.). Зеркала скольжения свидетельствуют о перемещениях стенок трещины относительно друг друга.

Трещины могут быть зияющими или заполненными водой, рыхлым материалом или различными минеральными новообразованиями. Рыхлый материал образуется за счет механического разрушения стенок трещин при подвижках (глина трения), в результате выветривания, а также вследствие вмыва в трещины наносов с поверхности земли (рис. 2.3). Соответственно и состав его может быть весьма различным — от тонкого пылевато-глинистого материала до грубой брекции. Минеральные новообразования — кварц, кальцит, хлорит, гидроокиси железа — заполняют трещины полностью или образуют на их стенках налеты и корочки различной структуры и мощности. Если трещины заполнены рыхлым материалом, они обычно называются заполненными, если новообразованиями — залеченными. В последнем случае трещина превращается в пластинкообразное тело, часто мало отличающееся от вмещающей породы по сжимаемо-

сти и прочности. Если показатели, характеризующие эти свойства, ниже, чем имеет вмещающая порода, трещины ослабляют массив горных пород и повышают его сжимаемость, в противном случае они создают жесткий каркас. Такие тела правильнее называть жилами.

Последней важной характеристикой трещин является их пространственная ориентировка, которая обычно определяется азимутом и углом падения. По величине угла падения различают субвертикальные трещины ( $70\text{--}90^\circ$ ), крутые ( $45\text{--}75^\circ$ ), пологие ( $15\text{--}45^\circ$ ) и субгоризонтальные ( $0\text{--}15^\circ$ ).

Образование трещин связано с полями напряжений, формирующимиися в толщах пород под воздействием тектогенеза, изменений объема породы, вызванных уплотнением и химическими преобразованиями (осадочные породы), остыванием (магматические породы) и некоторыми другими процессами. Различают два основных кинематических типа трещин: трещины отрыва, располагающиеся нормально к направлению максимального растягивающего напряжения, и трещины скола, совпадающие с плоскостью действия максимального тангенциального напряжения или образующие с ней тот или иной угол в зависимости от наличия и направления ослабленных поверхностей). Если поля напряжений, вызывающие образование трещин, сохраняют относительную однородность на значительных площадях и в течение длительного времени, происходит образование большого числа трещин одного кинематического типа с близкой ориентировкой. Такие множества субпараллельных трещин получили название систем трещин. Число систем трещин может быть различным — от 2 до 12, редко более. Трещины одного кинематического типа обладают также сходством по морфологическим характеристикам. Так, трещины скола обычно прямолинейные, закрыты, имеют ровные и гладкие стенки; трещины отрыва, наоборот, в большинстве случаев угловатые или извилистые, раскрыты, имеют неровную бугристую или шероховатую поверхность.

Классификация трещин, применяемая в инженерной геологии, построена на генетической основе (табл. 2.1). В качестве основного классификационного признака принят генезис трещин или, точнее, генезис того поля напряжений, с которым связано их образование. Поскольку трещины, как и большая часть других геологических явлений, формируются под совокупным воздействием многих факторов, здесь, как и в любой другой геологической классификации, построенной на генетической основе, используется принцип «ведущего фактора». Это допущение всегда вносит элемент неопределенности, так как, во-первых, не всегда удается уверенно выявить ведущий фактор, а во-вторых, влияние второстепенных факторов часто приводит к значительной изменчивости признаков, характеризующих тот или иной тип геологических объектов. В приложении к трещиноватости

Таблица 2.1

Генетическая классификация трещин по Л. И. Нейштадт,  
И. А. Пирогову, М. В. Рацу, С. Н. Чернышеву  
(с изменениями)

| Классы трещин       | Типы трещин   | Подтипы трещин  | Основные факторы и процессы, определяющие формирование трещин              |
|---------------------|---|---|--|
| I. Эндокинетические | 1. Литогенетические в осадочных породах<br>2. Петрогенетические в магматических породах |   | Процессы диагенеза и раннего литогенеза, планетарные явления               |
|                     | 3. Тектонические  | a) В глубинных породах<br>б) В гипабиссальных породах<br>в) В эфузивах<br>а) Соскладчатые<br>б) Приразрывные<br>в) Кливаж<br>г) Сейсмотектонические | Процессы петрогенеза, тектогенеза, планетарные явления                     |
|                     | 4. Трещины разгрузки  | a) Трещины донного отпора<br>б) Трещины бортового отпора  | Тектогенез   |
|                     | 5. Трещины выветривания   |   | Разгрузка от веса вышележащих толщ   |
|                     | 6. Гравитационные   | a) Оползневые<br>б) Просадочные   | Воздействие агентов внешней среды  |
|                     | 7. Криогенные   |   | Сила тяжести   |
|                     | 8. Искусственные (техногенные)  |   | Температурные колебания, замерзание и оттаивание воды, заполняющей трещины |
|                     |   |   | Взрывные работы  |

это положение усугубляется тем, что массив горных пород переживает длительную геологическую историю, включающую большое число этапов (диагенез, эпигенез, многочисленные фазы тектогенеза, гипергенез), каждый из которых характеризуется развитием полей напряжений, изменяющихся как по параметрам, так и по пространственной ориентировке. При этом уже на раннем этапе, после образования литогенетической трещиноватости, массив превращается в «дискретную среду» и реагирует на новые напряжения в первую очередь перестройкой уже существующей системы трещин (одни трещины открываются, другие замыкаются, некоторые из них удлиняются, происходят под-

вижки блоков по трещинам и пр.). Поэтому новые системы трещин всегда включают в той или иной степени старые системы и имеют отчетливые следы унаследованности. Особенно это касается трещин, образующихся в зоне гипергенеза, где блоки, слагающие массив пород, получают значительную свободу перемещений. Поэтому нередко бывает трудно решить, к какому типу следует относить ту или иную трещину: литогенетическому, разгрузки, бортового отпора или тектоническому, поскольку они являются одновременно и теми, и другими. Поэтому в практических приложениях нередко ограничиваются формальным подходом к построению классификации трещин для данного объекта, используя определимые морфологические, геометрические и иные признаки без попыток их генетического истолкования.

При изучении трещиноватости в инженерных целях представляет интерес также установление относительного возраста трещин, точнее, последовательности их образования. Иногда удается сделать это достаточно уверенно и, кроме того, установить, что каждой возрастной генерации трещин присущи свои характерные особенности: наличие и характер заполнителя, различные минеральные новообразования и др.

Перейдем теперь к рассмотрению генетической классификации трещин (см. табл. 2.1) и описанию выделенных генетических типов, придерживаясь разработок Л. И. Нейштадт и И. А. Пирогова [1969], М. В. Раца и С. Н. Чернышева [1970]. Принято делить все трещины на два класса: эндокинетические, связанные с напряжениями, возникающими в горных породах под влиянием различных внутренних процессов, и экзокинетические, связанные с различными внешними воздействиями.

Эндокинетические трещины образуются как в осадочных, так и в магматических — эфузивных и интрузивных породах вследствие уменьшения их объема: в первом случае под влиянием дегидратации, уплотнения, различных химических и физико-химических преобразований, во втором — в результате остывания магмы, ее дегазации, кристаллизации. Поскольку эти процессы обычно развиваются на ранних стадиях литогенеза (петрогенеза), такие трещины часто называют первичными, или трещинами первичной отдельности. В соответствии с изложенным выше их дополнительно подразделяют на литогенетические, образующиеся в осадочных породах, и петрогенетические — в магматических породах.

Литогенетические трещины образуются в осадках с первых стадий диагенеза, когда происходит дегидратация осадка и сопровождающая его усадка. В этом случае одно из главных напряжений (сжимающее), связанное с действием гравитации, ориентировано нормально к поверхности земли, а два других (растягивающих), связанных с усадкой высыхающего осадка, действуют в горизонтальной плоскости. Обычно они равны между собой, что отражает изотропность в плане поля

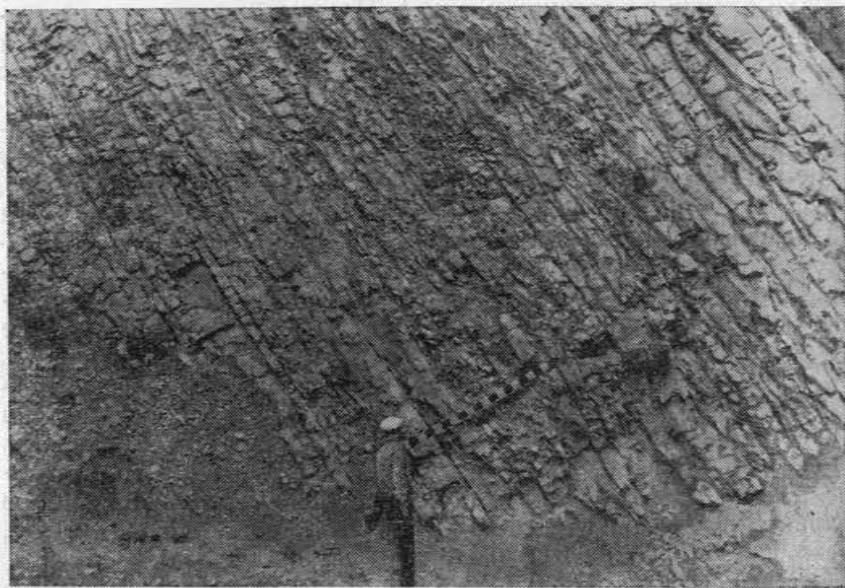


Рис. 2.4. Трещины напластования в тонкослоистых известняках, Ингур-ГЭС

напряжений. В горизонтально залегающих однородных породах такое поле напряжений должно приводить к растрескиванию породы на полигональную отдельность, что обычно наблюдается на поверхности покрытого илами дна высыхающих озер, лиманов, такыров. В более древних осадках даже четвертичного возраста, например хвалынских глинах, такая отдельность не наблюдается. Во всех без исключения осадочных породах образуется две системы вертикальных трещин (нормально секущие) и одна система горизонтальных трещин, совпадающая со слоистостью — трещин напластования (рис. 2.4). Наиболее выдержанная ориентировка трещин наблюдается в жестких породах, таких как доломиты, известняки, песчаники и алевролиты. По трещинам указанных трех систем порода распадается на блоки призматической или параллелепипедальной формы, причем размер блоков зависит от состава пород и мощности отдельных пластов. В мергелях и глинах строгая ориентировка трещин нарушается и резко возрастает дисперсия азимутов и углов падения трещин. Образуется также большее число полого падающих трещин.

С. С. Шульц [1973] отмечает, что нормально секущие трещины бывают двух порядков: секущие всю толщу пород или значительную ее часть (первого порядка) и внутрислойные (второго порядка). Расстояние между внутрислойными трещинами зависит от состава породы и мощности слоя. В гли-

нистых породах и мергелях оно меньше (сантиметры — десятки сантиметров), в песчаниках, известняках, доломитах, конгломератах — больше (десятки сантиметров — первые метры). Трещины напластования образуются либо по контактам слоев различного литологического состава, либо внутри слоя по поверхности напластования (слоистости), где порода ослаблена. Наиболее густая трещиноватость наблюдается в тонкослоистых глинах, мергелях, более редкая — в алевролитах, песчаниках, известняках. В массивных разностях этих пород (глинах, переработанных роющими организмами, рифовых известняках) она может отсутствовать. Поверхность трещин обычно шероховатая, бугристая.

Отмечено, что литогенетические трещины сохраняют устойчивую пространственную ориентировку на обширных пространствах многих платформенных регионов, где проводились наблюдения (Русская платформа, Западно-Сибирское плато, Северный Казахстан). В связи с этим было высказано предположение, что образование трещин данного типа связано не только с процессами литогенеза, но и с явлениями планетарного характера, вероятнее всего, с изменениями скорости вращения Земли. С. С. Шульц [1973] предложил называть такую трещиноватость планетарной.

*Петрогенетические трещины* образуются в магматических породах (изверженных, эфузивных) при их охлаждении, кристаллизации, потере летучих компонентов и других сопутствующих процессах, приводящих к уменьшению объема пород. Поскольку главным из этих процессов является тепловая усадка, такие трещины часто называют также контракционными. Размеры, морфология и пространственная ориентация петрогенетических трещин зависят от состава, размеров и формы магматических тел, в которых они образовались. В крупных гранитных батолитах формируются три системы взаимно ортогональных трещин, закономерно ориентированных относительно первичных, плоскокорректильных структур течения. Две из них имеют крутые углы падения и ориентированы следующим образом: одна поперек структур течения (поперечные трещины *Q*, по Клоосу), вторая — по направлению структур течения (продольные трещины *S*, по Клоосу). Третья система трещин примерно совпадает с плоскостью структур течения и имеет небольшие углы падения (трещины *L*, по Клоосу). Кроме этих основных систем в гранитных массивах выделяется также система диагональных трещин.

На образование петрогенетических трещин оказывают также влияние внешние силовые воздействия. Особенно заметно сказывается влияние «рамы» (вмещающего массива пород), которая может способствовать охлаждению магмы, а также передавать на нее тектонические напряжения и давление вышележащих толщ. Вблизи контакта с вмещающими

породами петрогенетические трещины характеризуются беспорядочной направленностью, большой густотой и малой протяженностью.

В эфузивных покровах образование трещин связано с теми же процессами, что и в интрузиях, но характер трещиноватости оказывается существенно иным. В этом сказывается главным образом небольшая мощность покровов, вследствие чего в них развиваются в основном вертикальные трещины растяжения. Влияние тектонических и гравитационных сил здесь проявляется в минимальной степени, благодаря чему поле напряжений приобретает изотропный в плане характер, что приводит к образованию столбчато-полигональной отдельности. Именно такая отдельность пяти-, шестигранный формы характерна для многих эфузивных пород. Вблизи экзо- и эндоконтактов она несколько нарушается. Расстояние между трещинами изменяется от долей метра до первых метров (преимущественно 0,5—0,7 м). Горизонтальные трещины имеют подчиненное значение.

В лавовых потоках трещиноватость обычно менее упорядочена и тесно связана с направлением течения магмы; одна из основных систем крутопадающих трещин обычно совпадает с этим направлением, другая — ему перпендикулярна. Иногда в эфузивах наблюдается шаровая или сфероидальная отдельность, особенно характерная для условий быстрого остывания магмы, например, при подводных излияниях (спилиты). В связи с отсутствием обжимающего гравитационного давления образующиеся в лавах трещины обычно открыты.

В гипабиссальных магматических телах трещиноватость по своему характеру занимает промежуточное положение и зависит в большой степени от глубины, размеров, формы и состава интрузивного тела.

В метаморфических породах, таких как гнейсы и кристаллические сланцы, на образование трещин заметно сказывается влияние сланцеватости, благодаря чему одна из наиболее развитых систем трещин обычно совпадает со сланцеватостью, а две другие нормальны к этой плоскости.

Эзокинетические трещины связаны с полями напряжений, формирующими в массивах пород за счет различных внешних воздействий: тектогенеза, гравитации различных компонентов окружающей среды, инженерных мероприятий и сооружений.

Тектонические трещины образуются в толще пород под влиянием напряжений, вызываемых тектогенезом — образованием складчатых и разрывных дислокаций. Обычно их дополнительно подразделяют на четыре подтипа: соскладчатые, приразрывные, кливаж и сейсмотектонические.

Соскладчатые трещины связаны с образованием складчатых структур. Поскольку механические свойства пород, вовлекаемых в складчатые структуры, весьма различны, одни из них

могут реагировать на возникающие напряжения хрупким разрушением с образованием трещин-разрывов, другие — вязкопластичным течением, третьи — в той или иной степени обеими видами деформаций. В результате в пестрых по составу толщах пород некоторая часть трещин локализуется в пределах отдельных пластов, сложенных наиболее хрупкими породами, другая — рассекает пачки пород со сходными свойствами, конец, некоторые, наиболее крупные, прослеживаются по всему разрезу пород, вовлеченных в дислокацию. Ориентировка соскладчатых трещин тесно связана с элементами залегания слоя и изменяется вместе с последними таким образом, что если ее измерить в координатах слоя (относительно элементов его залегания), она останется неизменной.

Соскладчатые трещины группируются в несколько систем. Одна из них объединяет трещины, совпадающие со слоистостью, остальные нормальны к этой плоскости. Относительно оси складки они распределяются следующим образом: одна система совпадает с направлением складки, вторая — нормальна к этому направлению, а две диагональные образуют с осью складки углы, близкие к 45°. При изменении ориентировки поля напряжений в процессе формирования складки или под влиянием осложняющих факторов (например, наличия в складчатой толще жестких массивов изверженных пород) картина распределения трещин может усложняться.

Трещины, параллельные напластованию, связанны с горизонтальными перемещениями пластов (явлением «проскальзывания») относительно друг друга при их смятии в складки, нормально секущие трещины (параллельные и нормальные к оси складки) — с растягивающими напряжениями, а две диагональные системы — со скалывающими напряжениями. В ширине складки, где наблюдаются наибольшие градиенты перемещений, раскрытость трещин максимальная, на крыльях складки она уменьшается. Этой же закономерности подчинена и густота трещин.

Приразрывные (оперяющие) трещины сопровождают тектонические разломы, образуя зону, ширина которой зависит от типа и величины дислокации. По мере удаления от разломов густота трещин постепенно уменьшается. Приразрывные трещины образуются за счет трения по поверхности смесятеля при перемещении крыльев разлома относительно друг друга. Они ориентированы под косым углом к поверхности смесятеля. Нередко образуются также системы трещин, параллельные зоне разрыва. Многочисленность систем трещин и значительная изменчивость их ориентировки затрудняют выделение отдельных систем трещин и их раздельное изучение.

Кливаж представляет собой особый тип тектонических нарушений, занимающий среднее положение между разрывами сплошности и формами вязкопластичного течения и придает

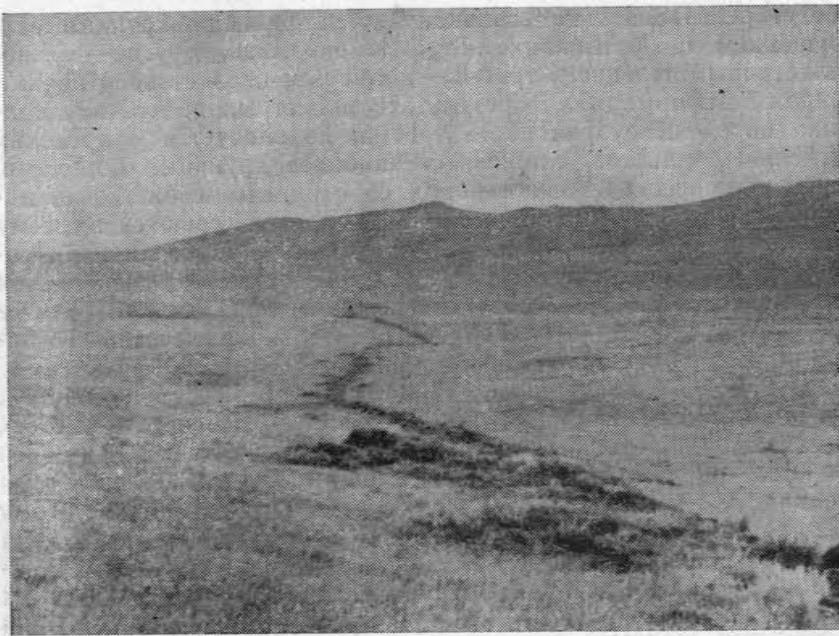


Рис. 2.5. Типичный вид современной сейсмодислокации. Моготское 10-балльное землетрясение 1967 г., МНР (фото Н. М. Хайме)

породам резко выраженную анизотропность. Исследования показывают, что прочность пород по плоскостям кливажа в два-три раза ниже, чем в перпендикулярном направлении.

*Сейсмотектонические трещины* (рис. 2.5) вызываются землетрясениями. В массивах скальных пород сейсмические толчки проявляются главным образом в перемещениях по существующим разломам, раскрытии и удлинении трещин, а в отдельных случаях — в появлении новых трещин. В перекрывающих рыхлых отложениях перемещения приводят к образованию разрывов или чаще трещинных зон, ширина которых в зависимости от величины дислокации и размеров подвижек изменяется от нескольких метров до 1—2 км, а протяженность — от сотен метров до десятков километров.

Сейсмотектонические трещины представляют интерес для инженера-геолога не только с точки зрения возможного влияния их на устойчивость склонов, но и в еще большей степени как важнейший признак произошедших в районе недавних землетрясений, их интенсивности, положения сейсмогенерирующих структур и пр.

Трещины *разгрузки* связаны с разуплотнением массивов пород в зоне гипергенеза от давления перекрывающих толщ, при удалении последних процессами денудации и при образовании

эрозионных врезов (речных долин). Разгрузка высвобождает упругую энергию, накопившуюся в породах под воздействием геостатической нагрузки, тектонических и планетарных процессов, что приводит к возникновению в них значительных растягивающих усилий. Вначале они вызывают расширение существующих трещин, а затем возникновение новых, ориентированных параллельно поверхности крупных форм рельефа — водоразделов, склонов и дна речных долин. В связи с неопределенностью наших знаний о скорости релаксации напряжений в горных породах масштабы этого явления можно оценить только на основании изучения явления разуплотнения — определения мощности образующейся зоны и суммарной величины раскрытия трещин.

Особенно активно разуплотнение происходит в речных долинах, где скорость процессов денудации на один-два порядка выше, чем на водоразделах. Расширенные трещины были встречены в основаниях Усть-Илимской, Токтогульской и многих других ГЭС, построенных на скальных основаниях. Расширение трещин сопровождается их удлинением. Некоторые исследователи [Прочухан, 1964] отмечают, что наряду с раскрытием трещин вблизи поверхности земли быстро (по гиперболическому закону) увеличивается густота трещин, что трудно объяснить какими-либо иными причинами, кроме образования новых трещин. Мощность зоны разуплотнения, по данным изучения оснований ряда гидроузлов, выстроенных в платформенных условиях, изменяется от 15 до 50 м; в пределах горно-складчатых сооружений она в 2—3 раза больше.

Трещины разгрузки, образующиеся в дне речных долин, получили название трещин донного отпора, а образующиеся в бортах речных долин — трещин бортового отпора. В относительно вязких породах типа аргиллитов, глинистых сланцах ширина таких трещин небольшая: первые сантиметры — десятки сантиметров, а в хрупких породах типа известняков значительно больше — до 1—2 м. Иногда наблюдается отседание отдельных блоков по трещинам и превращение трещин в широкие «рвы отседания». Вдоль борта долины нередко прослеживается серия таких рвов, расположенных параллельно или кулисообразно относительно друг друга. Ширина внешних рвов может достигать 10—12 м, а протяженность — сотен метров. С удалением от бровки долины ширина рвов отседания уменьшается.

Трещины *выветривания* образуются в приповерхностной зоне толщ пород в результате развития процессов выветривания. Последние вызываются взаимодействием пород с различными факторами внешней среды. Ведущая роль среди этих факторов принадлежит температурным колебаниям, которые сопровождаются на большей части территории СССР, ПНР и ГДР не только периодическим расширением и усадкой пород,

но и переходом содержащейся в них воды из жидкой фазы в твердую и обратно. Значительное воздействие на породы оказывают почвенные воды, насыщенные  $\text{CO}_2$  и другими соединениями, которые вызывают гидратацию, гидролиз и другие химические и физико-химические преобразования пород, также сопровождающиеся изменением их объема. Все это приводит к формированию в поверхностной толще пород очень неоднородного поля напряжений, способствующего трещинообразованию. Глубина интенсивного развития этих процессов составляет 10–15 м.

В начальной стадии выветривание приводит к раскрытию существующих трещин разного генезиса. Одновременно происходит удлинение трещин, нередко с заметным изменением первоначальной ориентировки, вследствие чего трещины приобретают извилистую форму. Дальнейшее развитие процесса приводит к образованию самостоятельных трещин выветривания, которые используют в первую очередь все ослабленные поверхности — слоистость, сланцеватость, кливаж и др., а затем распространяются и на монолитную породу. Это в большинстве случаев короткие трещины отрыва различной формы и степени раскрытия (от нескольких миллиметров до десятков сантиметров) с неровными шероховатыми стенками. Некоторые из них

Таблица 2.2  
Классификация трещиноватых массивов горных пород (по

| Тип массива    | Основные генетические типы трещин                            | Площадь сечения скальных целиков в плоскости трещин основных систем, % | Поведение массива при приложении нормальных сжимающих напряжений      |
|----------------|--|--|---|
| Монолитный     | Литогенетические, тектонические                              | 25–50  | Как упругое тело без пластических деформаций                          |
| Сохраненный    | То же  | 10–25  | Как упругое тело с незначительными пластическими деформациями         |
| Разуплотненный | Литогенетические, разуплотнения                              | 0–10   | Как упругопластичное тело со значительными пластическими деформациями |
| Расчлененный   | Литогенетические, тектонические, разуплотнения, выветривания | 0  | Как упругопластичное тело с большими пластическими деформациями       |

зияющие, другие заполнены продуктами выветривания и рыхлым материалом, привнесенным поверхностными водами. Степень расчленения массива пород трещинами выветривания весьма непостоянна. В завершающую стадию развитие густой сети трещин выветривания приводит к дезинтеграции породы на отдельные блоки различной формы и размера.

*Гравитационные трещины* связаны с действием силы тяжести и наблюдаются в тех местах, где происходит нарушение устойчивости или разрушение массива пород. Формирование трещин этого типа нередко предшествует образованию оползней и обвалов и может служить определенным признаком при их прогнозировании.

*Криогенные трещины* образуются в рыхлых промерзающих породах, поэтому здесь мы их не рассматриваем.

*Искусственные (техногенные) трещины* связаны с различными видами инженерной деятельности. Большое значение имеют трещины, вызываемые проведением взрывных работ. Мощность зоны трещинообразования, форма, размеры и ориентировка трещин этого типа зависят в большой степени от принятой технологии взрывных работ (глубины шнурков, величины зарядов и др.). Для того чтобы избежать существенного ухудшения механических свойств пород в результате взрывных

Л. Мюллеру, В. В. Калягину, с дополнениями и изменениями)

| Сопротивление массива пород тангенциальным (сдвигающим) напряжениям   | Характеристика фильтрационных свойств массива пород   |
|---|---|
| Определяется наличием и свойствами скальных целиков   | Трещинная водопроницаемость не выражена   |
| Определяется в основном наличием и свойствами скальных целиков  | Трещинная водопроницаемость выражена слабо  |
| Определяется в основном трением и «зажеланием» по поверхности трещин и механическими свойствами заполнителя | Трещинная водопроницаемость зависит от наличия, свойств и состава заполнителя, в большинстве случаев значительная |
| Определяется трением и «зажеланием» по поверхности трещин и механическими свойствами заполнителя            | Трещинная водопроницаемость зависит от наличия, состава и свойств заполнителя, в большинстве случаев большая      |

работ, последние выполняются в соответствии с установленными техническими правилами [«Технические...», 1972].

Методы изучения и количественной оценки трещиноватости изложены в разделе 6.3.1.4. В завершение рассмотрения вопроса о трещиноватости приведем (табл. 2.2) классификацию трещиноватых массивов, составленную на основе разработок Л. Мюллера (1971), В. В. Каякина (1977) и др.

#### 2.2.2.2. Разломы

Разломами принято называть крупные разрывные нарушения, глубоко проникающие в земную кору, имеющие значительную ширину, протяженность и большую амплитуду относительных перемещений.

Разломы классифицируют по разным признакам, в частности, по протяженности. Так, в Строительных нормах и правилах (СНиП II-16—76) на проектирование гидротехнических сооружений рекомендуется выделять по этому признаку разломы четырех порядков и, кроме того, мелкие разломы и трещины. Имеются и другие предложения (Л. И. Нейштадт, Н. Л. Шешеня, А. Н. Марков и др.). На практике при разработке классификации разломов для какого-либо конкретного региона, где намечается строительство, обычно используется принцип естественной соподчиненности. Вначале устанавливается согласно принятой для данного региона схеме ранг (порядок) ближайшего к месту строительства регионального разлома, а затем производится ранжировка соподчиненных систем разломов, число которых может быть различным (до 3—5).

Разломы различаются также по ширине и кинематике — направлению и характеру относительных перемещений. По последнему признаку могут быть выделены следующие основные простые формы: а) сбросы, висячее крыло которых смещено вниз по плоскости разлома; б) взбросы, висячее крыло которых смещено вверх по плоскости разлома, при условии что угол падения этой плоскости больше  $45^\circ$ ; в) надвиги, перемещение по которым имеет такой же характер, но наклон плоскости смещения меньше  $45^\circ$ ; г) раздвиги, смещение по которым направлено нормально к плоскости разлома; д) сдвиги, крылья которых смещены в горизонтальной плоскости. Кроме простых форм, встречаются и более сложные, когда перемещения происходят не по одной, а по двум или по всем трем осям, а иногда дополнительно осложняются элементами вращения.

В зависимости от кинематического типа разлома трещины-сместители могут иметь характер разрывов (сбросы, раздвиги) или сколов (надвиги, сдвиги). В первом случае форма трещин-сместителей неправильная, извилистая или угловатая, стенки неровные, бугристые или шероховатые, ширина трещин — не постоянная, но нередко достигает десятков сантиметров или

метров. В древних разломах трещины-сместители обычно залечены кварцем и кальцитом (превращены в жилы), в молодых — раскрыты и заполнены рыхлым материалом. Нередко с ними связана разгрузка глубинных вод с образованием восходящих источников или, наоборот, перетекание неглубоко залегающих подземных вод в глубокие горизонты. Во втором случае трещины-сместители имеют более правильную прямолинейную форму и гладкие, часто отполированные стенки, покрытые чешуйками стресс-минералов — серпентинита, хлорита, серицита и др. Ширина таких трещин обычно значительно меньше, внутреннее пространство заполнено продуктами разрушения вмещающих пород (тектонические брекчи, милониты). Водоносность таких разломов незначительна.

Отмеченная связь между характером трещин-сместителей и кинематическим типом разломов нередко нарушается вторичными подвижками, в результате которых трещины-сместители разрывного типа могут оказаться закрытыми со слаженными стенками, несущими следы подвижек, а трещины сколового типа — открытыми и заполненными рыхлым материалом.

Простое строение (с одной трещиной-сместителем) обычно имеют только небольшие нарушения. Крупные нарушения обычно образуют широкие зоны повышенной трещиноватости пород, включающие не одну, а несколько трещин-сместителей и полосы дробления. Для подразделения разломов по сложности и характеру строения тектонической зоны можно воспользоваться классификацией, предложенной В. С. Федоренко [1966]. В ней выделено четыре типа разломов, представленных: а) одной трещиной-сместителем; б) серией сближенных трещин-сместителей; в) одной или несколькими трещинами-сместителями с зонами дробления и г) зоной дробления без четко выраженных трещин-сместителей.

При сложном строении тектонической зоны в ее пределах выделяются участки линзовидной или неправильной формы, сложенные породой разной стадии разрушения — от почти монолитной до тектонической брекции, милонита или глинки трещин. Тектоническая брекция представлена сравнительно крупными обломками вмещающих пород, пространство между которыми заполнено перетертым материалом того же состава. В древних разломах брекция обычно сцеплена кварцем, кальцитом и другими жильными минералами, что придает ей повышенную прочность, в молодых — она нередко сохраняет рыхлое сложение, затронута выветриванием и имеет весьма низкие прочностные характеристики. Милонит в невыветрелом состоянии представляет собой перетертую, рассланцовенную породу, частично замещенную вторичными минералами, но плотную и прочную, в выветрелом — глиноподобную массу. Глинка трещин представлена рыхлым материалом, в составе которого преобладают вторичные глинистые минералы

и гидроокиси железа (иногда до 70 %). Она образуется в результате истирания пород при тектонических подвижках и их выветривания, а иногда и гидротермальных процессов. Физико-механические свойства милонита и глиники трения изменяются в широких пределах в зависимости от ее состава, плотности и влажности.

Разрывные нарушения с открытыми трещинами-сместителями и несцементированными зонами дробления являются путями проникновения в толщи пород поверхностных вод и других агентов выветривания и часто превращаются в линейные коры выветривания, глубоко вдающиеся в массивы скальных пород.

Как и трещины, разломы группируются в системы, пространственная ориентировка которых подчинена общей тектонической структуре региона.

При наличии большого числа разломов в отдельных системах они разбивают массив горных пород на блоки, придавая ему блоковую структуру. Массивы с блоковой структурой реагируют на повторные тектонические напряжения главным образом перемещениями по уже сформировавшимся разломам, сами же блоки остаются относительно сохранными. Дифференцированные подвижки приводят к тому, что одни блоки оказываются приподнятыми, другие — опущенными, вследствие чего формируются сложные пространственные структуры. Отдельные блоки различаются по строению рельефа, мощности и строению кор выветривания, наличию и мощности покрова четвертичных отложений. На приподнятых блоках коры выветривания и четвертичный покров почти полностью смыты, на опущенных — они нередко сохраняют полный профиль и значительную мощность [Марков, 1975].

Блоковая структура определяет также закономерности пространственной изменчивости физико-механических и фильтрационных свойств пород. Наиболее низкими значениями объемной массы, прочностных и деформативных свойств характеризуются породы из тектонических зон, особенно если они подверглись выветриванию. Пониженными значениями этих показателей обладают также породы из краевых частей блоков, прилегающих к разломам, где наблюдается повышенная трещиноватость и более активно протекают процессы выветривания. Наиболее высокие значения показателей сохраняются в центральных частях блоков, обладающих большой сохранностью. В качестве примера приведем графики изменения объемной массы пород для естественных оснований ряда ГЭС, построенных на территориях с типичным блоковым строением (рис. 2.6).

Разломы, особенно сопровождающиеся несцементированными зонами дробления, снижают прочность и устойчивость естественных оснований сооружений, обусловливают их неоднородность и анизотропность по механическим и фильтрационным

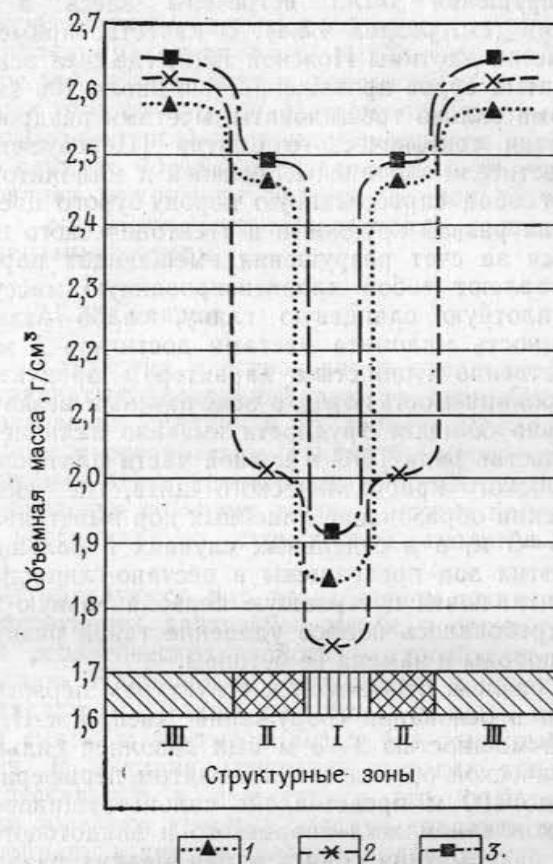


Рис. 2.6. Изменение объемной массы пород на участке разрывного тектонического нарушения.

1 — центральная часть зоны тектонического нарушения; II — краевые части зоны тектонического нарушения; III — зоны относительно сохранных пород. 1 — Самаркандский гидроузел — фельзитовые порфиры; 2 — гидроузел 10 на канале Иртыш—Караганда (известняки); 3 — Вячеславский гидроузел (песчаники). По А. И. Маркову

свойствам, нарушают устойчивость откосов и склонов, определяют возможность дифференцированных подвижек при землетрясениях, т. е. ухудшают и усложняют инженерно-геологические условия возведения гидротехнических сооружений. Нередко наличие или отсутствие разломов является решающим доводом в пользу выбора того или иного участка строительства, створа, определения типов и конструкций сооружений.

Так, на севере Русской платформы значительное число гидроузлов возведено в пределах Кольского полуострова, где на поверхность выходит кристаллический фундамент платформы, разбитый большим числом разрывных тектонических нарушений.

Крупные нарушения были встречены здесь в основании многих плотин (см. раздел 4.3.4). В качестве примера можно привести участок плотины Иловской ГЭС, где был вскрыт большой ступенчатый сброс протяженностью около 100 км. Породы в зоне разлома сильно трещиноваты, местами раздроблены, образуют участки тектонического смятия [Перепускова, 1964]. Трещины-сместители заполнены брекчий и милонитом, которые представляют собой спрессованную породу бурого цвета, состоящую из щебня разной крупности и «тектонического песка», образовавшегося за счет разрушения вмещающих пород. Милониты представляют собой хлоритизированную массу, превращенную в плотную сланцевую глину, слабо размокающую в воде. Мощность милонита местами достигала 5 м. В связи с преимущественно глинистым характером продуктов разрушения водопроницаемость пород в зоне разлома незначительная.

Значительно большие трудности вызвало наличие разломов при строительстве ряда ГЭС в южной части платформы, в пределах Украинского кристаллического щита, где тектонические зоны обусловили образование линейных кор выветривания мощностью до 5–6 м, а в отдельных случаях и больше. Породы в пределах этих зон превращены в песчано-глинистую породу типа сапролита, почти потерявшую первоначальную прочность. Местами потребовалось полное удаление такой разрушенной и выветрелой породы и замена ее бетоном.

Крупный разлом, относимый к структурам первого порядка, был встречен в основании сооружений Днепрогэс-II. Основной шов разлома мощностью 2–3 м был заполнен сильно выветрелыми тектонической брекчий и милонитом, периферийная часть мощностью до 100 м представлена сильно трещиноватыми породами со скоплением жил кварцевого и эпидотового состава.

Крупный разлом типа сдвига и ряд мелких разломов были встречены в створе Красноярской ГЭС. Главное нарушение пересекло по диагонали основание правобережной водосливной плотины, захватывало часть основания здания ГЭС и прослеживалось под раздельным пирсом дальше в сторону нижнего бьефа. В нарушенной зоне порода была представлена милонитом и тектонической брекчий суммарной мощностью от 0,1 до 4 м. Под влиянием процессов выветривания милонит превратился в суглинисто-песчаную массу с отдельными обломками и блоками более сохранных пород [Леонов, Мазуров, Пирогов, 1967]. Зона разрушенных пород прослеживалась значительно глубже дна котлована. В этом случае также потребовалось удаление ослабленных пород и замена их бетоном.

Примером, типичным для условий строительства плотин на формации карбонатных пород в складчатой зоне с крупными тектоническими нарушениями, может служить Ингури-ГЭС (см. раздел 4.3.1.3). Здесь в процессе изысканий и проходки котлованов был вскрыт ряд разломов разных порядков, обла-

дающих некоторыми общими особенностями строения. Трещины-сместители разломов были выполнены глыбами, обломками и дресвой известняков и доломитов с заполнителем из песка и муки того же состава. Местами вблизи дневной поверхности крупнообломочный материал замещался песком и мукой. Это могло служить косвенным указанием на то, что в процессе их образования принимали участие не только механическое дробление и истирание, но и выветривание, приводящее к полной дезинтеграции породы.

### 2.2.3. Складки

Структура массивов пород определяется также наличием складчатых дислокаций разного типа. Описание механизма образования складок и их геометрии, которые отличаются большим многообразием, заняло бы много места, поэтому мы ограничимся здесь некоторыми общими замечаниями, тем более что сведения по этому вопросу можно найти в руководствах и учебниках по структурной геологии [Михайлов, 1973 и др.].

Складки образуются под воздействием сжимающих напряжений, действующих длительное время, в связи с чем породы проявляют реологические свойства — способность к пластическому течению. Наибольшей склонностью к пластическому течению обладают аргиллиты, глинистые сланцы, мергели, которые часто смыты в крутые складки без заметных нарушений сплошности. В жестких (хрупких) породах типа кварцитов, прочных песчаников и известняков это свойство выражено слабее. Они образуют крупные складки довольно простых форм, а будучи собраны в крутые складки, подвергаются растрескиванию, особенно в местах перегиба пластов — замках складок.

На образование складок влияет также мощность пластов. Тонкослоистые толщи сминаются в складки с явлением проскальзывания по принципу «колоды карт» и часто образуют довольно крутые формы без заметного дробления. Если сминаются толщи, включающие жесткие и пластичные породы, наблюдается образование дисгармоничной складчатости. Иногда наблюдается также явление «перетекания» пластичных пород из участков с более высокими напряжениями (осевые части складок) к участкам с более низкими напряжениями (крылья складок) с изменением мощности пластов.

Наличие складок приводит к тому, что в плоскости основания сооружения оказываются породы, заметно различающиеся по составу, свойствам и условиям залегания. Это создает неоднородность основания, которая часто усиливается тем, что породы различного состава по-разному реагируют на процессы разуплотнения и выветривания. Так, песчаники, часто содержащиеся в толщах терригенных пород, долго сохраняют

свойства скальной породы, в то время как глинистые сланцы быстро превращаются в мелкую щебенку или рыхлую глинистую массу. Наличие складок ухудшает также устойчивость откосов на участках, где пласты падают в сторону котлована или выемки.

Учитывая эти обстоятельства, при выборе мест для возведения плотин обычно стремятся избежать участков, где имеется мелкая складчатость, а при наличии крупных складок — расположить сооружение в пределах какого-либо одного элемента складки (например, крыла складки с благоприятным направлением падения пластов).

#### 2.2.4. Коры выветривания

Важным структурным элементом массивов пород являются коры выветривания — современные и древние.

В зависимости от особенностей климатической обстановки и прежде всего от баланса тепла и влаги выветривание протекает в одних случаях с преобладанием физических, в других — с преобладанием химических процессов. Это приводит к формированию кор выветривания, существенно различающихся по мощности, строению, составу и свойствам образовавшихся продуктов выветривания. В пределах СССР современные (голоценовые) коры выветривания сформировались в довольно разнообразных климатических условиях, характерных для отдельных регионов. В северных широтах с арктическим или субарктическим климатом химические процессы выветривания протекают слабо и разрушение пород происходит главным образом под воздействием знакопеременных напряжений, создаваемых в толщах пород суточными колебаниями температуры и периодическим замерзанием — оттаиванием воды, проникающей в породы по трещинам. Напряжения расширяют трещины и ослабляют связи между минеральными частицами пород, что приводит к постепенной их дезинтеграции, вначале на крупные глыбы, затем на щебень и дресву и, наконец, на отдельные минеральные зерна — песок и пыль различной крупности. Вторичные глинистые минералы в этих условиях образуются в незначительных количествах, и элювий представлен в основном грубообломочными, песчаными и пылеватыми частицами. Такой тип выветривания обычно называют *морозным*.

Некоторым сходством обладают процессы выветривания в зоне пустынь и полупустынь, для которой характерны резкий дефицит влаги и значительные перепады температур на поверхности пород, нагреваемых в дневное время солнечной радиацией и теряющей тепло при интенсивном ночном выхолаждении. Известную роль играют также напряжения, возникающие в трещинах пород при испарении в них инфильтрационных или конденсационных вод и образовании кристаллов солей. Однако в определенных условиях в зоне пустынь могут

развиваться и некоторые химические процессы, вызывающие формирование своеобразных корок выветривания различного состава: кремнистых, карбонатных, железистых. Прочность корок нередко не только не уступает, но даже превышает прочность материнской породы. Образование корок разного состава характерно для некоторых районов Казахстана и республик Средней Азии. Рассмотренный комплекс процессов обычно называют *пустынным инсолиационным выветриванием*.

Для описания типичных кор физического выветривания может быть принята с некоторыми изменениями схема Н. В. Коломенского [1956], предусматривающая выделение следующих четырех горизонтов (сверху вниз):

- а) зернистая зона, где порода полностью дезинтегрирована до крупности песка и пыли;
- б) мелкообломочная или щебенисто-дресевяная зона, где порода разбита на мелкие обломки (дресва и щебень);
- в) глыбовая зона, где порода разбита трещинами выветривания на блоки и превращена в разборную скалу;
- г) трещиноватая зона, где влияние процессов выветривания проявляется в расширении существующих трещин и изменении пород на их поверхностях.

Мощность кор морозного и пустынного инсолиационного выветривания обычно не превышает первых метров.

В умеренной зоне в формировании кор выветривания принимают участие биохимические процессы, приводящие к разрушению алюмосиликатов и образованию гидроокисей железа и алюминия, простых окислов и вторичных глинистых минералов. Соответственно состав продуктов выветривания здесь более тонкий, глинистый, а мощность кор выветривания несколько больше.

Древние коры выветривания, встречающиеся во многих районах Советского Союза как на дневной поверхности (Урал, Казахстан и др.), так и в разрезе отложений на разных глубинах, сформировались преимущественно в условиях жаркого и влажного тропического климата. Обилие тепла и влаги способствовало в этих условиях развитию таких процессов как окисление, гидролиз, растворение, гидратация, образование новых соединений и минералов. Поскольку новообразования формировались в основном как псевдоморфозы по породообразующим минералам, выветрелая порода нередко имеет облик скальной породы, но по свойствам приближается к песчано-глинистым образованиям.

При расчленении кор химического выветривания критерием для выделения отдельных зон должна служить не степень дезинтеграции пород на обломки различных размеров, а степень их химического разложения. Так, Б. М. Гамалей и др. [«Методическое...», 1977] предлагают подразделять выветрелые породы по содержанию глинистых минералов степени

сохранности первичных структур на четыре группы: а) свежие и слабо измененные породы с содержанием вторичных минералов менее 10 % (I степень изменения); б) породы с содержанием вторичных минералов 10—30 % (II степень); в) сильно измененные породы с содержанием вторичных минералов 30—50 %, но с сохранением первичных структур (III степень) и г) очень сильно измененные породы без сохранения первичных структур. Они отмечают также, что при содержании в граните серицита до 40 % величина временного сопротивления на сжатие уменьшается на порядок.

Для классификации пород, подвергшихся химическому выветриванию, удобно использовать также схему, разработанную на основании изучения древних кор выветривания Урала [Корженко, 1963; Швец, 1964], которая предусматривает выделение следующих зон (сверху вниз):

а) сапролитовой, где порода превращена в песчано-глинистый материал со слабо выраженной первичной спайностью. В горных выработках сапролит разрабатывается с помощью лопаты, в куске разламывается и растирается руками. Сапролитовая зона нередко дополнительно подразделяется на подзоны или горизонты, строение и состав которых зависят от типа материнской породы (на гранитах часто выделяются подзоны каолинита и гидрослюд, на основных породах — подзоны охры и нонtronита);

б) рухляковой, где порода изменяет окраску и теряет прочность. Особенно глубокие изменения наблюдаются на поверхности блоков, образованных разломами и тектоническими трещинами. С глубиной степень выветрелости породы уменьшается и в центральной части блоков порода может сохранить прочность; в горных выработках рухляк разрабатывается с помощью ударных инструментов или взрывчатых веществ, в куске разламывается, но не растирается руками;

в) разборная скала, где порода еще сохраняет первоначальные свойства, а выветривание проявляется главным образом в расширении существующих трещин.

Мощность древних кор химического выветривания по сравнению с корами физического выветривания обычно больше и измеряется десятками, а иногда и сотнями метров. К трещинам и разломам, являющимся путями проникновения агентов выветривания в толщи горных пород, часто приурочены линейные коры выветривания, мощность которых по сравнению с площадными корами может быть в 2—3 раза больше.

Рассмотренные типы кор выветривания отвечают экстремальным климатическим условиям и связаны между собой большим числом промежуточных типов, в формировании которых принимают участие как физические процессы дезинтеграции, так и химические процессы разложения. В этих случаях отдельные зоны часто обозначают более общими определе-

ниями, такими как «зона интенсивного выветривания», «зона слабого выветривания», «зона относительно сохранных пород».

Ископаемые коры выветривания были встречены при строительстве ГЭС в разных районах СССР: на Русской платформе, Урале, в Казахстане и др. (см. гл. 4.).

### 2.3. Вещественный состав массивов горных пород

Как отмечено выше, вещественный состав массивов определяется породами, слагающими отдельные структурные элементы, и подземными водами, находящимися в различных пустотах (трещинах, кавернах и пр.), а в зоне аэрации также газами, заполняющими эти пустоты.

В строении массивов могут принимать участие любые породы, осадочного, метаморфического и магматического происхождения. Поскольку состав и структура различных пород описаны с достаточной степенью детальности, в том числе с инженерно-геологических позиций, в многочисленных специальных руководствах и учебниках [Грунтоведение, 1973; Ломтадзе, 1970 и др.], здесь мы останавливаться на этом вопросе не будем. Что касается свойств пород в естественном залегании (в массиве), то они определяются не столько составом и структурой пород, сколько структурными особенностями самого массива (трещиноватостью, наличием разломов и пр.). Этот вопрос мы рассмотрим в разделе 2.7, посвященном описанию свойств массивов скальных пород. Остановимся несколько подробнее на подземных водах.

В пределах скальных массивов распространены главным образом трещинные, пластово-трещинные, а в карбонатных породах также карстово-трещинные воды. Подземные воды порового типа встречаются реже, в основном в конгломератах, песчаниках, алевролитах, некоторых разностях известняков, сохранивших, несмотря на цементацию, значительную открытую пористость, иногда в эфузивах. В районах с интенсивной блоковой тектоникой большое значение имеют воды разрывных нарушений. Большое влияние на степень водоносности скальных пород оказывает их разуплотнение, формирующее зону открытой трещиноватости.

По условиям движения трещинных вод в массивах пород могут быть выделены четыре характерные зоны:

а) зона аэрации, где подземные воды полностью сдренированы и происходит инфильтрация поверхностных вод в толщу пород по открытым трещинам разного генезиса. В связи с дренирующим влиянием реки мощность этой зоны в речных долинах может измеряться десятками и сотнями метров. За редким исключением (химические коры выветривания) зона аэрации характеризуется высокой водопроницаемостью;

б) зона интенсивной циркуляции, где происходит наиболее активный водообмен, а движение воды направлено в сторону речной дрены. По степени водопроницаемости эта зона обычно мало отличается от зоны аэрации;

в) зона замедленной циркуляции, где заметно снижается водопроницаемость пород, а следовательно, затрудняется водообмен;

г) зона глубинной циркуляции, где движение подземных вод связано не с дренирующим влиянием местных эрозионных врезов, а с общей тектонической структурой региона и наличием отдаленных дрен (морских бассейнов, депрессий и др.).

Мощность этих зон может быть различной и зависит от строения кор выветривания и зоны разуплотнения.

При строительстве гидроузлов в районах развития осадочных, эфузивно-осадочных или эфузивных толщ, содержащих наряду с водопроницаемыми породами водоупоры (абсолютные и относительные), на участке возведения сооружений могут быть развиты также напорные воды с различными пьезометрическими напорами, в том числе превышающими уровень воды в реке. Глубокие водоносные горизонты могут быть и полностью изолированными от грунтовых и поверхностных вод, и связанными с ними через гидравлические окна или по тектоническим разрывным нарушениям.

Строительные работы, начиная с момента проходки строительных выемок и котлованов, вносят в гидрогеологические условия участка строительства существенные изменения. Образуются обширные депрессионные воронки, нередко захватывающие и открытые водотоки, резко возрастают гидравлические градиенты и фильтрационное давление в трещинах горных пород. В определенных условиях это может явиться причиной развития в них подземной эрозии и супфозионных явлений (см. 3.2.3).

При наличии на небольшой глубине напорных вод с большими напорами и небольшой мощности водоупора проходка выемок и котлованов может явиться также причиной прорыва в них напорных вод.

Дальнейшие изменения гидрогеологических условий вызываются строительством основных сооружений и заполнением водохранилища, создающим постоянный поток грунтовых вод в нижний бьеф, а в некоторых случаях и в соседние эрозионные врезы.

Фильтрация может сопровождаться подземной эрозией и супфозией. Эти явления могут повлечь за собой не только увеличение потерь воды на фильтрацию, но и развитие в определенных условиях напорно-силовых деформаций с нарушением сплошности пород (см. гл. 3).

Влияние подземных вод может проявляться также в выщелачивании растворимых пород, агрессивном воздействии на металл и бетон, некоторых других явлениях.

## 2.5. Физические поля в массивах горных пород

Физическое состояние массивов скальных пород определяется формированием в их пределах физических полей, основную роль среди которых играют тепловое поле и поле напряжений.

### 2.5.1. Тепловое поле

Строительство гидротехнических сооружений, включая гидротехнические тунNELи, осуществляется в верхней части литосферы на глубине, редко превышающей первые сотни метров, т. е. в пределах экзотермозоны.

Тепловой баланс и строение теплового поля в пределах экзотермозоны формируется под влиянием двух встречных тепловых потоков: 1) порождаемого солнечной радиацией и направленного от поверхности земли в глубь толщ пород и 2) создаваемого внутриземными процессами и направленного из недр земли к ее поверхности.

Большое значение для строения и параметров теплового поля в пределах экзотермозоны имеет температура на поверхности земли, определяющаяся соотношением между приходными и расходными статьями теплового баланса. К числу приходных статей относятся прямая и рассеянная солнечная радиация и приток внутриземного тепла, к числу расходных — отраженная радиация, эффективное излучение и различные физические и химические процессы, происходящие на поверхности земли. Членом балансового уравнения, который может иметь разный знак, является advективное тепло, переносимое воздушными и морскими течениями. При положительном тепловом балансе породы находятся в талом состоянии, при отрицательном — в них образуется многолетняя («вечная») мерзлота. В СССР многолетнемерзлые породы занимают 49 % территории, а мощность мерзлых толщ достигает 800—1000 м. Мерзлые породы — важнейший фактор, определяющий условия строительства гидротехнических сооружений в северной и северо-восточной частях СССР. Хотя скальные породы, являющиеся в большинстве случаев основанием сооружений, при промерзании не меняют заметно своих свойств, но наличие трещин, заполненных льдом или льдонасыщенным минеральным грунтом, создает ряд сложных проблем, которые рассмотрены в разделе 4.4.

Экзотермозону принято дополнительно подразделять на подзоны суточных, сезонных, годовых, многолетних, вековых и эпохальных колебаний температуры. В пределах подзон суточных (0,8—1,0 м), сезонных (8—10 м) и годовых (15—30 м) колебаний температур основную роль в тепловом балансе

играет тепловой поток, формируемый лучистой энергией солнца, ниже существенную роль приобретает внутриземной тепловой поток, вызывающий постепенное повышение температуры с глубиной.

Глубина, где температура в течение всего года остается неизменной, носит название слоя постоянных температур. На территории СССР температура этого слоя изменяется от минус 13°C во внутренних районах Таймырского полуострова до плюс 20°C в пустынях Средней Азии. Ниже этого слоя температура постепенно нарастает по линейному закону

$$t = t_0 + \frac{z}{h_c}, \quad (2.2)$$

где  $t$  — температура на глубине  $z$  от слоя постоянных температур;  $t_0$  — температура на глубине слоя постоянных температур;  $z$  — глубина точки от слоя постоянных температур, м;  $h_c$  — постоянная для данного участка земной поверхности, носящая название геотермической ступени. Она равна интервалу (в м), в пределах которого температура возрастает на 1°C. Обратная величина называется геотермическим градиентом.

Средняя величина геотермической ступени для земного шара составляет 33 м, но в зависимости от широты местности, геоструктурного положения и ряда других факторов она может изменяться в широких пределах: от первых метров до 150—180 м. Наименьшую величину (первые метры) геотермическая ступень имеет в районах активной вулканической деятельности. Так, в некоторых районах Камчатки уже на глубине 500—600 м температура достигает 150—200°C. В районах молодой альпийской складчатости (Карпаты, Крым, Копетдаг, Кавказ) величина геотермической ступени изменяется от 12 до 50 м, в зонах более древней герцинской и каледонской складчатости (Урал, Саяны, Алтай и др.) — увеличивается до 30—75 м, в платформенных областях (Русская, Восточно-Сибирская) — до 40—100 м и наконец в пределах древних щитов (Балтийский, Украинский) до 100—180 м. Значение геотермической ступени может оставаться по глубине постоянным, увеличиваться или уменьшаться, что зависит от особенностей геологического разреза, закономерностей движения подземных вод, проявлений гидротермальной или вулканической деятельности, развития экзотермических процессов и пр. Увеличение температуры с глубиной создает существенные трудности при строительстве туннелей глубокого заложения (см. раздел 3.3.4).

### 2.5.2. Поле напряжений

В формировании поля напряжений принимают участие давление вышележащих толщ (геостатическая нагрузка), планетарные и тектонические процессы, изменения па-

раметров теплового поля, физико-химические процессы и др.

Доля каждого фактора в формировании интегрального поля напряжений можно оценить только приближенно. Наиболее достоверно это можно сделать в отношении геостатического давления. Согласно гипотезе локального гравитационного поля, исходящей из положений теории упругости и представлений об однородности и изотропности массивов пород, величину вертикального сжимающего  $\sigma_z$  и горизонтальных растягивающих напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  можно определить по следующим выражениям:

$$\sigma_z = \gamma_0 z; \quad (2.3)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = v \gamma_0 z, \quad (2.4)$$

где  $\gamma_0$  — объемный вес породы;  $z$  — глубина расчетной точки от поверхности земли;  $v$  — коэффициент бокового распора, численно равный  $\frac{\mu}{1-\mu}$ . Здесь  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Усредненное значение коэффициента Пуассона для верхней части земной коры обычно принимается равным 0,25; соответственно получим

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{1}{3} \gamma_0 z. \quad (2.5)$$

В формировании поля напряжений в толщах пород участвует не только геостатическая нагрузка, но и тектонические силы. По мнению одних исследователей [Булин, 1973 и др.], их следует связывать с последними эпохами складчатости, по мнению других [Кропоткин, 1977 и др.], — с современными тектоническими движениями.

Горизонтальные напряжения, фиксируемые в толщах пород, не только значительно превышают по величине расчетные данные, но и являются, как правило, не растягивающими, а сжимающими. Как отмечает П. П. Кропоткин [1977], сжатие земной коры можно считать характерной особенностью современного тектонического этапа. Оно наблюдается не только в пределах молодых складчатых зон (в поясах неотектонической активизации, например, в Тянь-Шане), но и на материковых платформах. Растижения приурочены только к отдельным рифтовым зонам, например к Байкалу и некоторым районам Закавказья. Величина сжимающих напряжений, оцениваемая по геологическим и сейсмологическим данным, может находиться в пределах (10—100) МПа [Гзовский, 1964].

Определенную роль в формировании поля напряжений в массивах пород кроме гравитации, тектонических, а возможно, и планетарных процессов играют изменения во времени

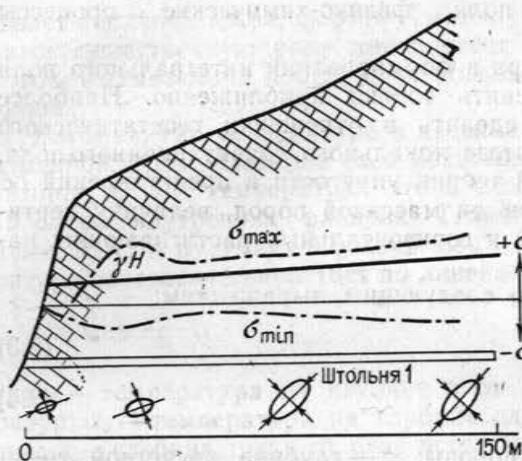


Рис. 2.7. Распределение напряжений в массиве известняков (Ингури-ГЭС) при отсутствии тектонических нарушений [Крылов, 1972]

параметров теплового поля в толщах пород, а также процессы их химических и физико-химических преобразований.

Пространственные изменения напряженного состояния в отдельных точках (величины и пространственной ориентировки главных напряжений) приводят к формированию поля напряжений, которое в массивах скальных пород характеризуется сложной и неоднородной пространственной структурой. Последняя определяется не только положением и соотношением крупных геологических образований (платформ, орогенных зон и пр.), но и такими факторами, как рельеф, изменение степени консолидации пород, наличие разломов, зон трещиноватости, крупных трещин и пр.

Особенно большое значение имеет степень консолидации пород. При высокой степени консолидации пород, слагающих кристаллические фундаменты платформ или складчатые фундаменты орогенных зон, значительные горизонтальные напряжения, превышающие на  $(50-600) \cdot 10^5$  Па величину геостатической нагрузки, наблюдаются на глубине 10—200 м.

Как отмечает П. П. Кропоткин [1977], измерения величины горизонтальных напряжений в докембрийских кристаллических породах щитов Фенноскандии, Канады, Африки, Австралии, а также складчатых фундаментов каледонид, герцинид и мезозойских и кайнозойских складчатых поясов позволяют аппроксимировать изменения горизонтального напряжения по глубине зависимостью следующего вида:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = 0,098\gamma_0 z + 18 \text{ МПа},$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — нормальные напряжения, действующие в горизонтальной плоскости;  $z$  — глубина;  $\gamma_0$  — объемный вес пород.

В осадочном чехле платформ и складчатых сооружений значительные горизонтальные напряжения либо не наблюда-

ются, либо фиксируются на значительной глубине. Такие различия объясняются, по-видимому, разной деформируемостью консолидированных и неконсолидированных пород.

Легкая деформируемость неконсолидированных осадочных толщ приводит к тому, что в них интенсивно развиваются явления вязко-пластического течения, что приводит к быстрой релаксации напряжений. Консолидированные породы обладают значительно более высокой жесткостью, и это способствует накоплению в них запасов упругой энергии.

Специальные исследования по изучению напряженного состояния в массивах пород были выполнены при изучении створов Саянской, Токтогульской, Ингури и некоторых других ГЭС. [Крылов, 1972, Кутепов, 1973 и др.]

Исследования в створе плотины Ингури-ГЭС проводились в двух штолнях, длиной каждая 150 м, пройденных в бортах долины реки [Крылов, 1972]. Исследования дали следующие результаты (рис. 2.7, 2.8):

а) приусьетная часть штолни 1 характеризовалась небольшими растягивающими напряжениями. С глубиной они постепенно переходили в сжимающие и на расстоянии 20 м от устья штолни достигли веса вышележащих пород ( $\gamma_0 H$ ). Этот интервал отнесен к зоне пониженных напряжений, он характеризовался интенсивным развитием разуплотнения и выветривания пород;

б) на расстоянии 35 м от устья штолни  $\sigma_{max}$  превысило  $\gamma_0 H$  в три раза. Соответственно интервал от 20 до 45 м отнесен к зоне повышенных напряжений, в нем наблюдалась в основном закрытая трещиноватость;

в) в интервале от 45 до 150 м  $\sigma_{max}$  оставалось примерно на одном уровне и составляло примерно 1,2  $\gamma_0 H$ . Этот интервал отнесен к области постоянных напряжений, трещиноватость здесь выражена весьма слабо.

В штолне 2 была вскрыта зона дробления мощностью около 1 м, при приближении к ней произошло резкое снижение

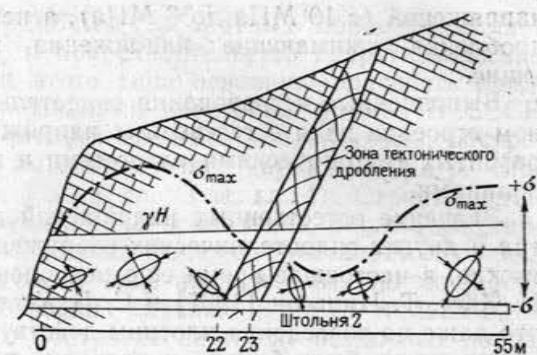


Рис. 2.8. Распределение напряжений в массиве известняков (Ингури-ГЭС) при наличии зоны тектонического дробления [Крылов, 1972]

напряжений (с 10 МПа до 3 МПа), а непосредственно за зоной дробления сжимающие напряжения перешли в растягивающие.

Выполненные исследования свидетельствуют о весьма сложном строении поля естественных напряжений в массивах пород, разбитых тектоническими разломами и прорезанными речными долинами.

Значение естественных напряжений для строительства плотин и других гидротехнических сооружений очень велико и, возможно, в настоящее время еще недооценивается. Как отмечают Н. Хаст, Т. Нильсон [1967] и С. Б. Ухов [1975], не исключено, что даже до возведения плотины действующие в породах напряжения могут быть близки к пределу прочности, и увеличение давления в результате строительства сооружений и наполнения водохранилища может привести к локальным разрушениям основания.

## 2.6. Динамика массивов горных пород.

### Геологические процессы

Динамика массивов пород проявляется в развитии различных геологических процессов — эндогенных, связанных с глубинными силами Земли, и экзогенных, обусловленных воздействием внешних факторов. К важнейшим в первой группе процессов относятся современные тектонические движения и землетрясения, во второй — выветривание, карст, гравитационные процессы (обвалы, оползни), сели и др. В зоне многолетней мерзлоты большое значение имеют процессы промерзания — оттаивания пород и сопутствующие явления.

Проявления эндогенных процессов рассматривается в разделе 6.3.6 с учетом типа и конструкции гидротехнических сооружений. Процессы выветривания были кратко охарактеризованы при описании кор выветривания в разделе 2.4.4 и, кроме того, рассмотрены при описании процессов, происходящих в строительных выемках и котлованах в период строительства и эксплуатации сооружений (раздел 3.2.2). Поэтому ограничимся здесь описанием карста и гравитационных процессов, представляющих наибольшую опасность для плотин и других гидротехнических сооружений.

#### 2.6.1. Карст

Карст связан в своем развитии с водорастворимыми породами: карбонатными (известняки, доломиты, писчий мел), гипсом и каменной солью. По степени растворимости эти породы соотносятся примерно как 1 : 100 : 10 000. В соответствии с этим карбонатные породы считают труднорастворимыми, гипс — среднерасторимыми, а каменную соль — легкораство-

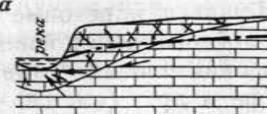
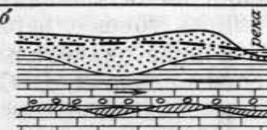
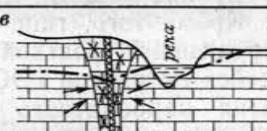
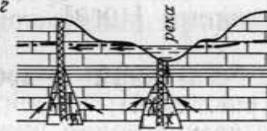
римой. Слабая растворимость карбонатных пород замедляет развитие в них карста, и при строительстве гидротехнических сооружений на породах этого типа основную опасность представляют уже сформировавшиеся карстовые формы. В СССР в долинах, сложенных закарстованными известняками, построено значительное число высоких плотин: Чарвакская на р. Чирчик, Павловская на р. Уфе и др. (см. гл. 4). Строительство гидротехнических сооружений на основаниях, сложенных гипсом или каменной солью, или на толщах нерастворимых пород, содержащих гипс или соль в виде значительных по мощности прослоев, допускается в редких случаях. В СССР только одна плотина (Камская ГЭС) построена на толще осадочных пород, включающих на некоторой глубине мощный слой гипса и ангидрита (см. раздел 4.2.1.2). Кроме того, гипс и каменная соль встречены в основании сооружений Нурекской ГЭС, а каменная соль — в основании строящейся Рогунской ГЭС.

Закономерности развития карбонатного карста применительно к задачам гидротехнического строительства наиболее полно изучены А. Г. Лыкошиным [1968], подразделившим его на три типа,

- а) карст придолинный, связанный с дренирующим влиянием эрозионных врезов (рис. 2.9, а);
- б) карст, связанный с дренирующим влиянием удаленных эрозионных врезов (рис. 2.9, б);
- в) карст зон тектонических нарушений в условиях напорных (рис. 2.9, в) и безнапорных (рис. 2.9, г) вод.

Карст первого типа распространен там, где толщи растворимых пород прорезаны сетью долин и оврагов. Развит он в основном в дне и бортах речных долин. На водоразделах интенсивность и особенности развития карста определяются мощностью и свойствами перекрывающих четвертичных отложений. Чем меньше водопроницаемость и больше мощность покровных отложений, тем слабее развит карст.

Карст второго типа развивается в тех случаях, когда долина реки вскрывает нерастворимые породы, а растворимые слои залегают глубже и содержат подземные воды, движущиеся в сторону удаленного очага разгрузки — моря или более глубокой речной долины. Такая картина нередко наблюдается на платформах, где известняки переслаиваются с мергелями или глинами, а также в пределах передовых хребтов и предгорий, где моноклинально залегающие толщи известняков перекрываются терригенными глинистыми образованиями. Иногда карст этого типа вскрывается долиной реки, как это наблюдалось, например, на участках строительства Плявиньской ГЭС на Даугаве и Кауховской ГЭС на Днепре. Так, в районе Плявиньской ГЭС в разрезе толщи доломитов были вскрыты слои «дырчатых» доломитов весьма выдержанной мощности, структура которых оставалась неизменной на больших расстояниях

| Тип карста, обусловленный дренирующим влиянием  | Гидродинамическая схема   | Основные особенности  |
|---|---|---|
| Близких эрозионных врезов   |  | Зона интенсивного карстообразования облегает склоны дренирующей долины с уменьшением мощности в направлении к водоразделу                           |
| Удаленных эрозионных врезов   |  | Закарстованность пород равномерная, преимущественно в виде кавернозности, расширенных горизонтальных трещин   |
| Зон тектонических нарушений:<br>при преимущественно нисходящем движении подземных вод |  | Интенсивная закарстованность развивается в бортах нарушения, с глубиной затухает  |
| при преимущественно восходящем движении подземных вод                                 |  | Закарстованность пород в бортах нарушения с глубиной нарастает и расширяется.<br>Характерны погребенные, не проявленные на поверхности формы карста |

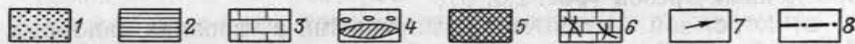


Рис. 2.9. Гидродинамические типы карста, по А. Г. Лыкошину.

1 — пески, глины; 2 — известняки; 3 — каверны и карстовые полости; 4 — текtonическая зона; 5 — зона интенсивного развития карста; 6 — направление движения подземных вод; 8 — уровень подземных вод

от реки. Кавернозность была установлена также в сарматских известняках, слагающих борта долины Днепра в створе Кацковской ГЭС.

Карст третьего типа, приуроченный к зонам дробления пород при нисходящем движении подземных вод, впервые описан А. Г. Лыкошиным [1968] для верховий Ангары (Бархатовская ГЭС). Борта долины сложены здесь мощной толщей трещиноватых кембрийских доломитов. Своевобразие гидрогеологических условий заключается в наличии депрессий поверхности грунтовых вод, вытянутых вдоль правого и левого берегов, где уровни воды были зафиксированы на 0,5—1,2 м ниже уровня воды в реке. На левом берегу ширина депрессии составляла 200—2000 м, на правом — достигала 2000—3000 м. По данным электроразведки, зоны депрессий характеризовались повышенным сопротивлением, что указывало на интенсивное развитие трещиноватости и закарстованности пород. Отмеченные закономерности носили локальный характер и, по-видимому, были связаны с тем, что зона дробления пород значительно сокра-

щала путь движения воды по сравнению с открытым руслом реки.

Карст, приуроченный к тектоническим разломам и связанный с восходящим движением подземных вод, также описан А. Г. Лыкошиным [1968] для среднего течения р. Даугава (Плявиньская ГЭС). Здесь развита мощная толща доломитов девонского возраста, перекрытых глинами и подстилаемых песками с напорными водами. Инженерно-геологическая съемка и разведочные работы выявили большое число замкнутых депрессий на поверхности земли, а местами и карстовых колодцев, которые располагались цепочками, пересекавшими под разными углами современную долину р. Даугавы и ее древний врез, выявленный буровыми скважинами. Таким образом, пространственное размещение карстовых форм не было связано ни с современной, ни с древней эрозионной сетью. Дальнейшие исследования показали, что цепочки карстовых форм приурочены к осям пологих складок, осложнявших восточное крыло Польско-Литовской синеклизы, в пределах которой располагался район изысканий. В связи с хрупкостью доломитов образование складок сопровождалось возникновением крупных тектонических трещин, которые и явились путями разгрузки подземных вод. Таким образом, карст развивался здесь необычно — снизу вверх.

На развитие карста большое влияние оказывают структура массивов пород (особенно разломы и трещиноватость), состав, текстурные особенности карбонатных пород. В платформенных условиях, где толщи известняков залегают с малыми углами падения, основную роль в развитии карста играют крутопадающие трещины и трещины напластования. Первые служат путями проникновения поверхностных вод в массив пород, вторые — формируют горизонтальную составляющую фильтрационного потока. Вблизи склонов речной долины горизонтальный поток перехватывается трещинами бортового отпора. В результате формируются карстовые полости нескольких систем — одной или двух вертикальных или близких к нему, одной — горизонтальной или слабонаклонной и одной — контролируемой трещинами бортового отпора и повторяющей контуры речной долины. Вертикальные трещины в местах расширений нередко превращаются в карстовые колодцы, горизонтальные, главным образом в узлах пересечений с вертикальными в пещеры.

В горных условиях, где толщи известняков залегают под разными углами и часто осложнены складчатыми и разрывными нарушениями, закономерности пространственного распределения карстовых форм более сложные. Особенно большое значение имеют разломы, которые могут выполнять в одних случаях роль дрен, в других — барражей. В первом случае карстовые полости формируются в пределах тектонических зон, во втором — на контакте с ним. Роль барражей играют также

крутопадающие дайки, жилы, пласти слаботрещиноватых пород, массивы изверженных или гидротермально измененных осадочных пород (например, каранкулиты в створе плотины Чарвакской ГЭС).

Значительное влияние на развитие карста оказывает пористость, приводящая к тому, что выщелачивание пород часто наблюдается на значительной глубине, где открытая трещиноватость выражена слабо. Характерной формой карста является в этом случае кавернозность, наблюдавшаяся на участках строительства Болховской, Плявинской, Каюковской и других ГЭС.

Большое влияние на развитие карста оказывает состав карбонатных пород, в частности, присутствие в них глинистого материала: при содержании в породе глинистых частиц более 10—15 % карст практически не развивается [Родионов, 1958]. Большинство исследователей отмечает также, что в смешанных разностях карбонатных пород типа известняковистых доломитов и доломитизированных известняков карст развивается более интенсивно, чем в мономинеральных породах. Еще больше увеличивает растворимость пород присутствие в них рассеянного гипса (в составе цемента). В связи с неодинаковой растворимостью порообразующих компонентов карстовый процесс в таких породах приводит к образованию остаточных продуктов растворения в форме доломитовой или реже известняковой муки, заполняющей в той или иной степени карстовые пустоты. Доломитовая мука нередко образуется и в чистых доломитах, где ее присутствие связано с более быстрым растворением тонкого пористого цемента по сравнению с крупными минеральными зернами. Как отмечает А. Г. Лыкошин [1968], доломитовая мука образует гнезда неправильной формы до 10—12 м в поперечнике.

Наряду с современным карстом в массивах карбонатных пород часто встречаются формы древнего («мертвого») карста, нередко нескольких возрастных генераций. Иногда древний карст приурочен к древним эрозионным врезам, смещенным в плане относительно современной гидрографической сети. Подобные случаи неоднократно наблюдались при строительстве ГЭС на Русской платформе, Плявинская на р. Даугаве, Павловская на р. Уфе, где наиболее глубокие эрозионные врезы образовались в верхнем плиоцене и в настоящее время погребены под толщей ледниковых и других четвертичных отложений (см. раздел 4.2.1).

Развитие карста прекращается при повышении базиса эрозии и сопровождается постепенным заполнением трещин и полостей нерастворимым, чаще глинистым материалом. Новое воздымание территории нередко приводит к вымыву материала, заполняющего пустоты, и «оживлению» карста, которое обуславливает резкое увеличение водопроницаемости закарстован-

ного массива. Такого рода «оживление» карста было отмечено на участках строительства Нарвской и Каюковской ГЭС.

Карстообразование прекращается также в том случае, когда карстующиеся породы перекрываются некарстующимися; при этом образуется древний погребенный карст.

Частичное заполнение полостей может наблюдаться и при современном активном карсте, если скорости фильтрации не обеспечивают полный вынос материала, образующегося в процессе карстования или поступающего в карстовые полости с поверхности земли вместе с инфильтрующимися водами.

Выделяются следующие основные генетические типы заполнения карстовых пустот [Соколов, 1962]:

- а) остаточные продукты карстового процесса в форме доломитовой или известняковой муки, песка, дресвяно-щебенистых образований или глинистых накоплений;
- б) обвальные накопления (главным образом в пещерах), преимущественно крупноглыбового состава;
- в) аквальные механические осадки: аллювий подземных потоков, озерные отложения (в крупных пещерах);
- г) материал, привнесенный в карстовые пустоты инфильтрационными водами — от глин до гравийно-галечных отложений.

Состав, физико-механические, фильтрационные и другие свойства заполнителя характеризуются большим разнообразием. Наиболее неблагоприятными свойствами, по-видимому, обладает доломитовая (известняковая) мука, вымыв которой происходит при очень небольших градиентах (см. разделы 3.2.3 и 6.3.2.6).

Водопроницаемость закарстованных пород может быть условно подразделена на пористо-ячеистую и трещинную. Последняя обычно в несколько раз выше.

## 2.6.2. Гравитационные процессы

Среди гравитационных процессов, развивающихся на склонах речных долин и осложняющих строительство плотин и других гидротехнических сооружений, наибольшее значение имеют оползни и обвалы. Оползни могут быть связаны: а) с рыхлыми четвертичными отложениями, покрывающими верхние части склонов и прилегающие водоразделы: лессами, ледниковыми, покровными, пролювиальными, солифлюкционными и др.; б) с древними оползневыми накоплениями и в) с коренными породами.

Оползни первых двух групп широко развиты в районах, где водораздельные пространства покрыты мощной толщей четвертичных отложений. Примером могут служить оползни-потоки, формирующиеся в лессах и лессовидных суглинках в Таджикистане. Объем таких оползней изменяется от 50—100 м<sup>3</sup> до нескольких миллионов кубических метров, образование их

связано главным образом с переувлажнением пород при выпадении аномально большого количества осадков или реже с искусственным орошением. Оползни-потоки движутся с большой скоростью и могут представлять значительную опасность для плотин и для других сооружений.

Оползни в древних оползневых накоплениях развиты во многих речных долинах, где в плейстоцене интенсивно развивались гравитационные процессы. Примером может служить оползень 1964 г. в долине р. Зеравшан у пос. Айни [Федоренко, 1976]. Долина реки врезана здесь в песчанико-сланцевую флишоидную толщу палеозойского возраста с мощной зоной разуплотнения (до 50–80 м). Формирование оползня объемом около 100 млн. м<sup>3</sup> началось еще в верхнем плейстоцене с образованием в верхней части левого склона сейсмо-гравитационного нарушения, часть которого сохранилась до настоящего времени. Фронтальная часть оползня в процессе движения полностью разрушилась и, достигнув дна долины, продвинулась по поверхности террасы почти на 2 км, образовав мощные оползневые накопления. Породы тыловой части оползня двигались медленнее и образовали ряд ступеней в нижней части склона. В дальнейшем эти ступени по частям сползали в реку, дважды перекрывая ее русло. К числу таких смещений относится и оползень 1964 г. Длина оползневого тела составила около 630 м, объем около 20 млн. м<sup>3</sup>. Оползень перекрыл русло р. Зеравшан и создал озеро объемом около 150 млн. м<sup>3</sup>. Менее чем за месяц оно могло переполниться и прорвать завал с образованием паводковой волны большой разрушительной силы. Поэтому за 12 дней был создан в теле завала канал для постепенного спуска накопившейся воды, и угроза неуправляемого паводка миновала.

Наибольшую опасность представляют обвалы и оползни в коренных породах. Врез речной долины в массив пород, находящийся в напряженном состоянии, приводит к его разуплотнению с раскрытием существующих и образованием новых трещин, в том числе крупных трещин бортового отпора, повторяющих контуры речной долины. Вследствие этого происходит частичное или полное отчленение крупных блоков пород, часто сохраняющих устойчивость только за счет трения и «зашепления» по неровной поверхности разделяющих их разломов и трещин. Одновременно активно развиваются процессы выветривания, особенно вдоль тектонических нарушений, где путями проникновения атмосферных осадков и других агентов выветривания являются многочисленные трещины. Они приводят к постепенному превращению милонитов и катаклизитов, заполняющих тектонические нарушения, в глинисто-песчаный материал, выдавливаемый или вымываемый из трещин. Это вызывает нарушение равновесия блоков и часто создает начальный импульс для их смещения. Дальнейшее развитие деформаций протекает

под воздействием температурных колебаний, набухания и усадки глинистого материала, заполняющего разломы и трещины, и сейсмических воздействий разной интенсивности. Сильные землетрясения могут вызвать нарушение устойчивости склона, слабые и далекие землетрясения проявляются в небольших смещениях, измеряемых сантиметрами или миллиметрами, как это имело место, например, при 8-балльном землетрясении в районе Чиркейской ГЭС на р. Сулак (см. раздел 4.3.1).

Интересные данные, иллюстрирующие процесс постепенного развития обвально-оползневых смещений в скальных породах, были получены при изысканиях под плотину Наглу на р. Кабул (см. раздел 4.3.2).

На правом склоне долины, где толща метаморфических пород падает в сторону реки, разуплотнение пород, образование трещин бортового отпора и медленные смещения неустойчивых блоков привели к образованию структур, изображенных на рис. 2.10. На левом склоне долины наблюдалось другое явление — головы пластов изогнулись здесь под влиянием крипа, образовав флексурообразный перегиб. Точные геодезические наблюдения показывают, что смещения продолжаются и в настоящее время с интенсивностью до 4 мм в год.

Показательны также факты, установленные при изысканиях и строительстве плотины Храми-1 в Грузии (см. раздел 4.3.4). Нижняя часть ущелья в районе напорно-станционного узла прорезает скальный массив, сложенный палеозойскими гранитами, претерпевшими многократные тектонические нарушения. Разведочными шахтами было установлено, что массив состоит из ряда блоков, разделенных трещинами, заполненными глинистыми продуктами выветривания. Ширина отдельных трещин достигала 3–4 м. Лабораторные исследования показали, что глины характеризуются очень невысокими прочностными показателями ( $\phi=8-20^\circ$ ,  $c=0,01-0,025$  МПа). Оползневые смещения привели к тому, что местами можно было наблюдать надвигание блоков гранитов на делювиальные отложения. Первоначально факт развития интенсивных оползневых смещений в массиве гранитов представлялся маловероятным, но оживление оползней, вызванное утечками воды из напорного трубопровода не оставило в этом никаких сомнений.

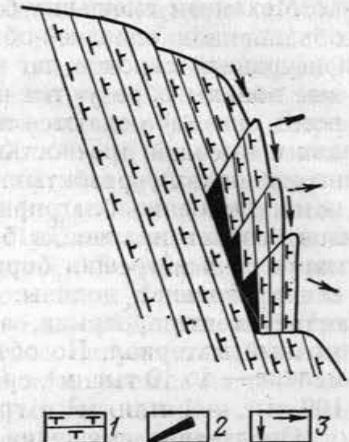


Рис. 2.10. Схема смещения блоков на правом берегу р. Кабул, Наглу-ГЭС.

1 — гнейсы; 2 — зияющие трещины; 3 — направление смещения блоков

Механизм смещения блоков пород с образованием оползней, обвалов или оползней-обвалов определяется крутизной и конфигурацией склонов, по которым происходит смещение. Типичные обвалы образуются на склонах крутизной более  $60^{\circ}$ . Чаще всего они наблюдаются в массивных или грубослоистых породах с высокой прочностью (известняках, доломитах, изверженных породах), разбитых тектоническими разломами и трещинами. Особенно благоприятные условия для образования обвалов создает наличие в бортах долины крупных тектонических нарушений и трещин бортового отпора, примерно совпадающих с направлением долины. После образования обвала на склоне остается ниша отрыва, а у его подножия скапливается обломочный материал. По объему обвалы принято подразделять на мелкие — до 10 тыс.  $m^3$ , средние — от 10 до 100 тыс.  $m^3$ , крупные — 100 тыс. — 1 млн.  $m^3$  и грандиозные — более 1 млн.  $m^3$ .

Оползневые смещения наблюдаются на более пологих склонах — крутизной до  $30^{\circ}$ , реже до  $45$ — $60^{\circ}$ . Оползни в скальных породах можно подразделить на два основных типа: консеквентные и инсеквентные, заметно различающиеся по механизму образования. К первому типу относятся оползни, поверхность которых совпадает с плоскостями напластования, а отчленение происходит по системе трещин, образующих в месте отрыва «устойчивую арку». Оползни такого типа наблюдаются в горных долинах Памира, Тянь-Шаня, Кавказа на участках, где последние врезаны в толщу слоистых осадочных пород. Примером могут служить оползни в долине р. Вахш, описанные А. В. Количко и В. Н. Филем [1976]. Они приурочены к участкам долины, где ее склоны сложены слоистыми толщами песчаников и алевролитов, падающих в сторону реки. Крупные оползни этого типа произошли весной 1969 г. на участках Нурукского (1 млн.  $m^3$ ) и Байпазинского (30 млн.  $m^3$ ) гидроузлов. Причиной образования этих оползней явилось обводнение пород, вызванное интенсивным таянием снега, выпавшего в особенно большом количестве в указанном году. Суммарный объем оползней в долине Вахша в 1969 г. составил 1—1,5 млрд.  $m^3$ .

Оползни инсеквентного типа имеют более широкое распространение и приурочены к породам разных типов — осадочным, метаморфическим, изверженным. Смещение происходит по системе трещин, падающих в сторону реки под разными углами. Поверхность смещения обычно захватывает ряд трещин, расположенных кулисообразно относительно друг друга, благодаря чему она приобретает ступенчатый характер. Оползни этого типа в долине р. Вахш тянутся почти сплошной полосой шириной 1—3 км вдоль ее левого борта [Количко, Филь, 1976]. Мощность оползней достигает здесь 200—300 м, а объем 50 млн.  $m^3$ . Большая часть оползней относится к средне- и верхнечетвертичному времени, но некоторые из них произошли, по-видимому,

в голоцене. Местами образование оползней этого типа продолжается и в настоящее время, хотя и в меньших размерах.

Причиной нарушения устойчивости склонов, подготовленных процессами разуплотнения и выветривания, часто являются землетрясения. Примером может служить обвал в ущелье Дарихауз (Памир), вызванный в 1949 г. Хайтским землетрясением ( $M=7,5$ , интенсивность до 10 баллов), подробно описанным В. П. Солоненко [1976]. Обвал произошел на крупном разломе, осложнившем правый склон ущелья. При землетрясении вдоль разлома произошел взброс с амплитудой 0,7—0,8 м. Изучение аэроснимков показало, что горные массы были смещены по разлому и подготовлены к обвалу задолго до землетрясения. При подземном толчке произошло обрушение окружающих ущелье горных склонов высотой 600—700 м. Отчленившиеся по тектоническим трещинам массивы двигались с трех сторон: два на встречу друг другу, а третий, сместившийся с наиболее высоких отметок и имевший наибольшую скорость, ударили им во фланг. Это привело к мгновенному раздроблению кристаллических пород на мелкие глыбы, которые в виде каменной лавины устремились вниз по ущелью. Перед каменной лавиной шла воздушная волна, вырывавшая деревья и отбрасывавшая их на сотни метров. Каменная лавина пронеслась через пос. Хайт, пересекла пойму и р. Ярхыч и выплеснулась на правый борт долины тремя языками. Наибольший путь обвала составил около 10,5 км. Уклон поверхности, по которому двигался обвал, изменился от  $23^{\circ}$  в верховьях ущелья до нескольких градусов на пойме р. Ярхыч. Скорость его составила 25—30 м/с, т. е. в несколько раз превышала скорость самых бурных водных потоков. Площадь обвальных накоплений составила 10,7  $km^2$ , мощность 12—17 м, объем — до 500 млн.  $m^3$ .

Крупные обвалы, вызываемые землетрясениями, часто перекрывают речные долины, создавая подпруженные озера. Так, в феврале 1911 г. при землетрясении интенсивностью 9 баллов в долине р. Мургаб на Памире произошел обвал объемом около 2,2 млн.  $m^3$ , создавший в реке завал высотой более 600 м, в связи с чем образовалось Сарезское озеро объемом около 19  $km^3$ . Образующиеся озера часто угрожают прорывом, что вызывает необходимость применения соответствующих защитных мероприятий (главным образом спуска воды).

## 2.7. Свойства массивов скальных пород

Массивы пород могут быть подразделены по механическим свойствам на три класса: а) сложенные скальными и полускальными породами; б) сложенные рыхлыми породами (сыпучими и связными) и в) сложного строения, сложенные породами обоих типов. Поскольку основанием высоких плотин и

других крупных гидротехнических сооружений служат в основном скальные и полускальные породы, остановимся на описании только массивов первого и в некоторой степени третьего типа. Согласно СНиП II-15—74, к скальным породам относят изверженные, метаморфические и сильно литифицированные осадочные породы с жесткими структурными связями (спаянные и сцепленные), залегающие в виде трещиноватого или монолитного массива. Кроме того, дополнительно выделяется группа полускальных, в которую входят породы со слабо выраженным или ослабленным (утраченным) связями. В качестве критерия для отделения этих пород от скальных используется значение временного сопротивления сжатию, равное 5 МПа: если значение  $R_c$  больше этой величины, породы относят к скальным, если меньше — к полускальным. В группу полускальных пород входят аргиллиты, слабые песчаники и алевролиты, некоторые разности мергелей, а также выветрелые скальные породы.

Кроме такого чисто инженерного подхода к классификации горных пород, в инженерной геологии широко используется также генетический принцип, согласно которому выделяются три основные группы пород: осадочные, метаморфические и магматические с дополнительным подразделением последних на вулканогенные (эффузивные) и интрузивные.

Механические, фильтрационные и иные свойства скальных горных пород зависят в большой степени от того, определены ли они в монолите или в массиве, т. е. в условиях естественного залегания пород со всеми присущими им нарушениями сплошности другими структурными особенностями. В небольшом образце (монолите) свойства породы определяются ее составом, формой и размером минеральных зерен, их ориентировкой и пространственным распределением (микрослоистостью — в осадочных породах, сланцеватостью — в метаморфических и плоскокаралльными структурами течения — в магматических), а также характером структурных связей. Определенную (в большинстве случаев подчиненную) роль играет микротрещиноватость. При переходе к более значительным объемам породы изучаемым в полевых условиях наряду с перечисленными выше факторами в формирование свойств пород включаются макрослоистость и макротрещиноватость, а при исследовании естественных оснований инженерных сооружений нередко также тектонические разрывы разных порядков. Одновременно происходит переранжировка факторов: те из них, которые оказывали определяющее воздействие на свойства пород в образце, например микрослоистость, при увеличении объема породы теряют свое значение, уступая ведущую роль другим, более могущественным факторам, например трещиноватости. В осадочных толщах с горизонтально-слоистой структурой большое влияние на свойства массива оказывает последовательность чередования

слоев разного состава, а в толщах пород, нарушенных складчатостью, — характер, размеры, форма и ориентировка складчатых дислокаций. Существенную роль в формировании свойств массива пород играют, наконец, подземные воды и физические поля, особенно поле напряжений. В этой главе рассматриваются общие, механические и фильтрационные свойства пород в массиве, т. е. с учетом влияния присущих им нарушений сплошности.

### 2.7.1. Общие свойства

К группе общих свойств относятся такие как неоднородность, пространственная изменчивость, анизотропность и масштабный эффект, поскольку они могут проявляться в любых свойствах пород — сжимаемости, прочности, водопроницаемости и др.

Неоднородность и пространственная изменчивость. При определении показателя какого-либо свойства породы по образцам, отобранным из одного, даже внешне вполне однородного слоя, всегда наблюдается некоторый разброс значений, зависящий как от неоднородности исследуемой породы, так и от вида выполняемого испытания, применяемой методики, аппаратуры и пр. Неоднородность формируется в течение всей «жизни» породы — от накопления осадка до ее разрушения в зоне гипергенеза. В процессе осадконакопления основное влияние на дифференциацию вещества, определяющего неоднородность, оказывают такие факторы, как непостоянство режима сноса материала, изменчивость фациальных условий среды осадконакопления и др. Последующее образование осадка, а затем породы, усиливает или ослабляет первичную неоднородность, вносит изменения в ее локальные и общие закономерности. При погружении пород в зону метаморфизма степень их неоднородности обычно уменьшается, а при выведении в зону гипергенеза, где интенсивно развиваются процессы разуплотнения и выветривания, заметно увеличивается. Большую роль в формировании неоднородности играет также тектогенез, приводящий к образованию складчатых и разрывных нарушений.

Сложность изучения неоднородности требует применения методов схематизации. Основу для такого подхода создают представления о «элементах неоднородности», развитые в работах М. В. Раца (1978). Под элементом неоднородности он предлагает понимать «наименьший объем породы, которые на данном уровне можно рассматривать как внутренне однородный в интересующем нас отношении и отличающийся в этом отношении от смежных с ним объемов». Достоинство такого подхода заключается в том, что он позволяет изучать неоднородность не во всей присущей ей сложности, а на том уровне, который отвечает содержанию поставленной задачи.

Влияние элементов неоднородности на поведение естественного основания сооружения, результаты эксперимента или развитие геологического процесса зависит в большой степени от соотношения между размером этих элементов (основанием сооружения, штампа, пробы и пр.) и области воздействия. Это соотношение определяет, в частности, выбор одной из двух теоретических моделей, которые положены в основу расчетных методов, применяемых в современной практике: модели дискретной и модели сплошной среды.

Модель дискретной среды основана на замене реального массива пород абстрактным представлением о среде, состоящей из твердых несжимаемых элементов правильной геометрической формы: шаров, многогранников, призм и т. п. Задаваясь теми или иными условиями передачи усилий от одного элемента к другому, получают различные законы распределения напряжений в таких дискретных средах. Эти законы и используются для составления расчетных схем распределения напряжений в реальных массивах пород. Модель дискретной среды легла в основу теоретических представлений механики горных пород.

В основу модели сплошной среды положена идея континуальности, позволяющая описывать все явления, происходящие в таких средах, непрерывными функциями. При описании модели используются положения теории упругости, пластичности, ползучести и др., для чего в нее вводятся некоторые дополнительные допущения о свойствах среды, например о линейной зависимости между напряжением и деформациями. Модель сплошной среды легла в основу теоретических представлений механики грунтов.

Для установления границ применимости этих двух моделей используются различные формулы, рассмотренные в книге С. Б. Ухова [1975]. Чаще всего для этой цели используют формулу Ф. С. Ясинского

$$k = 100 \sqrt{\frac{a}{L}}, \quad (2.6)$$

где  $L$  — характерный размер элементарной площадки, для которой вычисляются напряжения;  $a$  — характерный размер элемента, слагающего тело;  $k$  — возможное отклонение рассчитанного напряжения от среднего его значения в долях единицы.

Если принять допустимую для расчета деформаций сжатия точность в 20 %, то согласно (2.6) для применения формул, основанных на модели сплошного тела (в частности, формул либо деформируемого пространства), размер площадки должен быть в 25 раз больше размеров структурных элементов. По данным других исследований, критическое значение  $k$  изменяется от 4—5 [Роза, Зелинский, 1967] до 20 [Прочухан, Фрид, Доманский, 1971]. Если исходить из этих положений, то примени-

тельно к основаниям плотин и других больших гидroteхнических сооружений целесообразно выделить три класса неоднородности.

1. Мезонеоднородность с величиной элементов на один-два порядка меньше размеров области воздействия сооружения. Это блочность, обусловленная наличием мелких и средних трещин (см. раздел 2.2.2.1). Наличие таких элементов неоднородности не является препятствием для использования при расчетах модели сплошной среды.

2. Макронеоднородность с величиной элементов неоднородности, соизмеримой с размером сооружений (или отдельных секций). Применительно к основаниям гидroteхнических сооружений — это блочность, связанная с крупными и очень крупными трещинами и другими структурными элементами того же порядка. Использование модели сплошной среды может повлечь за собой значительные погрешности.

3. Меганеоднородность с величиной элементов неоднородности, превышающей размер области воздействия. Применительно к основаниям гидroteхнических сооружений — это неоднородности, связанные с крупными тектоническими блоками и разделяющими их разломами. Меганеоднородность позволяет возводить сооружение в пределах одного структурного блока.

Если образцы отбираются по профилю значительной протяженности, то на фоне внешне беспорядочного разброса значений показателей свойств пород нередко проявляется некоторая общая пространственная закономерность изменения этих показателей (в заданном направлении, плоскости, объеме). Закономерные изменения свойств пород в координатах пространства получили название *пространственной изменчивости*. В массиве она зависит в большой степени от нарушений сплошности пород, и в первую очередь от трещиноватости.

Поскольку свойства пород оцениваются статистическими параметрами распределений характеризующих эти свойства количественных показателей (математическим ожиданием и дисперсией), пространственная изменчивость проявляется в изменении этих двух параметров (или одного из них). В практических приложениях особенно большое значение имеет изменение первого из них.

По характеру изменчивости все геологические объекты можно подразделить на две группы: а) объекты, пространственная изменчивость которых не выражена или может не приниматься во внимание (математическое ожидание и дисперсия практически постоянны); б) объекты, пространственная изменчивость которых выражена четко и должна приниматься во внимание при построении структурно-механических моделей и выборе расчетных показателей свойств пород (математическое ожидание и дисперсия или один из этих параметров является функцией координат пространства).

Для характеристики пространственной изменчивости можно пользоваться также терминами «стационарный и нестационарный режим изменчивости», предложенными Г. К. Бондариком [1971].

В толщах осадочных пород пространственная изменчивость формируется под влиянием двух групп процессов: а) осадконакопления и литогенеза и б) разуплотнения и выветривания пород в зоне гипергенеза. С первой группой процессов связано проявление изменчивости по напластованию и нормально к нему. Первую называют соответственно *латеральной изменчивостью*, а вторую не совсем верно — временной. Со второй группой процессов связано формирование *вторичной*, или *наложенной*, изменчивости, направленной в основном нормально к поверхности земли — водоразделам, склонам речной долины и пр. Накладываясь на первичную изменчивость, она существенно усложняет общую картину изменения свойств пород в пространстве.

В массивах магматических пород первичная изменчивость связана главным образом с процессами дифференциации магмы и ее остывания, вторичная, как и в осадочных породах, — с процессами разуплотнения и выветривания.

**Анизотропия.** Многие свойства пород — сжимаемость, соотивление сдвигу, водопроницаемость — зависят в большой степени от направления действия силы, движения потока грунтовых вод и пр. Свойство пород различно реагировать на воздействие в разных направлениях носит название *анизотропии*.

Проявление анизотропии связано с влиянием различных структурных элементов и в большой степени зависит от соотношения между размерами структурных элементов и области воздействия. В образце она определяется в основном наличием игольчатых и пластинчатых минералов, ориентированных определенным образом и придающих породе микрослоистость, в более крупных объемах пород, изучаемых при полевых экспериментах, — слоистостью (в осадочных породах), сланцеватостью (в метаморфических), структурами течения (в магматических) и в большой степени трещиноватостью и, наконец, в объемах, соизмеримых с сооружением или отдельными его секциями, — также ориентированкой тектонических нарушений.

На формировании анизотропии оказывается также поле напряжений (в первую очередь ориентировка осей эллипсоида напряжений). Влияние это может быть прямым и косвенным. Прямое проявляется в том, что свойства породы, находящейся в напряженном состоянии (сжатия или растяжения), могут заметно изменяться, а косвенное — в раскрытии или, наоборот, в обжатии существующих трещин.

Для получения более полного представления об анизотропии породы по тому или иному свойству прибегают к построе-

нию эллипсоида вращения. Три оси эллипса покажут направления, которым отвечают максимальное, минимальное и промежуточное значение показателя. Чем сильнее вытянут эллипсоид, тем сильнее выражена анизотропия. Для количественной оценки анизотропии используют показатель, или *коэффициент анизотропии*:

$$K_a = \frac{R_1}{R_2}, \quad (2.7)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  соответственно максимальное и минимальное значение показателя.

У многих типов пород все три оси эллипса имеют разную величину. Такой случай отвечает *ортогональной* анизотропии. Типичным примером может служить порода, разбитая на блоки тремя системами трещин, различающихся по длине, ширине, морфологии поверхности стенок, характеру заполнителя и пр. Поэтому механические, фильтрационные или другие свойства такой породы следует описывать соответственно тремя значениями модуля общей деформации, прочностных характеристик, коэффициента фильтрации и пр. Широко распространен и другой тип пород, у которых в одной из плоскостей показатель сохраняет постоянное значение (плоскость изотропии) независимо от направления, а в перпендикулярном направлении имеет другое значение. Такая анизотропия называется *трансверсальной*. Она характерна для пород с ярковыраженной слоистостью (аргиллиты) или сланцеватостью (сланцы, гнейсы).

Анизотропия проявляется в различных свойствах пород, и можно соответственно выделять анизотропию по деформационным, прочностным, фильтрационным и другим свойствам. Анизотропия по деформационным свойствам должна учитываться при расчете оснований плотин по деформациям и обделке гидротехнических туннелей. Коэффициент анизотропии по модулю деформации изменяется в слоистых и сланцеватых породах от 1,2 до 2, но в некоторых случаях достигает 3. Примером могут служить слоистые известняки с прослоями мергелей и глин в примыканиях плотины Чиркейской ГЭС (см. раздел 4.3.1.3), где исследования деформационных свойств были выполнены с помощью металлических штампов диаметром 0,8 м. Были получены следующие значения модуля общей деформации: параллельно напластованию 31 500 МПа, нормально напластованию 11 500 МПа, что отвечает коэффициенту анизотропии 2,8 [Варга, 1979]. Еще более высокие значения может иметь коэффициент анизотропии по прочностным характеристикам.

Большое практическое значение имеет фильтрационная анизотропия, поскольку поток грунтовых вод, формирующийся при создании водохранилища, всегда направлен под определенным углом к основным направлениям разломов и трещин. Поэтому

при расчетах потерю на фильтрацию, притоков в дренажные устройства следует использовать векторные значения коэффициентов фильтрации, отвечающие определенному направлению потока грунтовых вод.

Кроме структурной анизотропии, Г. К. Бондарик [1971] выделил также пространственный вид анизотропии, так как он связан с различиями в изменении свойств пород по разным направлениям. Для характеристики этого вида анизотропии он рекомендует использовать модуль изотропности, вычисляемый по выражению

$$G(R) = \frac{A_x}{A_y}, \quad (2.8)$$

где  $G(R)$  — модуль изотропности породы по параметру  $R$ ;  $A_x$  и  $A_y$  — какие-либо характеристики изменчивости этого показателя параметра соответственно по направлениям  $x$  и  $y$  (градиенты, радиусы автокорреляции и др.).

**Масштабный эффект.** Под масштабным эффектом принято понимать изменение прочностных и деформационных свойств пород в зависимости от величины области воздействия (размеров образца, объема породы, вовлекаемой в полевое испытание, и пр.). С. Б. Ухов отмечает следующую закономерность: при малых размерах образцов (3—7 см) увеличение их размеров сказывается на результатах испытаний неоднозначно: в одних случаях оно приводит к ослаблению прочностных свойств пород, в других — наоборот, к их повышению. При большем размере образцов тенденция, связанная с увеличением размера образцов, выражена более четко и проявляется, как правило, в снижении прочностных характеристик. Эти несколько противоречивые факты объясняет гипотеза о двух масштабных эффектах, предложенная М. И. Коффманом. Сущность ее сводится к тому, что разные дефекты структуры образца — внутренние и особенно внешние — существенно сказываются на его прочности, заметно ее снижая. Очевидно, что вероятность таких дефектов тем выше, чем больше размер образца. Это приводит к тому, что большие образцы обладают в среднем более низкими прочностными свойствами, чем малые. Однако на прочности сказываются также дефекты, возникающие на поверхности образцов при их изготовлении, и при равной величине образцов влияние дефектов на результаты испытаний малых образцов будет более заметным, чем больших.

В практических приложениях наибольшее значение имеет отмеченная тенденция уменьшения прочности (а следовательно увеличения сжимаемости) породы с увеличением области эксперимента. Однако распространять эту тенденцию на весь массив пород, вовлекаемый во взаимодействие с сооружением, было бы неправильным, так как, во-первых, он «работает» в условиях невозможности или большой ограниченности тангенци-

альных или иных перемещений, а, во-вторых, при увеличении объема породы во взаимодействие вовлекаются все более глубокие, монолитные и прочные части массива.

### 2.7.2. Механические свойства

Рассмотрим две наиболее важные группы свойств: прочностные и деформационные.

**Прочностные свойства.** Прочность скальных и полукальных пород в монолите во много раз превышает величину тех напряжений, которые возникают в массиве пород при передаче на них нагрузок от плотин и других сооружений, а также гидростатического давления от водохранилища. Поэтому главную опасность для устойчивости естественного основания сооружений создают различные ослабленные поверхности — сопряжение между плотиной и скальным основанием, трещины, разломы и пр.

Для оценки прочности пород используются две группы показателей: а) временное сопротивление одноосному сжатию  $R_c$  и растяжению  $R_p$  и б) показатели сопротивления сдвигу —  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$ . Первая группа показателей применяется главным образом для расчленения массива на отдельные структурные элементы, оценки однородности выделенных элементов, выявления ослабленных зон и, наконец, для предварительной оценки прочности скального основания.

Согласно СНиП II-15—74 все породы по величине  $R_c$  делятся на следующие группы:

|                             |                    |
|-----------------------------|--------------------|
| очень прочные . . . . .     | $R_c > 1200$ МПа   |
| прочные . . . . .           | $1200 > R_c > 500$ |
| средней прочности . . . . . | $500 > R_c > 150$  |
| малопрочные . . . . .       | $150 > R_c > 50$   |

Породы, имеющие более низкие значения  $R_c$  относят к полукальным. Значения  $R_c$  для некоторых типов пород приведены в табл. 2.3.

Значения временного сопротивления сжатию  $R_c$  используются также для определения коэффициента размягчаемости  $k_{\text{разм}}$ , который представляет собой отношение значений определенных пород в водонасыщенном  $R_c^{\text{вл}}$  и воздушно-сухом состоянии  $R_c^{\text{в. с.}}$ .

$$k_{\text{разм}} = \frac{R_c^{\text{вл}}}{R_c^{\text{в. с.}}} \quad (2.9)$$

По этой величине все породы делятся на две группы (СНиП II-15—74): неразмягчаемые —  $k_{\text{разм}} > 0,75$  и размягчаемые —  $k_{\text{разм}} < 0,75$ . Подавляющее большинство пород относится

Таблица 2.3

Средние значения временного сопротивления сжатию для некоторых типов скальных пород

| Породы основания  | Плотина                            | Временное сопротивление сжатию |                       |
|-------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
|                   |                                    | сухой породы                   | водонасыщенной породы |
| Габбро            | Бухтарминская, Усть-Каменогорская  | 1100—1910                      | 1250                  |
| Диабазы           | Братская, Вилуйская, Усть-Илимская | 1500—1820                      | —                     |
| Диориты           | Верхне-Туломская                   | 1540                           | 1390                  |
| Гранодиориты      | То же                              | 1780                           | 1500                  |
| Граниты           | Днепродзержинская, Красноярская    | 890—1140                       | 860—1080              |
| Гранитогнейсы     | Днепродзержинская                  | —                              | 790<br>420            |
| Гнейсы            | "                                  | 550—1800                       | 460—1590              |
| Анdezito-базальты | Гюмушская                          | 1260—1390                      | 840—1110              |
| Туфы              | Намахванская                       | 850—1770                       | —                     |
| Известняки        | Чиркейская, Чарвакская             | —                              | —                     |

к первой группе и только немногие (главным образом выветренные и полускальные) — ко второй.

Временное сопротивление пород растяжению  $R_p$  также используется для расчленения массива пород на элементы и для предварительной оценки прочности пород.

Для оценки устойчивости массива по ослабленным поверхностям используются показатели сопротивления сдвигу:  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$ . По аналогии с рыхлыми породами их называют коэффициентом внутреннего трения и сцеплением (или удельным сцеплением), но они не имеют строго физического смысла и должны рассматриваться как параметры линейной аппроксимации зависимости сдвигающего усилия  $\tau$  от нормального давления  $P$ .

Значения параметров сопротивления сдвигу для различных типов осадочных, метаморфических и магматических пород, определенные с помощью полевых методов (сдвиг прибетонированных штампов или целиков) при изысканиях, приведены в табл. 2.4. Из имеющихся цифр видно, что значения параметров сдвига зависят не столько от типа и состава пород, сколько от степени их нарушенности. Наиболее низкими значениями  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$  характеризуются породы из зон тектонических нарушений.

Деформационные свойства. К основным показателям деформационных свойств скальных пород относятся: модуль упругости  $E$ , модуль общей деформации  $E_o$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ .

Таблица 2.4

Показатели предельного сопротивления сдвига бетонных штампов и скальных целиков.  
По Ю. А. Фишману [1976]

| Породы основания                     | Плотина            | Показатели сопротивления сдвига                |                     |
|--------------------------------------|--------------------|--|---------------------|
|                                      |                    | коэффициент трения $\operatorname{tg} \varphi$ | сцепление $c$ , МПа |
| Диабазы сохранные                    | Братская           | 1,60   | 0,50                |
| диабазы трещиноватые                 | "                  | 0,64   | 0,14                |
| диабазы                              | Усть-Илимская      | 1,00   | 0,81                |
| диориты                              | Зейская            | 1,65   | 1,45                |
| граниты сохранные                    | Красноярская       | 1,80   | 1,40                |
| граниты в зоне дробления             | Днестровская       | 1,26   | 0,40                |
| гнейсты                              | "                  | 1,40   | 0,80                |
| гнейсы сохранные                     | Константиновская   | 1,25   | 0,50                |
| гнейсы трещиноватые                  | Наглу (Афганистан) | 1,71   | 1,25                |
| гнейсы в тектонической зоне          | То же              | 0,70   | 0,85                |
| порфириты                            | Крапивинская       | 1,10   | 2,00                |
| ортосланцы                           | Саяно-Шушенская    | 1,42   | 2,55                |
| парасланцы                           | "                  | 1,20   | 2,50                |
| сланцы хлоритовые, слаботрещиноватые | Андижанская        | 1,00   | 2,20                |
| песчаники                            | Кировская          | 1,70   | 2,00                |
| сланцы метаморфические               | "                  | 1,10   | 1,56                |
| песчаники                            | Курской            | 1,54   | 0,50                |

Модуль упругости  $E$  представляет собой коэффициент пропорциональности между продольным (сжимающим или растягивающим) напряжением и относительной деформацией для интервала  $s=f(\sigma)$ , где  $s$  — деформация;  $\sigma$  — нормальное напряжение, в пределах которого порода ведет себя как упругое тело. Величина модуля упругости определяется главным образом лабораторным путем на монолитах или с помощью сейсмоакустических методов. Опыт показывает, что величина  $E$  при сжатии обычно в 1,5—4 раза больше, чем при растяжении.

Все скальные породы по величине модуля упругости (в тыс. МПа) делятся на следующие группы:

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| слабые скальные . . . . . | 3—7   |
| нормальные . . . . .      | 7—15  |
| жесткие . . . . .         | 15—30 |
| очень жесткие . . . . .   | >30   |

Таблица 2.5

Классификация пород по деформируемости

| Степень деформируемости    | Модуль общей деформации<br>$E_0 \cdot 10^2$ МПа |
|----------------------------|---|
| <b>Полускальные породы</b> |   |
| Сильнодеформируемые        | Менее 10  |
| Слабодеформируемые         | 10—20   |
| <b>Скальные породы</b>     |   |
| Сильнодеформируемые        | 20—50   |
| Среднедеформируемые        | 50—100  |
| Слабодеформируемые         | 100   |

Таблица 2.6

Модули общей деформации оснований высоких бетонных плотин, полученные по данным полевых испытаний. По Ю. А. Фишману [1976]

| Плотина  | Тип плотины    | Максимальная высота, м | Порода основания       | Значение модуля общей деформации<br>$E_0 \cdot 10^{-2}$ МПа |         |              |
|--|----------------|------------------------|------------------------|---|---------|--------------|
|  |                |                        |                        | минимальное   | среднее | максимальное |
| Братская<br>Красноярская<br>Могилев-Подольская       | Гравитационная | 126                    | Диабазы                | 130   | 320     | 500          |
|  |                | 120                    | Граниты                | 300   | 500     | 800          |
|  | "              | 62                     | Граниты                | 40  | 170     | 300          |
|  |                |                        | Алевролиты             | 2   | 5       | 10           |
| Усть-Илимская<br>Зейская<br>Богучанская<br>Намахвани | Контрфорсная   | 105                    | Аргиллиты              | 50  | 150     | 250          |
|  |                | 110                    | Диабазы                | 30  | 130     | 210          |
|  | Арочная        | 86                     | Диориты                | —   | 180     | —            |
|  |                | 170                    | Долериты               | 30  | 70      | 130          |
| Саяно-Шушенская<br>Андижанская<br>Миатлинская        | Гравитационная | 242                    | Туфобрекчии            | 50  | 150     | 250          |
|  |                |                        | Туфопесчаники          | 30  | 70      | 130          |
|  | Контрфорсная   | 122                    | Кристаллические сланцы | 120   | 280     | 440          |
|  |                |                        | Хлоритовые сланцы      | 20  | 50      | 80           |
| Курпсайская  | Арочная        | 80                     | Песчаники и известняки | 40  | 70      | 100          |
|  | Гравитационная | 112                    | Песчаники и аргиллиты  | 20  | 40      | 60           |

Коэффициент Пуассона  $\mu$  представляет собой коэффициент пропорциональности между поперечной и продольной деформациями и является величиной безразмерной. В разных скальных породах его величина изменяется от 0,3 до 0,45. При отсутствии данных специальных измерений он принимается равным 0,3.

Модуль общей деформации  $E_0$  отличается от модуля упругости тем, что при его вычислении учитывается не только обратимая (упругая), но и необратимая (пластическая) деформация, связанная главным образом с закрытием трещин. По этой причине модуль общей деформации всегда заметно ниже модуля упругости. Модуль общей деформации используется для расчета оснований плотин и других гидroteхнических сооружений по деформациям.

Классификация пород по деформируемости согласно СНиП II-16-76 приведена в табл. 2.5.

Значения модуля деформации разных типов пород, полученные в результате полевых опытных работ, приведены в табл. 2.6.

### 2.7.3. Фильтрационные свойства

Фильтрационные свойства скальных пород в массиве определяются главным образом их трещиноватостью, составом и свойствами заполнителя трещин, поскольку сами породы в большинстве случаев практически водонепроницаемы. Исключение составляют немногие разности известняков, слабосцементированных песчаников и эфузивов, обладающие открытой пористостью.

В верхней части разреза до глубины 50—150 м трещины, как правило, связаны между собой в единую гидравлическую систему, ниже этой глубины водоносными обычно бывают только отдельные разобщенные открытые трещины. Водопроницаемость трещин зависит от степени их раскрытия и свойств заполняющего их материала. Приближенные значения коэффициентов фильтрации заполнителя разного состава приведены в табл. 2.7.

Поскольку определение значения коэффициента фильтрации в трещиноватых скальных породах связано с некоторыми трудностями, для сравнительной характеристики их водопроницаемости используется также удельное водопоглощение  $q$  (в л/мин). Согласно СНиП II-16-76, породы по степени водопроницаемости подразделяются так, как это показано в табл. 2.8.

Водопроницаемость скальных массивов, прорезанных на большую глубину долиной реки, обычно изменяется в двух направлениях: сверху вниз и от склонов долины реки в глубь водоразделов. Наибольшей водопроницаемостью характеризуются голоценовые коры выветривания, особенно если они сформировались в условиях холодного или, наоборот, жаркого засушливого климата, где глинистые продукты выветривания почти не

Таблица 2.7

Приближенные значения коэффициента фильтрации заполнителя трещин разного состава.  
По Н. Б. Ивановой

| Заполнитель                                       | Диапазон возможных значений коэффициента фильтрации, м/сут | Заполнитель  | Диапазон возможных значений коэффициента фильтрации, м/сут |
|---|--|--|--|
| Песок дресвянистый с глыбами                      | 10—20  | Супесь с дресвой и щебнем                            | 0,5—3,5  |
| Дресвяно-щебенистый грунт с песчаным заполнителем | 10—20  | Дресвяно-щебенистый грунт с супесчанным заполнителем | 1—10   |
| Песок средней крупности                           | 5—15   | Суглинок дресвянистый                                | 0,01—0,1   |
| Песок мелкий                                      | 0,5—5  | Глинка трения  | 0,001—0,01   |

Таблица 2.8

Классификация пород по водопроницаемости

| Степень водопроницаемости     | Удельное водопоглощение $q$ , л/мин |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Практически водонепроницаемые | <0,01                               |
| Слабоводопроницаемые          | 0,01—0,1                            |
| Водопроницаемые               | 0,01—1                              |
| Сильноводопроницаемые         | 1—10                                |
| Очень сильно водопроницаемые  | >10                                 |

образуются. В древних корах выветривания, сформировавшихся в условиях жаркого и влажного тропического климата, картина распределения водопроницаемости обычно более сложная. Сверху часто выделяется зона с высокими фильтрационными характеристиками, ниже, где трещины заполнены глинистыми продуктами выветривания, водопроницаемость резко падает, а еще ниже вновь увеличивается. Такая закономерность выявилаась, например, при изучении основания Ириклинской ГЭС на р. Урал, сложенного порfirитовыми туфами (см. раздел 4.3.3). Здесь были выявлены три характерные зоны: верхняя, мощностью около 10 м, с удельным водопоглощением от 0,3 — до 30 л/мин; средняя, мощностью 6—10 м, с водопоглощением порядка десятых и сотых долей литра в минуту и нижняя, мощностью до 7 м, где водопоглощение достигало 50 л/мин. Аналогичная

картина наблюдалась на гидроузлах Разданского каскада, возведенных на андезито-базальтах. Ниже коры выветривания водопроницаемость пород с глубиной постепенно снижается, причем мощность зоны повышенной водопроницаемости и интенсивность снижения фильтрационных характеристик зависят от состава пород, глубины эрозионного вреза, характера и степени трещиноватости пород, наличия тектонических нарушений и пр. Водопроницаемость карбонатных пород зависит от степени их закарстованности, а также от наличия и характера заполнителя карстовых пустот. Так, в створе Каюковской ГЭС были встречены отдельные прослои кавернозных известняков с коэффициентами фильтрации до 500—800 м/сут, а в одном случае даже до 1100 м/сут. На Павловской ГЭС, где известняки также были закарстованы, но трещины в основном заполнены глинистыми продуктами выветривания, значения коэффициентов фильтрации оказались значительно более низкими и только в самой верхней части толщи (3—5 м) достигали 60 м/сут. На глубине 30—40 м они снижались до 1 м/сут. При отсутствии закарстованности водопроницаемость известняков даже при наличии тектонических нарушений обычно невысокая. Примером может служить Ингуринская ГЭС, где на правом берегу, нарушенном сбросом, значения коэффициента фильтрации до глубины 75 м находились в пределах 1,5—1,8 м/сут, а ниже снижались до 0,1 м/сут. Резкое повышение водопроницаемости было отмечено только непосредственно в зоне разлома.

Водопроницаемость терригенных пород очень непостоянна и зависит от состава пород, характера и степени их цементации. Так, в основании плотины Новосибирской ГЭС, сложенном прочными метаморфизованными терригенными породами (песчаниками, алевролитами), удельное водопоглощение даже в верхней зоне не превышало нескольких метров в минуту и уже на глубине 30 м снизилось до тысячных долей метра в минуту. В пределах распространения слабоуплотненных и слабосцементированных молассовых отложений показатели водопроницаемости обычно значительно выше. Так, на Мингечаурской ГЭС водопроницаемость некоторых пачек песчаников характеризовалась значениями удельного водопоглощения до 70—80 л/мин.

Метаморфическим породам свойственна довольно пестрая водопроницаемость. Так, на участке строительства ГЭС Наглу, возведенной на гнейсах, значения коэффициентов фильтрации в верхней трещиноватой зоне изменялись от 2 до 50 м/сут, возрастаая в зонах тектонических нарушений до 160 м/сут. Весьма изменчивы по водопроницаемости эффузивы. В андезито-базальтах водопроницаемость определяется в значительной степени характером отдельности. Максимальная водопроницаемость была отмечена в базальтах со столбчатой отдельностью, где  $K_f$  местами превышал 100 м/сут. В прочих разностях  $K_f$  изменялся до долей метра в сутки до 5—10 м/сут. Потоки или покровы

эфузивов часто переслаиваются пирокластическим материалом и осадочными образованиями разного состава, в том числе песками и галечниками, которые могут обладать очень большой водопроницаемостью. Кроме того, в самих эфузивах на контакте с такими толщами резко повышается водопроницаемость за счет увеличения трещиноватости. Так, при исследовании чаши водохранилища Ереванской ГЭС были отмечены участки, где водопроницаемость эфузивов, переслаивающихся с галечниками, оценивалась коэффициентами фильтрации выше 6600 м<sup>3</sup>/сут.

Глубинные интрузивные породы характеризуются наименьшей среди скальных пород водопроницаемостью: удельное водопоглощение их редко превышает 10 л/мин, а коэффициент фильтрации измеряется метрами или долями метра в сутки. К слабопроницаемым породам относятся также диабазы (траппы), в которых коэффициент фильтрации обычно колеблется в пределах 0,05—10 м/сут. Заметное повышение водопроницаемости отмечается только в краевых частях интрузий.

Методы исследования и оценки водопроницаемости изложены в разделе 6.3.2.2.

## ГЛАВА 3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

### 3.1. Общие положения

С начала строительства природная система, включавшая массив горных пород и окружающую среду, существенно усложняется включением в нее дополнительной подсистемы — комплекса инженерных сооружений, что превращает ее в *природно-техногенную систему* (рис. 3.1). Характеристики этой системы непрерывно изменяются в процессе строительства — от подготовительных работ к возведению основных сооружений, заполнению водохранилища и, наконец, к эксплуатации всего комплекса сооружений. Соответственно изменяются структура взаимодействия между отдельными элементами системы и характер вызываемых ими процессов. Мы рассмотрим здесь только *инженерно-геологические* процессы, которые развиваются в массиве горных пород, имеют геологическую природу и могут служить предметом исследований специалистов по инженерной геологии.

Взаимодействие инженерных сооружений и массива горных пород проявляется в различных формах, охватывая некоторую часть массива горных пород, называемую областью взаимодействия инженерного сооружения и массива горных пород, или более коротко — *техногенной областью взаимодействия*. Она накладывается на естественную область взаимодействия, существенно усложняя ее структуру.

Формирование техногенной области взаимодействия начинается с момента освоения строительной площадки — строительства дорог, подсобных сооружений, заложения строительных выемок и котлованов. Подрезка склонов речной долины, удаление почвенно-растительного слоя и значительных объемов выветрелой и разрушенной породы, применение искусственного водонижения и водоотлива приводят к существенному изменению всей инженерно-геологической обстановки на участке строительства, включая параметры и структуру физических полей, гидрогеологические условия и пр. Эти изменения вызывают в свою очередь развитие различных инженерно-геологических процессов, к важнейшим из которых относятся:

- разуплотнение пород в дне и откосах выемок и котлованов;
- активизация процессов выветривания;
- развитие суффозионных явлений;

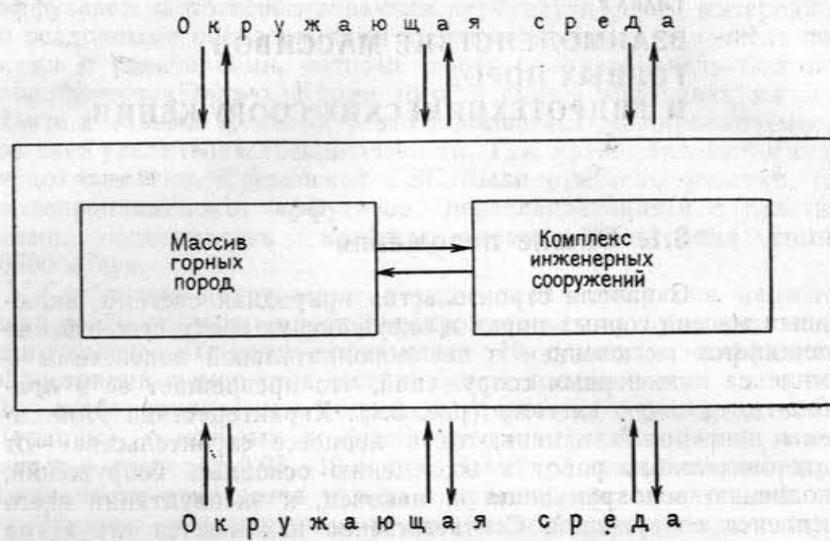


Рис. 3.1. Природно-техногенная система, формирующаяся при строительстве инженерных сооружений

г) нарушение устойчивости естественных и искусственных откосов.

В зоне мерзлых пород большое значение имеют также изменения параметров и структуры теплового поля, что может привести к вытаиванию льда или оттаиванию заполнителя в разломах и трещинах, снижению прочности пород и нарушению устойчивости естественных и искусственных откосов и склонов. Схема строения зоны взаимодействия для начального этапа строительства приведена на рис. 3.2.

Строительство и пуск в эксплуатацию основных сооружений, заполнение водохранилища вносят дальнейшие изменения в строение зоны взаимодействия. В верхнем бьефе заполнение водохранилища вызывает подъем уровня грунтовых вод в обоих бортах водохранилища и насыщение водой части зоны аэрации. В дальнейшем периодические колебания уровня воды в водохранилище при его сработках и заполнении приводят к образованию зоны переменного увлажнения, в пределах которой наблюдается многократная смена водонасыщения пород их осушением, уплотняющих напряжений — взвешивающими. Следствием этого является интенсивное развитие процессов разуплотнения и выветривания пород и существенное изменение их свойств, в том числе снижение прочности, что приводит к интенсивному развитию в этой зоне оползневых и обвальных явлений различного масштаба. Передача давления от веса воды, заполняющей водохранилище, на его скальное основание вызывает общий прогиб дна водохранилища, распространяющийся

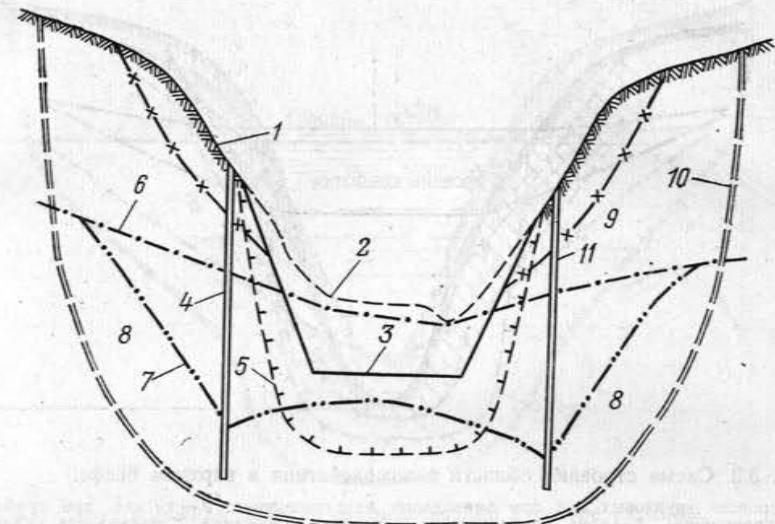


Рис. 3.2. Схема строения области взаимодействия строительного котлована и массива горных пород. По Л. А. Молокову.

1 — поверхность земли; 2 — то же, до выемки котлована; 3 — контур котлована; 4 — водопонижающая скважина; 5 — граница техногенной зоны разуплотнения; 6 — уровень грунтовых вод в склонах долины до выемки котлована; 7 — то же, после водопонижения; 8 — участки массива, в пределах которых возможны фильтрационные деформации; 9 — границы зоны с ослабленной устойчивостью склонов; 10 — условная граница зоны взаимодействия; 11 — водопонижающие скважины

и на участок расположения основных сооружений, а в сейсмически активных районах нередко сопровождается возникновением «наведенных» землетрясений. Схема строения зоны взаимодействия для участка верхнего бьефа, непосредственно прилегающего к створу плотины, приведена на рис. 3.3.

В створе плотины развитие инженерно-геологических процессов вызывается в основном давлением, передаваемым на основание весом строящейся плотины, а позднее также давлением воды со стороны заполняемого водохранилища. Это приводит к возникновению в массиве значительных по величине сжимающих, тангенциальных и растягивающих напряжений, которые могут явиться причиной развития различных деформаций. Нормальные сжимающие напряжения приводят к осадке естественного основания и выстроенных на нем сооружений, растягивающие — могут повлечь за собой образование трещин и нарушить целостность не только естественного основания, но и заложенных в него противофильтрационных сооружений, тангенциальные — вызвать сдвиг плотины по контакту бетон—скама или имеющимся в основании плотины разрывам сплошности.

Определенную опасность представляют также процессы, связанные с образованием постоянного фильтрационного потока из

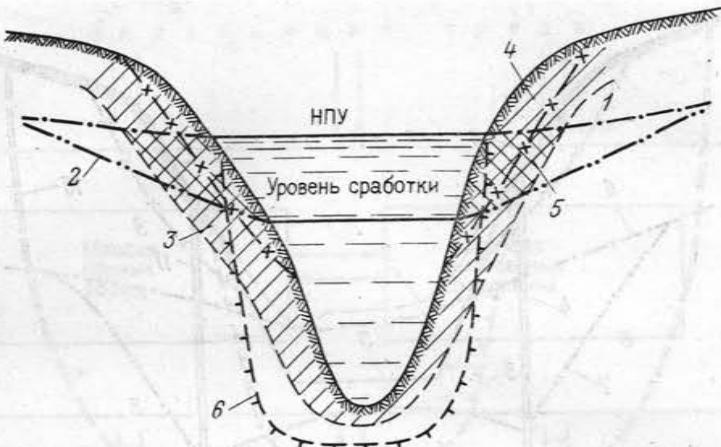


Рис. 3.3. Схема строения области взаимодействия в верхнем бьефе.

1 — уровень грунтовых вод при заполнении водохранилища; 2 — то же, при сработке водохранилища; 3 — зона разуплотнения; 4 — зона снижения устойчивости склонов; 5 — интервал периодического осушения зоны разуплотнения; 6 — контур приложения нагрузки от веса воды

верхнего бьефа в нижний, характеризующегося высокими гидравлическими градиентами. При недостаточно эффективной работе противофильтрационных и дренирующих устройств это может привести к развитию подземной эрозии и суффозионных процессов в трещинах и полостях и значительно увеличить общие потери на фильтрацию. В зоне распространения мерзлых толщ аналогичные последствия может вызвать вытаивание мерзлого заполнителя и льда из трещин горных пород под отепляющим влиянием фильтрационного потока. Схема строения области взаимодействия в створе напорных сооружений приведена на рис. 3.4.

Наконец, в нижнем бьефе развитие инженерно-геологических процессов связано главным образом с проявлением фильтрационных сил и гидростатического взвешивания, которые могут вызвать не только вымывание заполнителя из трещин, но и нарушение устойчивости береговых склонов. Особенно опасны в этом отношении места выхода фильтрационного потока на дневную поверхность, где гидравлические градиенты достигают максимальной величины.

Схема строения зоны взаимодействия в нижнем бьефе приведена на рис. 3.5.

Классификация инженерно-геологических процессов, развивающихся при строительстве плотин и других гидротехнических сооружений, показана на рис. 3.6.

В состав строящихся гидроузлов входят также подземные сооружения разного назначения: деривационные и отводящие

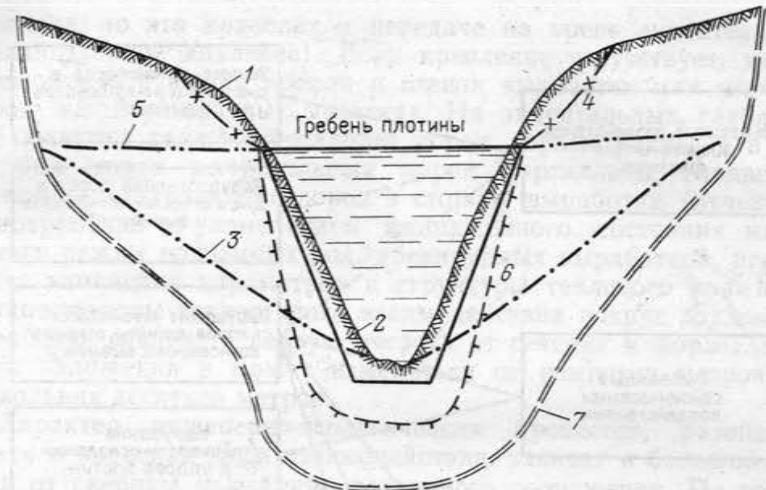


Рис. 3.4. Схема строения области взаимодействия в створе плотины.

1 — поверхность земли до возведения плотины; 2 — контур плотины; 3 — уровень подземных вод до начала строительства; 4 — граница зоны снижения устойчивости пород; 5 — уровень грунтовых вод после наполнения водохранилища; 6 — граница зоны развития уплотняющих и сдвигающих напряжений; 7 — границы области взаимодействия сооружения и массива горных пород

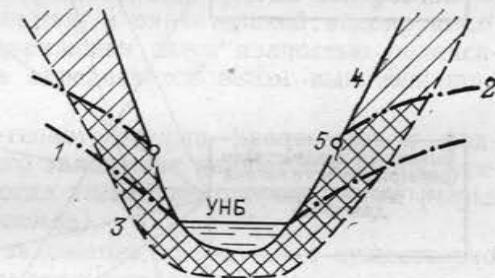


Рис. 3.5. Схема строения зоны взаимодействия в нижнем бьефе.

1 — уровень грунтовых вод до строительства плотины; 2 — то же, после строительства; 3 — зона возможных фильтрационных деформаций; 4 — зона разуплотнения пород; 5 — выходы на поверхность грунтовых вод

туннели, напорные водоводы, камеры для машинных залов и трансформаторных подстанций, строительные и транспортные туннели, строительные шахты и пр. Современные подземные сооружения имеют нередко значительные размеры. Например, подземный машинный зал Ингуринской ГЭС имеет длину 120 м, ширину 25 м и высоту 40 м. Создание полостей больших размеров приводит к нарушению равновесия массива пород, сложившегося в результате внутренних и внешних взаимодействий. Нарушение проявляется в первую очередь в перестройке напряженного состояния толщи пород вокруг выработки, что вызывает развитие упругих, упругопластичных и вязкопластичных деформаций и сопровождается смещением контура выработки в сторону выработанного пространства. Если выработка за-

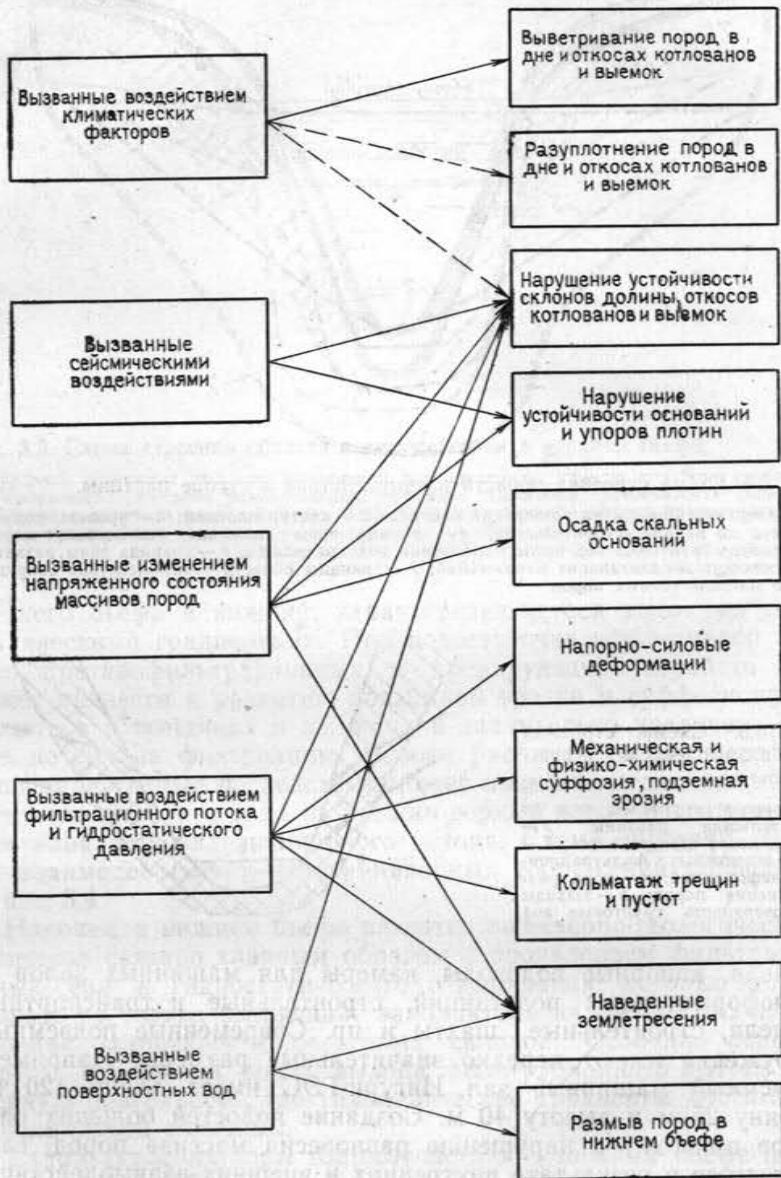


Рис. 3.6. Основные инженерно-геологические процессы, возникающие в процессе возведения и эксплуатации плотин

креплена, то это приводит к передаче на крепь значительных усилий (горное давление). Если крепление отсутствует, могут произойти обрушения кровли и стенок выработки или вывалы пород на неустойчивых участках. На значительных глубинах наблюдаются также «стреляние» пород, горные удары, а в некоторых типах полускальных пород (аргиллиты, глинистые сланцы) — выдавливание пород в сторону выработки (пучение). Одновременно с изменением напряженного состояния нарушается режим подземных вод, дренируемых выработкой, происходят изменения параметров и структуры теплового поля и пр. Мощность зоны техногенного взаимодействия вокруг подземной выработки зависит в первую очередь от сечения и формы, глубины заложения и может изменяться от немногих метров до нескольких десятков метров.

Характер инженерно-геологических процессов, развивающихся в пределах зоны взаимодействия, зависит в большой степени от глубины заложения подземного сооружения. По этому признаку сооружения делятся на три группы: мелкого заложения — до 200 м, средней глубины — 200—500 м и глубокие — более 500 м.

Сооружения мелкого заложения располагают в пределах зоны естественной разгрузки и разуплотнения. Горные породы в этой зоне обычно сильно трещиноваты, иногда закарстованы, обладают невысокой прочностью и значительной водопроницаемостью. Тектонические напряжения здесь полностью релаксированы и горное давление определяется весом вышележащих пород.

Основными инженерно-геологическими процессами в подземных сооружениях мелкого заложения являются вывалы, значительные водопритоки, иногда внезапные прорывы воды (через карстовые зоны и зоны разломов).

Сооружения глубокого заложения находятся в существенно иной обстановке. Горное давление определяется здесь не только гравитацией, но и в большой степени тектоническими напряжениями. Это заметно сказывается и на горных породах, в которых с глубиной все сильнее проявляются реологические свойства. Раскрытие трещин уменьшается, и поэтому водопритоки в выработки обычно небольшие и редко осложняют строительные работы. С другой стороны, заметно возрастает опасность пучения, горных ударов, прорывов газа, стреляния пород и др. Значительно увеличивается также температура воздуха в горных выработках, что иногда является причиной осложнений при ведении строительных работ.

Сооружения средней глубины заложения занимают промежуточное положение, и проявление в них тех или иных процессов зависит в большой степени от особенностей местной геологической обстановки.

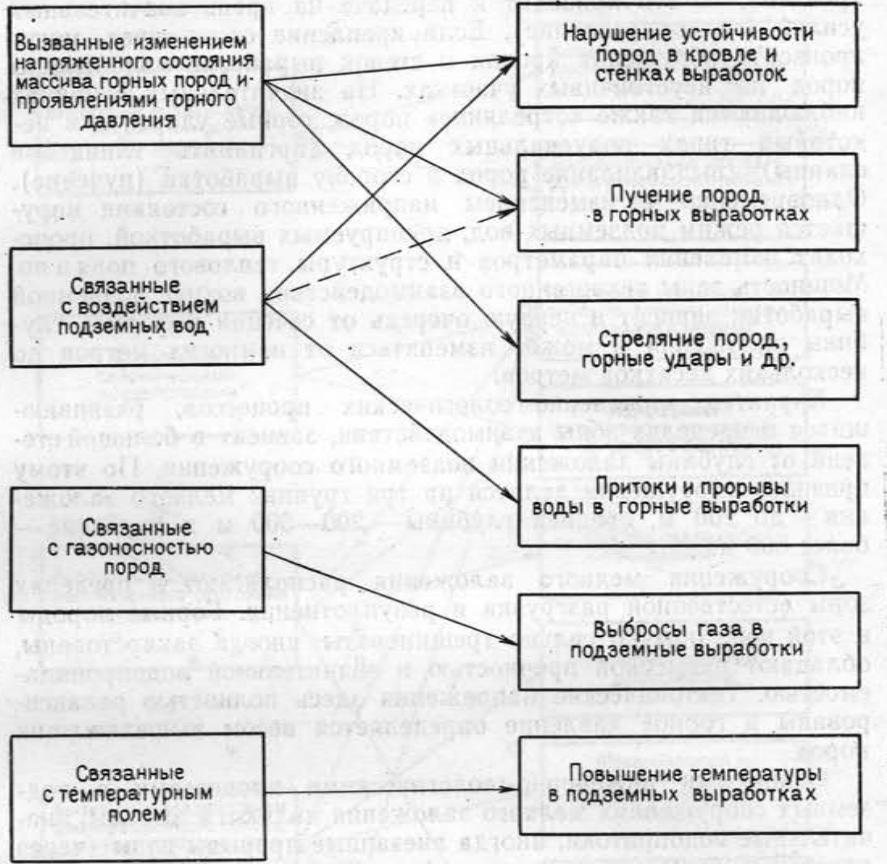


Рис. 3.7. Основные инженерно-геологические процессы, возникающие при строительстве подземных гидротехнических сооружений

Классификация инженерно-геологических процессов, развивающихся в зоне взаимодействия подземных сооружений и массивов горных пород, показана на рис. 3.7.

### 3.2. Инженерно-геологические процессы, развивающиеся при строительстве плотин и других наземных сооружений

#### 3.2.1. Процессы, связанные с изменением напряженного состояния массива горных пород

В процессе строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в результате изменения напряженного состояния массива пород развиваются следующие основные процессы:

- разуплотнение пород в дне и откосах строительных выемок и котлованов;
- нарушение устойчивости склонов речных долин и откосов строительных котлованов и выемок;
- нарушение устойчивости и прочности оснований бетонных плотин;
- деформации скальных оснований бетонных плотин.

Разуплотнение пород в дне и откосах строительных выемок и котлованов является следствием частичной разгрузки массива пород от давления перекрывающих толщ. Проявляется оно главным образом в раскрытии существующих трещин отдельности, тектонических, донного и бортового отпора, ориентированных параллельно или под небольшим углом к ограничивающим поверхностям (дну, откосам котлованов и выемок). Расширение трещин сопровождается их удлинением, слиянием кулисно расположенных трещин в одну трещину, а иногда образованием новых трещин по ослабленным поверхностям. Мощность зоны техногенного разуплотнения зависит от глубины котлованов и выемок и в скальных породах может достигать 10—15 м, а в отдельных случаях и больше.

Разуплотнение пород ускоряет их выветривание, повышает водопроницаемость, снижает прочность, повышает сжимаемость, т. е. неблагоприятно сказывается на важнейших свойствах пород. Поскольку разуплотнение развивается постепенно, глубина его проникновения в скальный массив зависит в большей степени от длительности проведения работ.

Одной из форм проявления разуплотнения пород является подъем дна котлованов и выемок. Поскольку масштаб этого явления в скальных породах обычно невелик, наблюдения за разуплотнением ведутся сравнительно редко. Тем не менее некоторые данные о развитии этого явления имеются. Так, при проходке котлована плотины Нарвской ГЭС, заложенного в толще слоистых известняков, подъем дна котлована составил около 10 см, что указывает на значительное разуплотнение основания, хотя оно было сложено скальными породами.

Характерные явления, связанные с разуплотнением пород, наблюдались при проходке котлована плотины Братской ГЭС в толще прочных диабазов (см. раздел 4.2.3). При удалении верхней разрушенной и выветрелой части толщи пород в дне котлована были вскрыты невыветрелые диабазы, на что указывал звонкий звук удара молотка о их поверхность. Однако уже через несколько дней после зачистки дна котлована звук удара становился глухим, что указывало на разуплотнение диабазов и появление в них открытых трещин. Это привело к необходимости повторных зачисток дна котлована и вызвало задержки в работах.

Разуплотнение пород в процессе проходки котлована в гранитах было зафиксировано при строительстве Красноярской

ГЭС на р. Енисее [Леонов, Мазуров, Пирогов, 1967]. Основная причина значительного разуплотнения пород заключалась в длительном (до нескольких месяцев) разрыве между проходкой котлована и укладкой бетона. За это время граниты разуплотнились на глубину 0,5—1 м, главным образом за счет раскрытия горизонтальных трещин. В результате разуплотнения мощность пород, подлежащих съему, оказалась на 1,5 м больше, чем предусматривалось проектом. В тех случаях, когда укладка бетона осуществлялась непосредственно вслед за зачисткой дна котлована, разуплотнения пород не наблюдалось.

Характерное явление было отмечено при проходке котлована Ингуринской ГЭС [Кереселидзе, Мастицкий, 1971], где по проекту предусматривалось удаление верхней ослабленной разгрузкой и выветрелой части толщи известняков. Осуществление этого мероприятия привело к неожиданному результату — зона разуплотнения пород распространялась в глубь массива на 4—15 м от дна котлована. Изучение строения образованной зоны позволило разделить ее на три подзоны: верхнюю, мощностью 1—1,5 м, где порода была разрушена до состояния разборной скалы, среднюю, мощностью до 5 м, где наблюдалось интенсивное развитие трещиноватости, а модуль деформации снизился до 400—1500 МПа (при нормальных значениях для свежей породы 4—13 тыс. МПа), и нижнюю, мощностью 2—8 м, которая характеризовалась меньшей нарушенностью и модулем деформации от 1 до 7 тыс. МПа. Наблюдался также большой разброс значений модуля деформации, указывающий на появление в породе зияющих трещин.

Данные о характере и скорости разуплотнения скальных пород в процессе проходки котлованов были получены при строительстве шлюза Днепрогэс-II, пройденного в толще архейских гранитов, разбитых тектоническими трещинами, а в приповерхностной части толщи также трещинами разгрузки и выветривания. Повышенная трещиноватость массива объяснялась влиянием зоны глубинных разломов, в пределах которой расположен шлюз. Исследования проводились путем документации откосов котлована и акустического просвечивания из специально пробуренных скважин на расстоянии 2—16 м от его бровки [Андреев, Лаврова, 1977].

До проходки котлована в массиве гранитов были выделены две зоны, различающиеся по степени трещиноватости и выветрелости пород. Верхняя зона мощностью 4 м характеризовалась густой сетью трещин разгрузки и выветривания с расстоянием между ними около 0,1 м и раскрытием трещин до 0,2 м. В этой зоне наблюдалось значительное нарастание скорости продольных волн — от 600 м/с вблизи дневной поверхности до 2 тыс. м/с на глубине 4 м. Вторая зона характеризовалась снижением общей трещиноватости (главным образом за счет уменьшения числа трещин разгрузки и выветривания), меньшей

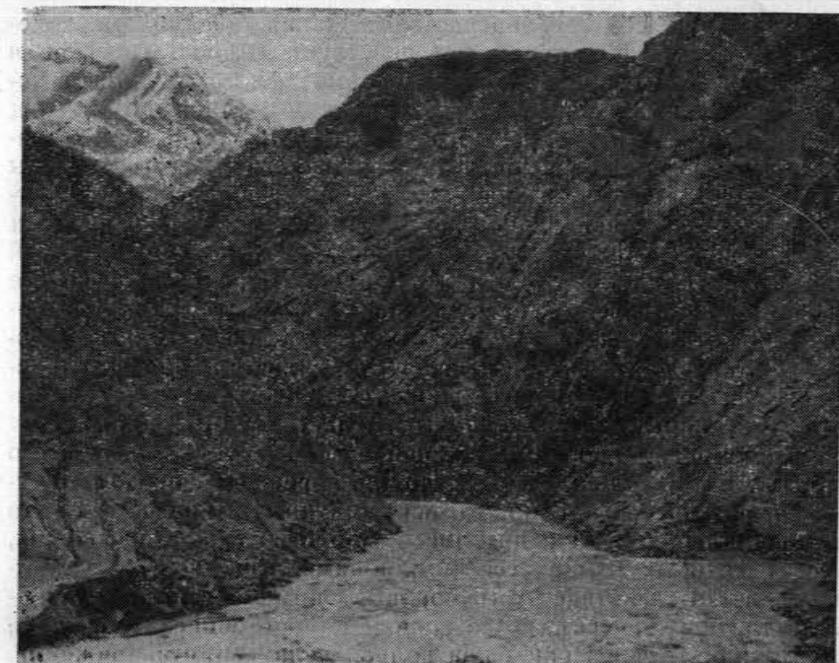


Рис. 3.8. Типичный вид горного ущелья. Створ строящейся Рогунской ГЭС (фото «Информэнерго»)

раскрытием трещин и нарастанием скорости продольных волн до 4—5 тыс. м/с.

В процессе строительства по материалам документации котлована и результатам геофизических работ была дополнительно выделена зона техногенного разуплотнения мощностью от 3 до 15 м в слаботрещиноватых породах и от 15 до 40 м — в сильно-трещиноватых. Наметилось также обособление в пределах второй зоны трех подзон, заметно различающихся по скоростям распространения продольных волн. Формирование этих подзон произошло в течение года. Наблюдения показали, что наиболее быстро раскрывались трещины, субпараллельные поверхности откоса (с 2—3 до 10—30 мм). Они способствовали вывалам отдельных блоков гранитов объемом до 80 м<sup>3</sup>. Для борьбы с этим явлением применялась сплошная бетонная обделка откосов с анкерованием.

Нарушение устойчивости склонов и искусственных откосов котлованов и строительных выемок.

При строительстве плотин в глубоких и узких горных долинах (рис. 3.8), борта которых значительно превышают отметки гребня плотин, неизбежна подрезка склонов, что снижает их

устойчивость и создает опасность смещения больших масс породы. В этом же направлении действуют гидростатическое и гидродинамическое давление, создаваемое фильтрационным потоком, а также процессы выветривания, развивающиеся под воздействием внешней среды (рис. 3.9). Нарушение устойчивости склонов может произойти также в верхнем бьефе плотины под воздействием сил, возникающих при периодических сработках и восстановлении уровня воды в водохранилище, абразии и пр. Обрушение склонов может вызвать образование высокой волны, как это произошло, например, на гидроузле Мальпассе во Франции и привело к разрушению населенного пункта и многочисленным человеческим жертвам. Важной проблемой является также расчет и обеспечение устойчивости откосов котлованов и выемок (временных и эксплуатационных), закладываемых в скальный массив при строительстве сооружений.

Рассматривая проблему устойчивости, следует прежде всего отметить, что склоны речных долин коренным образом отличаются в этом отношении от искусственных откосов тем, что они представляют собой древние морфологические образования, возраст которых измеряется миллионами или десятками миллионов лет. Вследствие этого породы, слагающие склоны, находятся длительное время в состоянии односторонней разгрузки, достаточной для частичной или полной релаксации напряжений, и для интенсивного развития процессов разуплотнения. Важнейшим следствием этих процессов является образование трещин донного и бортового отпора (см. раздел 2.2.2.1), формирование трещин связано с разрушением межтрещинных целиков и слиянием в единые большие разрывы трещин разного генезиса: тектонических (соскладчатых и приразрывных), контракционных (в магматических породах), первичной отдельности (в осадочных толщах). Нередко образуются серии таких трещин, прослеживающиеся в глубь массива на 200–250 м [Павловская, Чиркайская ГЭС и др.]. Трещины, расположенные наиболее близко к склону долины, обычно открытые, зияющие или выполненные рыхлым материалом, вмытым в них поверхностными водами. Трещины бортового отпора перехватывают поверхностный сток, в них проникают также воздух и биологические агенты выветривания, что приводит к быстрому выветриванию пород в стенах трещин. Разрушение блока, отделенного трещиной бортового отпора, обычно начинается у основания, где развиваются максимальные напряжения. В результате происходит смещение блока, а трещина превращается в широкий ров отседания. Рвы такого типа были отмечены во многих местах, например по берегам Ангары в известняках и диабазах. По данным А. В. Садова [1976], протяженность рвов достигает 100–150 м, ширина поверху 25 м, а видимая глубина 10–12 м. В конечную стадию происходит обрушение склона с образованием блокового оползня или обвала.

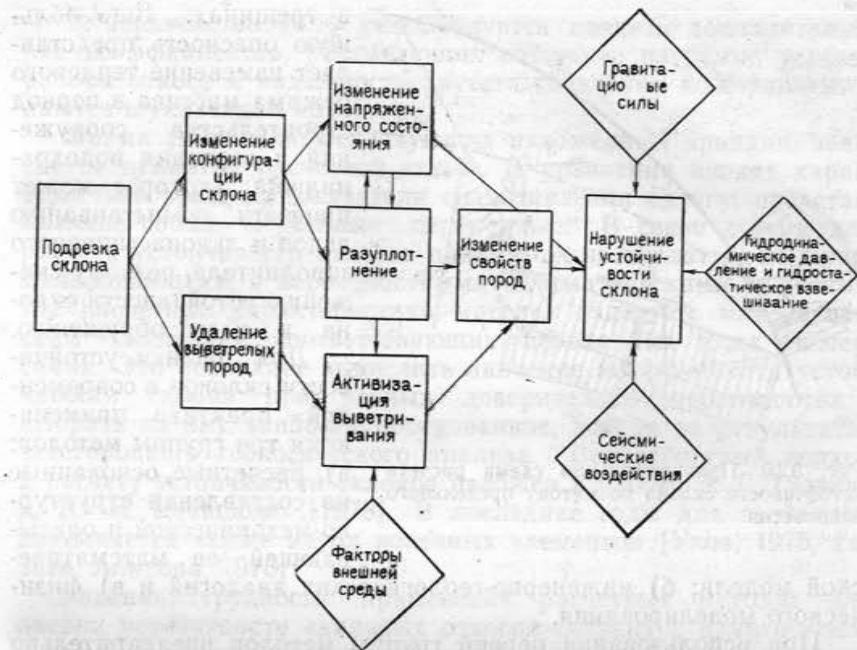


Рис. 3.9. Структурная схема действующих сил и процессов, приводящих к нарушению устойчивости склонов речных долин

Кроме трещин бортового отпора существенное влияние на устойчивость высоких склонов речных долин оказывают разломы и крупные тектонические трещины, также расширенные процессами разуплотнения. Особенно большую опасность для устойчивости склонов представляют активные разломы, по которым фиксируются смещения, вызванные слабыми землетрясениями или крипом (см. 6.3.6). Хотя величина смещений небольшая (несколько миллиметров или сантиметров в год), они постепенно снижают прочность склона и подготавливают деформации большого масштаба. Характерным примером может служить гранитный массив на участке строительства Храми-ГЭС-1 (см. раздел 4).

Если нарушения подобного рода отсутствуют, устойчивость склонов определяется более мелкими трещинами разного генезиса. В массивах, переживших большое число тектонических фаз, может насчитываться до 10–12 систем трещин. В этом случае поверхность смещения формируется по трещинам разных систем в зависимости от того, какая из них ориентирована по направлению действия сдвигающей силы.

В зоне развития многолетнемерзлых пород причиной ослабления склона, подготавливающей его к смещению, часто является расщепление массива под влиянием образования льда

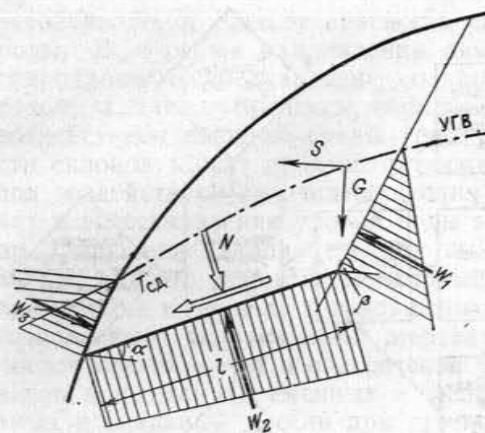


Рис. 3.10. Принципиальная схема расчета устойчивости склона по методу предельного равновесия

ской модели; б) инженерно-геологических аналогий и в) физического моделирования.

При использовании первой группы методов предварительно схематизируется строение откоса, который представляется в виде монолита, отделенного от массива одной, двумя или системой трещин, разделенных «мостиками» монолитной породы. Для расчета применяются методы, основанные на теории предельного равновесия. При этом учитываются: а) собственный вес отчлененного блока  $G$ , б) гидростатическое давление  $W$ , объемная инерционная сила  $S$ , вызванная сейсмическим ускорением и действующая в наиболее неблагоприятном направлении  $S$ . Кроме того, при возведении на склоне инженерных сооружений учитывается вес этих сооружений, а при осуществлении защитных мероприятий — сила натяжения анкеров или реакция других поддерживающих склон сооружений. Расчетная схема для случая нарушения устойчивости склона по наклонной трещине (в условиях плоской задачи) приведена на рис. 3.10.

В СССР для расчета устойчивости склонов, сложенных скальными породами, используется в основном метод дефицита устойчивости. Согласно СНиП II-16-76, под дефицитом устойчивости принято понимать разность между сдвигающими и удерживающими силами. При этом должно выполняться неравенство:

$$N < R, \quad (3.1)$$

где  $N$  — обобщенная сдвигающая сила;  $R$  — обобщенная удерживающая сила.

в трещинах. Еще большую опасность представляет изменение теплового режима массива в период строительства сооружений и создания водохранилища, которое может привести к вытаиванию льдов и льдонасыщенного заполнителя, резкому снижению устойчивости склона и к его обрушению.

Для оценки устойчивости склонов в современной практике применяются три группы методов: а) расчетные, основанные на составлении структурно-механической и описывающей ее математической модели; б) инженерно-геологических аналогий и в) физического моделирования.

В неравенство (3.1) рекомендуется вводить дополнительный ряд коэффициентов, учитывающих сочетание нагрузок, условия работы откоса и надежность расчета (значения коэффициентов даются в указанном СНиПе).

Форма уравнений, реализующих изложенный принцип, зависит от принятой расчетной схемы. В уравнения входят характеристики трещин, показатели сопротивления сдвигу, представляющие собой случайные переменные. В связи с этим для расчета устойчивости откосов правильнее пользоваться не детерминированными, а вероятностными математическими моделями, где расчетные характеристики массива задаются математическим ожиданием соответствующих переменных и их дисперсиями. Это позволяет вычислить значение коэффициента устойчивости склона при разных доверительных вероятностях и выбрать из них наиболее обоснованное, исходя из результатов всестороннего геологического анализа. Вероятностный подход к расчету устойчивости склонов изложен в работе Э. Г. Газиева и В. И. Речицкого [1978]. В последние годы для этой цели применяется также метод конечных элементов [Ухов, 1975, Газиев, Алипова, 1976].

Главная трудность применения расчетных методов для оценки устойчивости скальных откосов связана с практической невозможностью определения наиболее опасной поверхности смещения, которая может быть представлена отдельной трещиной или некоторой комбинацией трещин с неблагоприятной геометрией и низким сопротивлением сдвигу. При расчетах трудно учитывать также динамику массива пород и влияние на устойчивость таких факторов, как разуплотнение, активизация процессов выветривания, ослабляющее влияние крипа, слабых и далеких землетрясений и т. п. Вследствие этого в оценке устойчивости откоса всегда сохраняется существенный элемент неопределенности, на что обращали внимание многие известные специалисты, занимавшиеся данной проблемой (К. Терцаги, Р. Пек, А. Шнейдеггер и др.). Обстоятельное исследование этой проблемы провели Бьерум и Иорстад [Scheidegger, 1975], изучившие причины нарушения устойчивости 300 высоких скальных откосов. Они пришли к выводу, что в связи с одновременным влиянием большого числа факторов, трудно поддающихся учету, теоретические методы расчета устойчивости скальных откосов не могут дать вполне надежных результатов.

Весьма полезным дополнением к расчетным методам является использование природных аналогов. В районах с интенсивным воздыманием, где формирование речных долин продолжается и в настоящее время, склоны находятся в условиях, близких к предельному равновесию (в таких долинах возводены многие высокие плотины). Определение углов откоса при сходстве в геологическом строении может служить хорошим контролем расчетных оценок. Однако переоценивать значение

этого метода не следует, так как каждый склон обладает многими индивидуальными особенностями.

Для моделирования разрушения склонов используются также лабораторные методы, сущность которых заключается в замене реальных пород искусственными материалами, основные механические показатели которых удовлетворяют требованиям механического подобия [Розовский, Зелинский, 1975 и др.]. На модели можно имитировать подрезку и пригрузку склона, изменение его формы, использование различных укрепительных конструкций, мероприятий и пр. Однако надежность получаемых результатов и возможность перенесения их на натуру зависят в большой степени от адекватности воспроизведения структурных и иных особенностей массива. При этом возникают трудности, отмеченные из-за отсутствия достаточно надежных и полных данных о структуре массива, прочностных свойствах отдельных структурных элементов и пр. Поэтому результаты моделирования при их несомненной пользе могут дать скорее качественную, чем количественную оценку устойчивости склонов. Лабораторное моделирование можно использовать также для исследования напряженного состояния склонов (методы тензометрической сетки, фотоупругости, аналогового моделирования и др.), но при этом сохраняются отмеченные выше ограничения.

Изложенные соображения могут быть распространены и на искусственные скальные откосы, за исключением оценки влияния на их устойчивость трещин бортового отпора, поскольку в этом случае они не выражены. Кроме того, здесь могут в какой-то степени сказываться тектонические напряжения, которые в речных долинах в основном релаксированы.

Таким образом, в настоящее время отсутствует такой метод оценки устойчивости скальных откосов, который давал бы вполне надежные результаты, поэтому при решении этой задачи следует использовать комплекс методов, дополняя расчеты, выполняемые на основе механико-математических моделей, тщательным и всесторонним геологическим анализом, привлечением аналогов и пр.

Склоны и откосы, вызывающие опасение в отношении устойчивости, часто расположены над сооружениями, вынуждающие их в этом случае практически исключено, и повышение устойчивости может быть достигнуто только путем закрепления. В современной практике для этой цели применяются анкеры и шпонки, цементация крупных трещин, устройство контрфорсов и подпорных стенок. Экономические расчеты показывают, что наиболее эффективным методом является анкерование, которое может применяться в породах всех типов и оказывается в 1,5—2 раза дешевле подпорных стенок и в несколько раз дешевле удаления трещиноватых неустойчивых пород с заменой их бетоном.

Характеристики массивов пород, подлежащих закреплению (размеры, конфигурация, объем, масса), устанавливаются в результате детального обследования склонов с применением фототеодолитной съемки и в необходимом объеме разведочных работ (включая в некоторых случаях проходку штолен). По данным изысканий, сопровождаемых лабораторными, а в некоторых случаях и полевыми опытными исследованиями, выполняется расчет устойчивости склонов, на основании которого определяется величина суммарного и удельного анкерного усилия, необходимого для повышения их устойчивости до нужной величины.

Нарушение устойчивости и прочности оснований бетонных плотин. Прочность монолитных скальных и большей части полускальных пород значительно превышает величину сдвигающих усилий, развивающихся в основании плотин при заполнении водохранилищ. В связи с этим главную опасность для устойчивости сооружений представляет сдвиг по ослабленным поверхностям — сопряжению плотины с естественным основанием (контакт бетон—скала) и субгоризонтальным трещинам, рассекающим естественное основание. В соответствии с этим в действующих нормах и правилах (СНиП II-16—76) рекомендуется проводить расчет устойчивости бетонных плотин на скальных основаниях по схеме плоского сдвига. Однако, по мнению Ю. А. Фишмана [1976а], нарушение устойчивости плотин в результате сдвига характерно только для оснований, сложенных полускальными породами, а для прочных оснований, представленных скальными породами хорошей или средней сохранности, значительно более опасно разрушение от сжатия с поворотом плотины вокруг центра вращения, расположенного ниже ее подошвы. Критическое значение коэффициента сдвига, при превышении которого основным видом нарушения устойчивости плотины следует считать поворот, этот автор оценивает в 1,0—1,1. Эти соображения нашли подтверждение в серии специально поставленных экспериментов.

По мнению Ю. А. Фишмана, расчет устойчивости бетонных плотин по схеме поворота позволит избежать многих недостатков, свойственных расчетам по схеме плоского сдвига и получить более надежные оценки устойчивости. Близких взглядов придерживается С. Л. Фрид [1967], считающий, что наибольшую опасность для плотин,озведенных на скальных основаниях, представляет не сдвиг, а растягивающие напряжения.

Как видно, нарушение устойчивости и прочности скальных оснований бетонных плотин может быть вызвано различными причинами, и в настоящее время нельзя однозначно ответить на вопрос, какая из них представляет наибольшую опасность. Такое положение, с одной стороны, вызывает необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в этой области (в том числе с помощью постановки крупномасштабных

модельных испытаний), а с другой — требует осторожного подхода к оценке устойчивости плотин с обязательным анализом всех возможных вариантов.

Как отмечено выше, расчет по схеме плоского сдвига, рекомендуемый действующими нормами проектирования, осуществляется в первую очередь по контакту бетон—скала, но поскольку плотина всегда врезана на ту или иную глубину в скальные породы, в смещение вовлекается и некоторая часть толщи пород в примыканиях, ограниченная разломами, трещинами, слабыми прослоями. Оценивается также возможность сдвига плотины по горизонтальным или слабонаклонным трещинам, вскрытым в основании сооружения.

При расчете на сдвиг учитываются вес сооружения, взвешивающее воздействие гидростатического давления, гидродинамическое давление и сейсмические инерционные силы, действующие в наиболее опасном направлении. В качестве критерия предельного равновесия принимается также неравенство (3.1).

Положение опасных поверхностей определяется на основании детальных инженерно-геологических исследований. В широких долинах с горизонтальным или слабонаклонным положением пластов такими поверхностями являются контакты между пластами или трещины напластования, которые можно установить достаточно надежно. Намного сложнее выявить такие поверхности в ущельях при сложной складчатой или разрывной тектонике. В этих условиях поверхность смещения обычно принимается многогранной, включающей контакт сооружение—основание и ряд разломов, трещин, ослабленных поверхностей, ориентированных вдоль долины и падающих в сторону реки. Поверочный расчет устойчивости по различным сочетаниям таких поверхностей позволяет оценить устойчивость плотины для всех выявленных случаев и установить наиболее опасный. Например, при расчете основания Токтогульской ГЭС (см. раздел 4.3.1.3) оценивались 11 потенциально опасных комбинаций поверхностей, которые характеризовались значениями коэффициента устойчивости от 1,09 до 1,20. Поскольку инженерно-геологические исследования не во всех случаях позволяют выявить все крупные трещины, особенно в основании сооружения, где приходится в основном пользоваться данными бурения, никогда нет полной уверенности в том, что выбранная комбинация поверхностей смещения является наиболее неблагоприятной.

Не менее сложной является задача установления надежных расчетных значений основных параметров сопротивления сдвигу:  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$ . Для оценки прочности контакта бетон—скала в современной практике применяются крупномасштабные полевые опыты — сдвиги штампов, прибетонированных к подстилающей скале (см. раздел 6.3.4.2). Штамповые испытания дополняются сдвигом целиков по некоторому числу типичных трещин. Камеры для испытаний размещаются с таким расчетом, чтобы

были охарактеризованы различные разности пород (при неоднородном основании), участки сохранной породы, зоны тектонических нарушений разного типа и пр. Для возможности распространения результатов испытаний на все основание опытные работы сопровождаются детальным описанием пород с определением количественных характеристик трещиноватости (модуля трещиноватости, коэффициента трещинной пустотности) и некоторых простейших показателей физико-механических свойств пород (объемной массы, временного сопротивления сжатию) и сейсмоакустическими исследованиями. Результаты испытаний обрабатываются статистическими методами (после предварительной проверки однородности полученных совокупностей). Нормативные (средние) значения показателей вычисляются с использованием способа наименьших квадратов по формулам

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{n \sum \sigma \tau - \sum \sigma \sum \tau}{n \sum \sigma^2 - (\sum \sigma)^2}; \quad (3.2)$$

$$c = \frac{\sum \tau - \operatorname{tg} \varphi \sum \sigma}{n}, \quad (3.3)$$

где  $\sigma$  — нормальное напряжение;  $\tau$  — предельное сопротивление сдвигу. Для вычисления расчетных характеристик используется нижний односторонний доверительный предел с  $a = 0,99$  (для сооружений I и II класса согласно СНиП II-16-76).

Поскольку испытания выполняются по схеме быстрого сдвига, а длительная прочность всех пород, особенно таких как глинистые сланцы, аргиллиты, значительно ниже кратковременной, в полученные значения вводятся поправки, учитывающие фактор времени. Так, для плотины, возведенной на толще прочных эфузивов, поправки составляют:  $k_{\operatorname{tg} \varphi} = 0,9$ ,  $k_c = 0,6$ .

Поскольку организация полевых опытов сложна и требует больших затрат времени, число их обычно сравнительно небольшое, и при использовании метода доверительных пределов с высокой доверительной вероятностью это приводит к существенному снижению расчетных значений  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$ . В результате выбор расчетных значений этих характеристик основан часто не столько на результатах полевых испытаний, сколько на опыте строительства бетонных плотин в сходных геологических условиях.

Для повышения устойчивости основания широко применяются площадная цементация, анкерование, заделка крупных трещин и др.

Арочные плотины в отличие от гравитационных и контрфорсных работают на распор и передают основную часть усилий не на основание, а на береговые упоры. Поскольку возникают большие напряжения (до 10 МПа), а береговые упоры всегда бывают разбиты некоторым числом крупных трещин, мелкой

трещиноватостью или другими поверхностями ослабления, создается опасность сдвига плотины вместе с частью береговых упоров в сторону нижнего бьефа. В соответствии с этим устойчивость арочных плотин оценивается путем расчета на сдвиг блоков пород, слагающих береговые примыкания, по некоторой системе неблагоприятно ориентированных поверхностей (в том числе мелких трещин, разделенных «мостиками» монолитной породы). При этом предполагается, что по всем ослабленным поверхностям будет выполняться условие Кулона

$$\Sigma I_{\text{слв}} = f \Sigma N + cL. \quad (3.4)$$

При расчете учитываются вес отчлененного блока породы, гидростатическое давление, инерционные силы, создаваемые сейсмическим ускорением, и силы воздействия фильтрационного потока.

При проектировании арочных плотин должна учитываться также местная прочность скального массива [Методические..., 1978], хотя, как показали полевые опыты по вдавливанию штампов, даже слабые разности пород выдерживают значительные нагрузки. Так, сильнотрещиноватые известняки на площадке Ингуринской ГЭС с модулем деформации 1000 МПа выдерживали нагрузку около 10 МПа, а более или менее сохранные породы с модулем деформации 4000 МПа не удалось разрушить даже при нагрузке 40 МПа (там же). Это объясняется, по-видимому, тем, что основание, расположенное под подошвой штампа или плотины, находится в условиях объемного сжатия, благодаря чему прочность пород существенно возрастает. Это было подтверждено опытами на моделях из эквивалентных материалов, показавших, что «даже при относительно низкой прочности скального основания в большинстве случаев разрушается арочная плотина, а не основание, несущая способность которого, как правило, остается далеко не исчерпанной» (там же). Однако при низкой прочности и неоднородности массива могут возникнуть местные концентрации напряжений и развитие областей неупругих деформаций, что может потребовать изменения габаритов врезки или применения мероприятий по улучшению напряженного состояния скального массива.

Задача инженера-геолога при проектировании арочных плотин существенно усложняется, так как здесь требуется особенно тщательный и полный анализ трещинной тектоники. Сложной задачей является также оценка сил воздействия фильтрационного потока в условиях неоднородности и анизотропии скального массива по водопроницаемости с учетом влияния дренажных и противофильтрационных устройств и обжимающего воздействия дополнительных напряжений. Сохраняет значение и задача установления надежных значений  $\operatorname{tg} \phi$  и  $c$ .

Деформации скальных оснований бетонных плотин гравитационного и контрфорсного типа связаны с воз-

действием собственного веса плотины, веса воды в водохранилище и на плотину со стороны верхнего бьефа. Развиваются они как в вертикальном (осадка), так и в горизонтальном направлениях. Наибольшее практическое значение имеет осадка, включающая две составляющих а) условно-мгновенную упругую деформацию монолитной скальной породы и б) развивающуюся во времени деформацию, связанную с ползучестью монолитной породы, обжатием слабых прослоев и закрытием трещин. Поскольку упругие деформации и ползучесть скальных пород небольшие по размеру, основная часть осадки приходится на закрытие трещин и только в некоторых случаях на обжатие слабых прослоев. Закрытие трещин происходит постепенно, по мере разрушения скальных выступов на стенках трещин в результате перераспределения и местных концентраций напряжений. Этот процесс растягивается на месяцы и даже годы, в связи с чем Н. Н. Маслов [1976] предложил называть его *псевдоползучестью*.

Расчет осадок бетонных плотин на скальном основании включает три последовательные операции: а) схематизацию скального основания с выделением структурных элементов, характеризующихся квазиоднородностью по деформационным характеристикам; б) установление для каждого выделенного элемента надежных расчетных значений деформационных характеристик; в) расчет величины конечных осадок.

Решение первых двух задач сопряжено с существенными трудностями, которые определяются в первую очередь тем, что естественное основание будущей плотины занимает донную часть долины и располагается ниже уровня грунтовых вод, где применение горных работ практически невозможно. Поэтому для его изучения приходится использовать в основном геофизические методы и буровую разведку, которые не дают достаточно надежной информации о многих важных характеристиках естественного основания (длине и степени раскрытия трещин, составе и свойствах заполнителя и др.). Исследования деформационных свойств массива с помощью опытных нагрузок на штампы приходится выполнять в камерах, пройденных из разведочных штолен или шахт на значительно более высоких отметках, чем расположено естественное основание, что снижает надежность экстраполяций.

Для определения модуля общей деформации в современной практике применяются в основном опытные нагрузки на штампы, так как этот метод позволяет получить наиболее достоверные результаты. Однако возможности применения этого метода ограничены наличием, числом и положением шахт и штолен, вскрывающих сохранные части массива. Кроме того, такие опыты сложны и требуют больших затрат времени, вследствие чего они обычно выполняются в сравнительно небольшом числе (20—40 испытаний), что при значительной неоднородности оснований не всегда может обеспечить получение достаточно

надежной статистической обработки. Для расширения статистики и более полного опробования массива применяются прессиометрические испытания в скважинах малого или большого диаметра (см. раздел 6.3.4.1). Эти опыты проще, дешевле и требуют меньших затрат времени, но при использовании скважин малого диаметра дают менее надежные результаты. Поскольку расчет оснований по деформациям выполняется с использованием нормативного значения модуля общей деформации, статистическая обработка опытных данных сводится к вычислению средних значений этого показателя (иногда по нижнему одностороннему доверительному пределу при  $\alpha = 0,95$ ). Величина  $\mu$  устанавливается по специальным таблицам, графикам или на основании имеющегося опыта.

Для того чтобы обеспечить экстраполяцию точечных штамповых испытаний на всю площадь естественного основания, применяются детальные геологические описания, замеры характеристик трещиноватости и акустические методы. Последние позволяют определить скорости продольных и поперечных волн и строить регрессионные зависимости  $E_0 = f(V_p V_s)$ . Если проверка покажет высокую тесноту связи (коэффициент корреляции не ниже 0,8), эту зависимость можно использовать для определения нормативных значений  $E_0$  по средним значениям скоростей упругих волн.

Конечная величина осадки плотин зависит от механических свойств скальных пород, но в еще большей степени от структурных особенностей скального массива: наличие в основании зон тектонических нарушений, крупных трещин, плотности мелкой трещиноватости, степени раскрытия трещин, прочности скальных выступов, состава и механических свойств заполнителя и пр. Однако общая величина осадки скальных оснований даже под высокими гравитационными плотинами редко превышает 10–15 см. Если основание однородно и осадка равномерна, она в большинстве случаев не представляет опасности для сооружения. Поэтому повышенная деформируемость основания не может явиться противопоказанием для строительства гравитационной или контрфорсной плотины. Более того, исследование этого вопроса показало, что относительно низкие модули деформации основания приводят к более благоприятному распределению напряжений в теле плотины и в основании, вызывая уменьшение величины главных растягивающих напряжений у напорной грани плотины с переходом их в сжимающие [«Методические...», 1978]. В качестве примера строительства и успешной эксплуатации высоких гравитационных и контрфорсных плотин на низкомодульных основаниях можно назвать, например, гравитационную плотину Раппбоде высотой 105 м, возведенную на основании со средним значением модуля общей деформации 800 МПа, контрфорсную плотину Байна Башта (Югославия) высотой 90 м, с модулем деформации основания

300 МПа и др. Следует, однако, учитывать, что осадка основания плотин сопровождается закрытием трещин, обжатием содержащегося в них заполнителя и резким уменьшением водопроницаемости пород, по некоторым данным в 100 и даже 1000 раз, причем в связи с неравномерным распределением напряжений в основании плотины это уменьшение особенно велико у низовой грани, что может иметь неблагоприятные последствия для устойчивости сооружения [«Методические рекомендации...», 1978]. Наибольшую опасность может представлять неравномерность осадки, вызываемая неоднородностью основания или влиянием нагрузки от заполняемого водохранилища, как это было отмечено при строительстве Братской ГЭС, возведенной на весьма прочных и слабосжимаемых ( $E_0 = 25,000$ ) диабазах (см. раздел 4.2.3). В период строительства плотины наблюдались только весьма незначительные деформации основания, но при заполнении водохранилища они значительно возросли, причем выявила прямая зависимость между величиной осадок и отметкой уровня воды в водохранилище. Эпюра осадок имела форму вогнутой кривой с наибольшей стрелой прогиба 72 мм. В сторону левого примыкания осадка уменьшалась до 45 мм, в сторону правого — до 52 мм. Максимальная осадка наблюдалась у напорной грани плотины, минимальная — у низовой. В направлении нижнего бьефа осадка быстро уменьшалась и составила в 350 м от плотины 9,5 мм, на расстоянии 2 км — 2,3 мм. Прогиб основания привел к разуплотнению и увеличению водопроницаемости верхней части толщи диабазов, особенно у напорной грани плотины. Осмотр стенок скважин показал, что в контактной зоне плотина — основание образовались трещины, распространяющиеся и на прилегающие части скалы и тела плотины. Разуплотнение было подтверждено результатами ультразвуковых исследований. На общей водопроницаемости основания плотины разуплотнение диабазов практически не сказалось, вероятно, в связи с несквозным характером образовавшихся трещин, но вызвало заметный рост противодавления под некоторыми секциями плотины, что потребовало дополнительной цементации основания.

Наряду с осадкой наблюдаются также горизонтальные деформации скального основания, вызываемые совместным воздействием нормальных и тангенциальных напряжений. Как и в случае с осадкой, они объединяют различные по природе физические процессы, наиболее существенными из которых являются закрытие субвертикальных трещин и смещения по субгоризонтальным. И в том, и в другом случаях наблюдается разрушение скальных уступов на поверхности трещин, растягивающиеся на длительный период времени (псевдоползучесть). В «здравой» скале такие перемещения не превышают нескольких миллиметров и опасности для сооружения не представляют, в выветрелой же породе могут измеряться

сантиметрами или десятками сантиметров, что может оказаться уже недопустимым [Маслов, Павлищева, 1979].

При строительстве арочных плотин деформации подобного характера наблюдаются в береговых примыканиях. При достаточной равномерности они опасности для сооружений не представляют, так как арочные плотины воспринимают перемещения в примыканиях без существенного изменения напряженного состояния. Поэтому повышенная (в определенных пределах) деформируемость скального массива в примыканиях не ограничивает возможность возведения высоких арочных плотин. Мировая строительная практика знает немало случаев успешного строительства высоких арочных плотин на сравнительно сильно сжимаемых основаниях с модулем деформации 1500—1600 МПа, а иногда и ниже [«Методические рекомендации...», 1978]. Значительно большую опасность для арочных плотин представляет неравномерная деформируемость береговых упоров, связанных с наличием тектонических зон, крупных трещин и пр. Такие нарушения расчищаются и заделываются бетоном, в том числе армированным, как, например на Ингури-ГЭС (см. раздел 4.3.1.3).

### 3.2.2. Выветривание пород в дне и откосах котлованов и строительных выемок

Обнажение горных пород в дне и откосах котлованов и строительных выемок и их последующее разуплотнение, что отмечено выше, создают благоприятные условия для активизации процессов выветривания. Последнему способствуют также некоторые взрывные работы, вызывающие растрескивание пород на некоторую глубину. Это приводит к образованию техногенных кор выветривания различной мощности и строения. Степень развития кор выветривания зависит от длительности существования сооружений, климатических условий, рельефа местности и других факторов.

Большая часть строительных котлованов и выемок рассчитана на небольшой срок службы (три-четыре года), определяемый длительностью производства строительных работ, поэтому здесь могут образоваться коры выветривания значительной мощности только на очень слабых полускальных породах: аргиллитах, слабосцементированных песчаниках и алевролитах с глинистым или растворимым цементом. Такие породы были встречены при строительстве некоторых ГЭС на Русской и Сибирской платформах, а также предгорьях, в области развития отложений молассовой формации. С другой стороны, в состав сооружений гидроузлов входят откосы и выемки, рассчитанные на длительный срок службы, определяемый классом сооружений гидроузла. Здесь выветривание может затронуть и более прочные скальные породы. Скорость выветривания зависит

от состава пород и климатических условий и по данным наблюдений [Молоков, Калмыкова, Разумов, 1971] изменяется от 0,35 м/год (верхнепермские аргиллиты на участке Воткинской ГЭС) до 1,5 м/год (юрские слабые алевролиты на участке Иркутской ГЭС на р. Ангаре).

### 3.2.3. Процессы, вызываемые воздействием фильтрационного потока

К важнейшим процессам, вызываемым воздействием фильтрационного потока, относятся [Лыкошин, 1976]: а) подземная эрозия; б) супфозия; в) кольматаж; г) напорно-силовые деформации.

Под подземной эрозией принято понимать размыв рыхлого заполнителя в подземных пустотах и трещинах свободным потоком воды. При возведении плотин такой процесс может наблюдаться в той части пустот и трещин, которые не полностью заполнены водой и рыхлым материалом. Интенсивность размыва зависит от расхода потока, характера движения воды (турбулентное, ламинарное), его скорости, а также от состава и свойств материала, заполняющего пустоты и трещины. Подземная эрозия изучалась с применением полевых и лабораторных методов на строительстве Ингури-ГЭС. Исследования велись на одной из крупных трещин, прослеживающейся из верхнего бьефа в нижний в основании арочной плотины. Трещина шириной от 4 до 17 см была частично заполнена монтмориллонит-гидрослюдистой глиной. Размыв начался на выходе трещины при турбулентном режиме потока при скорости более 25 см/с. В самой трещине размывающая скорость составила более 60 см/с. Эти результаты были учтены при проектировании здесь противофильтрационных мероприятий.

Более широко распространенным и опасным процессом является супфозия, которая в трещиноватых скальных породах может проявляться:

а) в механическом разрушении и вымывании материала, заполняющего пусты и трещины,— механическая или физическая супфозия;

б) в растворении и выносе материала, заполняющего пустоты и трещины или слагающего их стенки,— химическая супфозия;

в) в форме более сложного процесса, в котором принимают участие как механический размыв материала, так и его растворение,— физико-химическая супфозия.

Причина возникновения механической супфозии заключается в резком увеличении гидравлических градиентов и скорости фильтрационного потока в пустотах и трещинах, при заполнении водохранилищ или при осушении строительных выемок и котлованов. Особенно опасными при этом являются места выхода фильтрационного потока на дневную поверхность, где градиенты достигают максимальной величины. Раз начавшись,

супфозия регрессивно распространяется в глубь трещины или полости, что может привести к полному выносу заполнителя. Иногда размыв распространяется и на выветрелую, разрушенную породу, слагающую стенки пустот и трещин, в результате чего образуются трубчатые щели и каналы, получившие у французских специалистов название «лисих нор». Ширина таких каналов может достигать 1—1,5 м, протяженность — десятков метров.

Опасность развития супфозии зависит от состава и свойств заполнителя. Особенно слабой супфозионной устойчивостью характеризуется тонкая, лишенная связности известковая или доломитовая мука, часто заполняющая трещины в толщах доломитов и известняков. Так, исследования Л. А. Молокова [1959] на строительной площадке Каховской ГЭС показали, что вымывание такого заполнителя начинается уже при градиентах порядка 0,015—0,1. Более широко распространенный тип заполнителя — песчано-глинистый — более устойчив. Исследования супфозионной устойчивости песчано-глинистого заполнителя трещин и полостей при изысканиях на участках строительства Арзинской, Каховской, Токтогульской ГЭС и Наглу-ГЭС показали, что вымывание глинистых частиц начинается при градиентах от 0,5 до 1. Такие градиенты существенно превышают фактические характеристики фильтрационного потока.

Большое значение для развития супфозии имеет также характер распределения заполнителя в трещинах. Как видно на рис. 3.11, при частичном заполнении трещин градиенты могут быть значительно выше, чем при сплошном. Соответственно, и опасность вымывания заполнителя в первом случае больше, чем во втором. Поскольку установить реальное распределение заполнителя в трещинах невозможно, существенно затрудняется моделирование этого процесса.

Для предотвращения механической супфозии применяется устройство противофильтрационных завес, дренажей и обратных фильтров в местах выхода фильтрационного потока на дневную поверхность.

Химическую и физико-химическую супфозию следует рассматривать как часть карстового процесса, поскольку этим термином объединяют явления, сопровождающие взаимодействие подземных вод с растворимыми горными породами. Опасность этого процесса определяется степенью растворимости пород в грунтовых водах. Например, растворимость карбонатных пород небольшая, поэтому за время эксплуатации сооружения может произойти только незначительное увеличение размеров существующих карстовых пустот и трещин, что не создает опасности для сооружений. В связи с этим при строительстве плотин на карбонатных породах учитываются в основном существующие карстовые формы, а также возможность вымывания из них заполнителя, что может увеличить потери на фильтрацию



Рис. 3.11. Влияние распределения заполнителя в трещинах на величину гидравлического градиента. По А. Г. Лыкошину.

При полном заполнении  $l=h/l$ , при частичном заполнении  $l_1=h_1/l_1$  и  $l_2=h_2/l_2$

(см. разделы 3.2.3 и 6.3.2.6). Растворимость гипса значительно выше, поэтому даже при сравнительно небольшой длительности существования сооружения это может привести к выщелачиванию значительных объемов породы и образованию крупных карстовых полостей. При строительстве сооружений на массивах пород, включающих пласти гипса, принимаются меры, предотвращающие или резко снижающие интенсивность растворения: противофильтрационные завесы, дренажи и пр. Примером строительства большой бетонной плотины на толще пород, включающих гипс, может служить Камская ГЭС (см. раздел 4.2.1.2).

Кольматаж пород происходит в результате вымывания в трещины и пустоты, имеющиеся в породах, тонкого песчано-глинистого материала. Наиболее интенсивно кольматаж протекает в период паводков в руслах рек, когда переносится большое количество влекомых или взвешенных наносов, а быстрое повышение уровня воды в реке создает высокие градиенты инфильтрации воды в дно и берега реки. При последующем медленном спаде паводкового уровня градиенты обратной фильтрации оказываются недостаточными для полной расколматации, и трещины в скальных породах, слагающих дно рек, остаются заполненными песчано-глинистым материалом. Вследствие этого придонный слой скальных пород обычно обладает меньшей водопроницаемостью, чем более глубокие части разреза, что для строительства сооружений благоприятно. Такое явление приводит, в частности, к заметному уменьшению притоков воды в котлованы, закладываемые на берегу реки. При возведении плотин закольматированное дно реки выполняет роль естественного понура.

Напорно-силовые деформации, вызываемые взвешивающим давлением подземных вод, могут наблюдаться:

а) при проходке котлованов и выемок, если ниже их дна залегает горизонт напорных вод, перекрытый слоем водонепроницаемых пород небольшой мощности, или если этот слой прорезан котлованом или выемкой на значительную глубину;

б) в береговых откосах в нижнем бьефе при отсутствии или недостаточно эффективной работе дренажных сооружений.

Первое из этих явлений при проходке котлованов в толщах скальных и полускальных пород наблюдается редко, например, при наличии прослоев глин, аргиллитов или мергелей в толщах карбонатных пород. При небольшой мощности (десятки сантиметров) прослои глин и мергелей обычно растрескиваются, что облегчает разгрузку подземных вод и предотвращает выпор дна котлована. При большой мощности (многие метры) разуплотнение породы и выпор дна котлована практически неизбежны, поэтому в таких случаях обязательным является устройство дренажных (разгружающих) скважин. Скальные породы, разуплотненные напором подземных вод при передаче на них давления от построенных сооружений вновь уплотняются и остаточных деформаций почти не наблюдается.

В склонах речных долин в нижнем бьефе взвешивающее давление может явиться причиной разрушения пород и развития обвально-оползневых явлений. Для их предотвращения применяются дренажные сооружения.

### 3.2.4. Землетрясения, вызываемые заполнением водохранилищ

Заполнение водохранилищ нередко сопровождается заметной активизацией сейсмичности в прилегающем районе, иногда даже в тех случаях, когда до строительства гидроузла он относился к числу асейсмичных. Магнитуда таких «вызванных», или «наведенных» землетрясений обычно невелика, но зафиксирован ряд случаев, когда они имели разрушительные последствия с человеческими жертвами. Примером может служить землетрясение, которое произошло 10 декабря 1967 г. при заполнении водохранилища Койна (Индия). Район гидроузла расположен в пределах Индийского щита и считался традиционно асейсмичным. Заполнение водохранилища вызвало серию землетрясений разной силы, среди которых отмеченное выше оказалось самым разрушительным: было разрушено большое число зданий (до 80 % в ближайшем пос. Койнанагар) и погибло около 200 человек. Сильные сотрясения наблюдались на расстоянии до 230 км от эпицентра [Гупта, Ростоги, 1979].

Разрушительные последствия имели также землетрясения, вызванное заполнением водохранилищ Кремаста в Греции (1966 г.,  $M=6,2$ ) и Караба на границе Замбии и Зимбабве (1963 г.,  $M=6,1$ ). В СССР значительных по силе землетрясений, связанных с заполнением водохранилищ, не наблюдалось, но повышение сейсмической активности было отмечено при строительстве Чарвакского, Чиркейского и Нуракского гидроузлов [Николаев, 1978].

Отмечено, что водохранилища, вызывающие землетрясения, имеют значительную глубину (более 100 м) и значительный

объем (более 1 км<sup>3</sup>), но корреляция между этими параметрами водохранилища и силой (магнитудой) землетрясения не выражена. Известную роль играет также скорость заполнения водохранилища.

Активизация сейсмической активности обычно проявляется в период заполнения водохранилища, достигает максимума при достижении проектного напорного горизонта, а затем постепенно падает, возобновляясь при последующих восстановлениях уровня воды в нем. Характерно также смещение (запаздывание) землетрясений относительно подъема уровня на 1—1,5 мес. Продолжительность периода повышенной активности после создания водохранилища может быть весьма значительной — до 10 лет и больше. За это время на упомянутых выше водохранилищах произошло несколько десятков землетрясений с магнитудами от 4 до 5 по шкале Рихтера и несколько более сильных.

Положение эпицентров наведенных землетрясений зависит от геологоструктурных особенностей территории, положения активных разломов и пр. В одних случаях они могут быть расположены непосредственно под дном водохранилища, в других — в его окрестностях, в радиусе до 25 км, изредка больше. В большинстве случаев наблюдается значительный разброс в положении эпицентров отдельных землетрясений, что указывает на их связь не с одним, а с несколькими тектоническими нарушениями. Существенно изменяется и глубина очагов землетрясений — от первых километров до 30 км, иногда более. Большинство специалистов считают, что причиной возбуждения землетрясений могут быть два фактора:

а) увеличение напряжений в массиве пород от веса воды в водохранилище;

б) увеличение порового (взвешивающего) давления.

Нормальные сжимающие напряжения, создаваемые давлением воды в водохранилище, в связи с большой площадью последнего могут распространяться на глубину многих километров и даже десятков километров, но величина напряжений обычно незначительна (менее 1 МПа). Например, под крупнейшим в мире водохранилищем Караба объемом 175 км<sup>3</sup> максимальное увеличение нормального вертикального напряжения составило 0,668 МПа, а горизонтального — 0,212 МПа [Гупта, Растоги, 1979]. Таких напряжений, конечно, недостаточно для того, чтобы вызвать смещение крупных блоков пород даже по ослабленным разломам, если до этого величина напряжений не приблизилась к критическому значению за счет тектонических процессов. Таким образом, рост нормальных напряжений нельзя, по-видимому, считать причиной возникновения землетрясений. Но он может сыграть роль «спускового механизма» для разрядки уже существующих напряжений.

Рост порового давления при заполнении водохранилищ приводит к определенному снижению эффективного напряжения, которое определяет величину «внутреннего трения», действующего по поверхностям смещения; тангенциальные напряжения остаются неизменными. Это снижает устойчивость массива пород и может привести к смещениям по существующим разломам, в том числе и по очень пологим, типа надвигов. То, что поровое давление может играть роль стимулятора сейсмических явлений, показали нагнетания воды в глубокие скважины (например, в Денвере и Рейнджли, США), вызвавшие рои слабых землетрясений. Однако давление воды при этих опытных нагнетаниях достигало весьма значительной величины (20 МПа), в то время как при заполнении водохранилищ оно не выходило за пределы 1—1,5 МПа. Трудно поэтому считать, что повышение порового давления может явиться основной причиной возникновения землетрясения. Это подтверждается, в частности, тем фактом, что ни на одним из крупных водохранилищ в СССР не возникало сильных землетрясений. Достаточно многочисленны такие водохранилища и в других странах, например в США. Можно привести в качестве примера водохранилище Пауэлл в долине р. Колорадо, где несмотря на большие его размеры (2 км<sup>3</sup>) и глубину (140 м у плотины) сейсмических явлений не наблюдалось.

Если изложенные соображения правильны, можно сделать два важных вывода. Во-первых, наведенные землетрясения большой силы (магнитуды) следует ожидать главным образом в районах с высокой фоновой сейсмичностью и активной современной тектоникой, что, однако, не исключает возможности проявления землетрясений средней силы (5—6 баллов) и в слабо сейсмических районах или даже асейсмичных. Из этого следует также, что возможная магнитуда наведенных землетрясений зависит главным образом от сейсмотектонических особенностей территории и только в малой степени от параметров водохранилищ. Роль последнего фактора может проявиться только в том, что большое водохранилище должно быть более действенным «спусковым механизмом», чем малое. Во-вторых, нельзя быть уверенными в том, что наблюдавшиеся магнитуды (6—6,2) являются предельными для наведенных землетрясений, так как все перечисленные землетрясения произошли в районах с весьма умеренной сейсмичностью или даже с отсутствием проявлений сейсмичности. Не исключено, что в районах с высокой сейсмичностью, «подготовленных» к землетрясению накопившимися тектоническими напряжениями, магнитуды могут быть значительно более высокими, а сейсмические толчки — более разрушительными. При оценке опасности наведенных землетрясений следует исходить из тех же теоретических и методических положений, которые положены в основу оценки сейсмической опасности от землетрясений обычного типа (см. раздел 6.3.6).

### 3.2.5. Инженерно-геологические процессы, вызываемые сейсмическими воздействиями

Колебания естественного основания, порождаемые землетрясением, передаются на сооружение, вызывая значительные по величине динамические нагрузки, связанные с инерционностью сооружения и «присоединенных масс» воды. При этом сооружения испытывают сложные колебания двух типов:

- колебания общей системы сооружение—основание;
- пространственные и крутильные колебания отдельных частей сооружения.

Колебания грунта в разных точках несинхронны и могут иметь разную амплитуду и фазу, что приводит к развитию в основании и береговых примыканиях значительных дополнительных напряжений. Для любых типов плотин наибольшую опасность представляют сейсмические колебания, направленные перпендикулярно к оси плотины. Интенсивность сейсмического воздействия на сооружение зависит от типа, конструкции и размеров сооружения, динамических свойств пород основания и сооружения и от условий опищения сооружения на массив пород.

Большую опасность для сооружений, попавших в эпицентralную зону, представляют перемещения блоков пород по разломам, если они имеются в основании сооружения. В сравнительно недавнем прошлом считалось, что такие перемещения происходят сравнительно редко и только при очень сильных землетрясениях, но наблюдения последних лет заставили пересмотреть эту точку зрения. Было установлено, например, что в Калифорнии, для которой характерна небольшая глубина очагов землетрясений (редко более 25 км), деформациями поверхности земли сопровождалось абсолютное большинство землетрясений с  $M > 6$  и значительное число более слабых землетрясений, а в Турции такие деформации наблюдались при всех обследованных землетрясениях с  $M > 6,5$  [«Seismic...», 1976]. Для сооружений такие деформации весьма опасны, поскольку амплитуда перемещений при 6—8-балльных землетрясениях может составлять несколько метров, а при 9—10-балльных — превышать 10 м [Попова, 1976]. Протяженность и ширина эпицентralных зон землетрясений зависит от их силы, геологического строения территории и может изменяться от первых километров до десятков и сотен километров. Значительную опасность для сооружений могут представлять также нарушения устойчивости пород на склонах вблизи основных сооружений, вызванные сейсмическими сотрясениями. Последние особенно опасны для крутых склонов, разбитых тектоническими трещинами и трещинами бортового отпора, а также склонов, сложенных слоистыми толщами осадочных пород, падающих в стороны реки. Оползни могут произойти также на склонах, покрытых рыхлыми четвертичными отложениями, особенно если они

находятся в насыщенном водой состоянии. В этом случае образуются оползни-потоки, нередко достигающие значительной величины и большой разрушительной силы. Необходимо, наконец, учитывать возможность образования высоких волн в результате колебания дна и бортов водохранилища, а также в результате обрушения в него масс грунта с берегов.

Наиболее высокой сейсмической устойчивостью характеризуются бетонные плотины (арочные, контрфорсные, гравитационные), которые не получают опасных повреждений даже при весьма сильных землетрясениях. Плотины из местных материалов (каменнонабросные или земляные) повреждаются при землетрясениях более значительно, притом не только в эпицентralной зоне, но и на расстоянии в 50—100 км от очага землетрясения, однако даже при сильных повреждениях (например, разрушении по всей длине верховой призмы) они удерживают напор.

Из высоких земляных плотин, выстроенных в СССР, землетрясение в 8 баллов перенесла Чир-Юртская плотина на р. Сулак (Дагестан). Плотина высотой 45 м, возведенная из гравийно-галечных грунтов с суглинистым ядром, была рассчитана на землетрясение в 7 баллов, но проверена на устойчивость и при воздействии землетрясения силой 8 баллов. В основании земляной плотины залегает толща плотных глин, алевролитов, песчаников и известняков-ракушечников разной прочности, падающих под углом 30° в сторону левого берега и вниз по течению реки.

В результате землетрясения на поверхности гребня плотины появились три ряда продольных зияющих трещин шириной до 0,4 м и глубиной до 1,5 м. Были отмечены также вертикальные смещения с амплитудой до 0,2 м, причем опущенным оказался верховой откос. Эти повреждения не вызвали нарушения нормальной эксплуатации плотины.

Высокие бетонные плотины на территории СССР в зону воздействия сильных землетрясений пока не попадали, но имеются интересные данные о последствиях 8-балльного землетрясения на участке строительства Чиркейской арочной плотины (см. раздел 4.3.1.3), расположенной на р. Сулак выше Чир-Юртской ГЭС. К моменту землетрясения были завершены работы по проходке котлована. В долине р. Сулак широко развиты обвалы и оползни, чему способствуют сильная расчлененность рельефа, переслаивание плитчатых известняков с тонкими прослойками глин и мергелей (см. рис. 1.6), значительная тектоническая нарушенность массива и сильная обводненность пород. Общая устойчивость склонов долины была оценена коэффициентом устойчивости 1,5, но на некоторых участках значение коэффициента было значительно ниже. В период строительства взрывные работы и подрезка склонов привели на некоторых участках к образованию потенциально неустойчивых

massивов. Все это вызывало опасения, что при землетрясении здесь могут наблюдаться смещения крупных блоков скальных пород. Однако при 8-балльном землетрясении, произошедшем в районе строительства 14 мая 1970 г., были отмечены только весьма незначительные смещения (2—3 см) трех ранее выделенных неустойчивых массивов. Обрушения крупных блоков пород не наблюдалось.

### 3.3. Инженерно-геологические процессы, развивающиеся при строительстве подземных сооружений

#### 3.3.1. Процессы, связанные с изменением напряженного состояния массива горных пород и проявлениями горного давления

Нарушение устойчивости пород в кровле и стенах горных выработок. Обрушение кровли и стенок горных выработок — один из наиболее широко распространенных и опасных инженерно-геологических процессов, возникающих при строительстве гидротехнических туннелей, выемок для размещения подземных машинных залов и пр. Если обрушения связаны в основном с технологией проходки горных выработок (например, со взрывными работами) и имеют небольшие масштабы (отслоение пород мощностью 0,3—0,5 м и пр.), обычно употребляют термин *перебор*, если с геологическими факторами (пересечение крупного тектонического нарушения, зоны дробления или повышенной трещиноватости) и имеет более крупные масштабы — пользуются термином *вывал*. Переборы усложняют возведение временной и постоянной крепи, удороажают строительство, вывалы — вызывают значительные задержки в производстве работ и бывают причиной человеческих жертв. Вероятность и масштабы вывалов зависят, с одной стороны, от формы, размеров, глубины заложения сооружения, с другой — от условий залегания пород, характера напластования, мощности отдельных пластов, гидрогеологических условий, физико-механических свойств пород, наличия, размера и характера тектонических нарушений, трещиноватости пород и многих других геологических факторов.

При возведении сооружений в осадочных толщах наиболее благоприятные условия создаются при проходке подземных выработок в массивных или грубослоистых породах, менее благоприятные — в тонкослоистых, обычно разбитых густой сетью трещин напластования. Наличие трещин приводит к отслаиванию породы, переборам и вывалам, которые обычно происходят со стороны нависающих пластов (рис. 3.12). В горных районах со складчато-блоковой структурой наибольшие трудности создают разрывные тектонические нарушения, особенно «активные»,

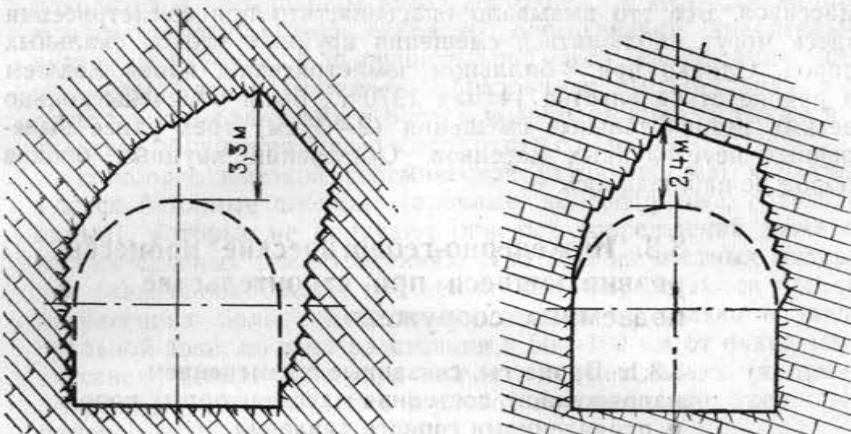


Рис. 3.12. Характерные вывалы в тоннелях, проходимых в слоистых скальных породах (известняках, мергелях, песчаниках и др.) с интенсивно развитой трещиноватостью напластования (Ингури-ГЭС, Чиркейская ГЭС и др.).

по которым происходили многократные подвижки в четвертичное время. Трещины-сместители в таких нарушениях обычно заполнены глиной трения, милонитом, тектонической брекчияй и сопровождаются зонами дробления или повышенной трещиноватости. Опыт проходки туннелей на ряде крупных ГЭС в СССР показал, что при пересечении таких нарушений часто (в 20—30 % всех случаев) происходят крупные вывалы пород объемом от 700 до 3 тыс. м<sup>3</sup> [Пашкин, 1976]. Ликвидация таких крупных вывалов занимает от 2 до 8 мес.

В большинстве случаев вывалы начинаются в процессе взрывных работ и развиваются в две-три фазы в течение нескольких часов или суток. Наблюдаются, однако, и такие случаи, когда обрушение пород происходит уже после завершения строительных работ и проявляется в форме деформаций несущей обделки. При трассировании туннеля следует уделять особое внимание разломам, совпадающим по простирианию с осью туннеля, так как они могут вызвать крупные вывалы.

Так, большие опасения при строительстве деривационного туннеля Ингури-ГЭС вызывал участок пересечения Ингиришского разлома. Зона сместителя разлома шириной около 10 м была представлена синевато-черной глиной и брекчированным углистым известняком с многочисленными зеркалами скольжения. На контакте известняков со сместителем наблюдался выход подземных вод с дебитом около 10 л/с. Таким образом, этот участок характеризовался явно неблагоприятными условиями и мог угрожать весьма крупным вывалом. Вывал, как и ожидалось, произошел, правда при несколько меньшем объеме, чем предполагалось — 120 м<sup>3</sup> с максимальной высотой свода обрушения 3,6 м.

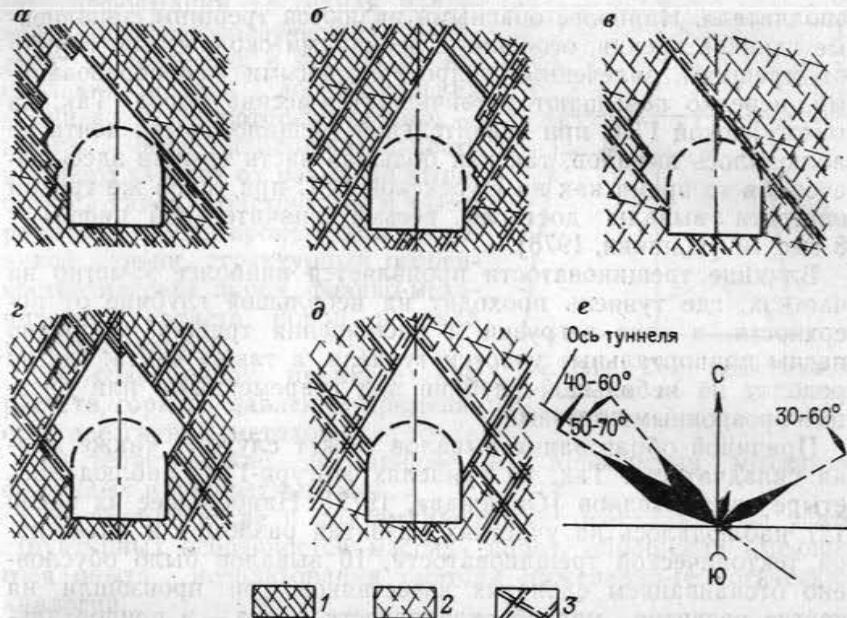


Рис. 3.13. Примеры неблагоприятного сочетания ориентировки основных систем трещин и туннеля, приводящего к образованию вывалов.

а, б, в — асимметричные вывалы при преобладающем развитии одной системы крупных трещин, субпараллельных оси туннеля; г, д — симметричные вывалы при преобладающем развитии двух систем крупных трещин, субпараллельных оси туннеля (е — типичная для этого случая роза трещиноватости). 1 — трещиноватые слоистые осадочные породы; 2 — трещиноватые магматические или метаморфические породы; 3 — трещины открытые или заполненные рыхлым, преимущественно глинистым материалом

Существенное влияние на устойчивость пород в подземных выработках оказывает также трещиноватость, особенно густота трещин, обычно оцениваемая модулем трещиноватости или блочностью (см. раздел 2.2.2.1). Большое значение имеет также пространственная ориентировка основных систем трещин. Наиболее неблагоприятны для устойчивости пород в выработках трещины, совпадающие по простирианию с направлением туннеля и имеющие крутые (40—80°) углы падения. При наличии таких трещин образование переборов и вывалы пород весьма вероятны. При этом высота вывалов над сводом зависит от направления и углов падения сходящихся плоскостей трещин. Некоторые неблагоприятные случаи сочетания основных систем трещин и их влияния на устойчивость пород в кровле горизонтальных выработок приведены на рис. 3.13. Более благоприятны случаи, когда туннель прорассирован вкрест простириания основных систем трещин или пересекает их под углами, превышающими 45°.

Существенное влияние на устойчивость пород в подземных выработках оказывают длина трещин, их ширина, характер

заполнителя. Наиболее опасными являются трещины, заполненные глиной трения, особенно с зеркалами скольжения. Наоборот, трещины, залеченные гидротермальными новообразованиями, нередко повышают устойчивость массива пород. Так, на Токтогульской ГЭС при значительной трещиноватости почти не наблюдалось вывалов, так как большая часть трещин здесь залечена, в то время как на Нуракской ГЭС при такой же трещиноватости вывалы достигли весьма значительной цифры — 28 тыс. м<sup>3</sup> [Пашкин, 1976].

Влияние трещиноватости проявляется наиболее заметно на участках, где туннель проходит на небольшой глубине от поверхности, в зоне загрузки и расширения трещин. Особенно опасны припортальные участки туннеля, а также места, где он проходит на небольшой глубине под современными или древними эрозионными врезами.

Причиной образования вывалов может служить также мелкая складчатость. Так, на туннелях Ингури-ГЭС наблюдалось четыре типа вывалов [Окуджава, 1972]. Наибольшее их число (12) наблюдалось на участках развития разломов и интенсивной тектонической трещиноватости, 10 вывалов было обусловлено отсл�иванием слоистых известняков, три произошли на участке развития мелкой складчатости и два — в припортальных частях туннеля, в зоне разуплотнения пород.

При проходке туннелей в толщах эфузивных пород причиной вывалов часто является встреча слабосцементированных обломочных туфов, пемз или обсидианов. Такие случаи имели место при строительстве туннелей Гюмушской ГЭС [Нейштадт, 1959], где были встречены обсидианы, раздробленные до состояния сыпучей породы, состоящей из дресвы, щебня и глыб разного размера.

Борьба с нарушениями устойчивости кровли и стенок подземных сооружений ведется в первую очередь путем выбора такого сечения и формы горных выработок, которые бы удовлетворяли техническим и экономическим требованиям и одновременно обеспечивали проходку выработок без крепления или других защитных мероприятий. Если это выполнить невозможно, то применяются различные меры защиты, от наиболее простых — набрызгбетон, защитные сетки, анкерование и пр. — до устройства временной крепи и постоянных несущих обделок. Для того чтобы решить эти вопросы, необходим предварительный достаточно надежный прогноз (расчет) устойчивости горных выработок. Основным фактором, учитываемым при таких прогнозах, является горное давление, развивающееся в результате совместного воздействия гравитации и тектонических напряжений. Влияние последних заметно сказывается при строительстве сооружений глубокого заложения, особенно в пределах молодых горноскладчатых сооружений. Горное давление связано с проявлением упругих, упругопластичных и вязкопластич-

ных деформаций (истинная ползучесть и псевдоползучесть) и нарастает постепенно, в период от нескольких недель до нескольких месяцев, в некоторых случаях — многих лет, продолжительность которого зависит от размеров выработки, типов, конструкции и быстроты возведения временной и постоянной крепи, структурных особенностей массива пород, физико-механических свойств пород и ряда других факторов.

В современной практике для расчета горного давления применяется две группы методов:

а) теоретические, основанные на применении механики сплошных и дискретных сред;

б) эмпирические и полуэмпирические, основанные на учете структурных особенностей массива пород, обобщении имеющегося опыта, использовании метода инженерно-геологических аналогий.

Теоретические методы, опирающиеся на модель упругого или упругопластичного тела, дают удовлетворительные результаты только при расчете выработок небольшого сечения или таких, которые заложены в однородных толщах, где влияние структурного фактора (наличие тектонических нарушений, трещин или других поверхностей ослабления) оказывается в небольшой степени. Из применяемых в современной практике теоретических методов наибольшим признанием пользуется метод М. М. Протодьяконова, основанный на предположении, что над горной выработкой образуется свод равновесия в форме параболы, который воспринимает давление вышележащих толщ. На крепь же оказывает давление только порода, заключенная внутри этого свода (рис. 3.14). При таких предпосылках давление на единицу длины горизонтальной выработки может быть вычислено по уравнению

$$P = \frac{4}{3} \cdot \frac{b^2 \gamma_0}{f} 10 \text{ кН/м}^2, \quad (3.5)$$

где  $f$  — коэффициент крепости породы;  $\gamma_0$  — объемный вес породы;  $b$  — полуширина выработки по ее кровле.

Для монолитной породы величина коэффициента крепости может быть вычислена по выражению

$$f = \frac{R_c}{100}. \quad (3.6)$$

Для трещиноватых пород в выражение (3.6) вводится поправочный коэффициент  $k$ , изменяющийся от 0,1—0,3 для

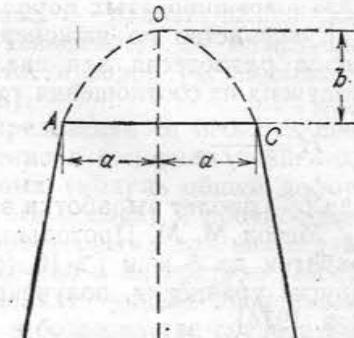


Рис. 3.14. Свод естественного равновесия, по М. М. Протодьяконову

сильнотрещиноватых пород до 0,8—0,9 для слаботрещиноватых [«Руководство по инженерно-геологическим...», 1978]. Высота свода равновесия для скальных и полускальных может быть получена из соотношения

$$H = \frac{L}{2f}, \quad (3.7)$$

где  $L$  — пролет выработки в свету.

Метод М. М. Протодьяконова используется при пролете выработок до 6 м и  $f > 10$  (там же). Применяются и некоторые другие уравнения, полученные из сходных предпосылок [Мостков, 1974].

При проходке выработок большого сечения, где влияние структурного фактора приобретает главенствующее значение, применяются эмпирические методы, основанные на предположении, что горное давление определяется: а) вывалами породы по поверхностям ослабления, главным образом по тектоническим нарушениям и трещинам и б) смещением пород в сторону выработки вследствие раскрытия существующих или образования новых трещин, вызванных разгрузкой массива в результате проходки горной выработки, взрывных работ и пр.

В первом случае прогноз обрушений основан на анализе структурных особенностей массива. Вероятный профиль выработки принимается либо по линиям пересекающихся плоскостей основных систем трещин, либо по огибающим, построенным для сходных геологоструктурных условий. С этой целью все ранее пройденные подземные выработки на других гидротехнических объектах предварительно классифицируются по основным параметрам: типу, форме, размерам и другим параметрам, а также по геологоструктурным условиям. При этом учитываются в первую очередь такие признаки, как наличие, тип, размеры крупных тектонических нарушений, степень трещиноватости пород, ориентировка основных систем трещин по отношению к оси сооружения и пр. Затем по методу наименьших квадратов строятся огибающие кривые, которые используются в дальнейшем как наиболее вероятный профиль естественного свода равновесия. Результаты обработки данных более чем по 400 вывалам в туннелях Нурекской, Токтогульской, Чиркейской, Ингури-ГЭС, а также в Яванском, Арпачайском и других туннелях с построением огибающих кривых приведены в работе Е. М. Пашкина [1975].

Во втором случае прогноз основан на определении мощности зоны нарушенных пород, для чего используются акустические методы, бурение скважин с нагнетанием воды или воздуха и другие способы. Для приближенной оценки можно использовать также обобщенную зависимость

$$h_n = k_n l, \quad (3.8)$$

где  $h_n$  — мощность нарушенной зоны;  $l$  — пролет выработки;  $k_n$  — коэффициент, принимаемый в зависимости от коэффициента крепости и степени трещиноватости пород [«Руководство по инженерно-геологическим...», 1978].

Для выбора обделки туннеля, определения ее несущей способности и трещиностойкости (особенно в напорных туннелях) необходимы данные о деформационных (модуль общей деформации, удельный коэффициент упругого отпора) и прочностных свойствах пород в массиве, т. е. с характерными для них структурными неоднородностями. Как отмечено в литературе [Мостков, Серков, 1980], появление в обделках туннеля продольных трещин с недопустимым раскрытием в большинстве случаев вызвано недостаточно точной оценкой этих свойств.

Изучение структуры массива пород и определение их механических свойств определяют выбор сечения, формы и типы несущей обделки тоннеля. Участки туннеля, пройденные в прочных, слабо сжимаемых породах, могут быть оставлены без крепления, что снижает стоимость строительства туннеля на 20—40 % [Мостков 1974]. В СССР незакрепленные туннели сечением 100—300 м<sup>2</sup> имеются на Хантайской, Верхне-Туломской и некоторых других ГЭС. В менее прочных и устойчивых породах применяются различные типы крепления: арочное, анкерное, из набрызгбетона и др. В последнее десятилетие все шире используется анкерное крепление, которое дает значительное снижение затрат. Металлические или чаще железобетонные анкеры длиной 1,5—4 м устанавливаются перпендикулярно к слоистости (трещиноватости) или радиально по отношению к контуру выработки. Расстояние между отдельными анкерами и рядами анкеров составляет 1—2 м. Анкерная крепь, в отличие от арочной, не сужает сечение выработки, изменяются только шаг и глубина анкерной крепи.

Широкое применение находит также набрызгбетон, обеспечивающий крепление выработки, гидроизоляцию и предохранение пород от выветривания. Набрызгбетон укрепляет скалу, заполняет углубления и трещины и скрепляет отдельные блоки, обеспечивая более равномерное распределение напряжений по всему контуру выработки. При толщине набрызгбетона только в 3 см можно удержать от обрушения отслоившуюся пирамиду породы высотой 1 м [Мостков, 1974]. В большинстве случаев набрызгбетон применяется в комбинации с арочной или анкерной крепью.

Для улучшения совместной работы обделки туннеля и вмещающих пород применяется укрепительная цементация последних на глубину 6—10 м под давлением (40—60) 10<sup>5</sup> Па, что обеспечивает упругое взаимодействие пород и обделки и улучшает деформационные свойства пород. Снижение внешнего гидростатического давления на обделку туннеля достигается устройством дренажей различных конструкций, в частности,

шпурового дренажа. Для уменьшения шероховатости и износа внутренних стенок туннеля они покрываются металлом или специальными мастиками.

При большой глубине заложения подземных сооружений в них могут наблюдаться также такие явления, как горные удары и стреляние пород.

Горные удары представляют собой мгновенные катастрофические выбросы в подземные выработки большого количества породы, сопровождающиеся резким звуковым эффектом и сотрясением окружающего массива пород. Возникновение их связано с мгновенным переходом потенциальной упругой энергии, накопленной в породах, в кинетическую. Стреляние пород — явление сходного характера, но происходящее в небольших масштабах. Оно может представлять опасность для людей, находящихся в выработке.

Пучение пород в горных выработках. При строительстве подземных сооружений в хрупких горных породах (известняках, песчаниках, различных изверженных породах) развиваются сравнительно кратковременные упругопластичные деформации, приводящие к смещению контура выработок и развитию горного давления.

Иная картина наблюдается при строительстве сооружений в таких породах как аргиллиты, глинистые мергели, глинистые сланцы и некоторые другие, содержащие глинистые и другие пластинчатые минералы. Здесь деформации приобретают вязкопластичный характер, могут развиваться длительное время и достигать весьма значительной величины. Такие деформации получили название пучения.

Поскольку в полускальных породах проходка подземных выработок осуществляется под защитой временного крепления, пучение проявляется, с одной стороны, в постепенном нарастании горного давления в кровле выработок и с другой — в развитии деформаций незакрепленной подошвы и слабо закрепленных боков выработки. Как показали наблюдения за пучением в действующих выработках, величина его помимо состава пород зависит от следующих факторов:

а) глубины заложения выработок. С увеличением глубины выработок интенсивность пучения, как правило, увеличивается, причем в этот процесс вовлекаются все более прочные разности пород;

б) мощности слоя пучащихся пород (чем больше мощность пучащихся пород, тем больше абсолютная величина и интенсивность пучения). Если мощность их велика и выработки не закреплены, интенсивность пучения может не затухать;

в) ширины горной выработки. Увеличение ее снижает интенсивность пучения, и эта закономерность широко используется при проведении выработок в пучащихся породах.

Влияние грунтовых вод на пучение оценивается неоднозначно, вероятно по той причине, что этим термином объединяют два существенно различных процесса: набухание глинистых пород (главным образом в выработках неглубокого заложения) и вязкопластичное течение пород (на больших глубинах). В первом случае увлажнение имеет решающее значение для развития процесса, во втором — пучение может развиваться и без дополнительного увлажнения.

### 3.3.2. Притоки и прорывы воды в подземные выработки

Притоки и прорывы воды в подземные выработки существенно усложняют ведение горных работ и нередко являются причиной задержки строительства. Особенно опасны в этом отношении прорывы воды из крупных тектонических нарушений или карстовых полостей, когда водопритоки могут достигать десятков и сотен кубических метров в час. Примером возникающих трудностей может служить сооружение Вахш-Яванского гидротехнического туннеля, пересекающего хр. Карагату в Таджикской ССР на глубине 150—700 м. По трассе туннеля был вскрыт ряд крупных тектонических зон, приток воды из которых изменялся от 50 до 650 м<sup>3</sup>/ч. Поскольку в соответствии с данными предварительной разведки водоотливные средства были рассчитаны на максимальный дебит 80 м<sup>3</sup>/ч, это вызвало значительные осложнения в ведении строительных работ [Ломоносов, 1969]. Большие водопритоки и внезапные прорывы воды с дебитом до 1400 м<sup>3</sup>/ч наблюдались при строительстве туннеля Арпа—Севан. Повышенные водопритоки наблюдаются чаще всего там, где тунNELи проходят под современными или древними эрозионными врезами, а также на участках развития карста. Например, при проходке туннелей Ингури-ГЭС повышенные водопритоки наблюдались на участках, где туннель проходил под небольшими речными долинами и в местах, где он вскрывал закарстованные трещины шириной 3—5 см. Притоки из отдельных трещин составляли 36—45 м<sup>3</sup>/ч [Окуджава, 1972].

Для составления прогнозов притоков в подземные выработки применяются методы гидрогеологических аналогий, водобалансовых расчетов, аналитические методы и гидрогеологическое моделирование.

Метод гидрогеологических аналогий основан на использовании данных, полученных при строительстве подземных сооружений в районах со сходными гидрогеологическими условиями. Он не отличается большой точностью, но нередко оказывается весьма полезным, когда отсутствуют достаточно надежные данные гидрогеологического опробования массива.

Метод воднобалансовых расчетов применяется в основном при небольшой глубине заложения туннеля и преобладании местного питания подземных вод.

Аналитические методы при расчете притоков воды в подземные выработки являются основными, но из-за сложности гидрогеологической структуры скальных массивов, наличия связи с поверхностными водотоками и главное — из-за трудности получения достаточно надежных расчетных значений параметров водопроницаемости пород они также не всегда дают достоверные результаты. Опыт показывает, что удовлетворительная сходимость расчетных и фактических данных наблюдается только при строительстве туннелей неглубокого заложения в массивах с простыми гидрогеологическими условиями. В прочих случаях расчеты дают завышенные результаты, хотя иногда наблюдается и обратное соотношение. Например, при строительстве деривационного туннеля Теребля-Рикской ГЭС неожиданно большие притоки воды осложнили проведение работ и вызвали значительные задержки строительства.

Гидрогеологическое моделирование с использованием метода ЭГДА применяется в особенно сложных случаях, когда аналитические методы могут привести к недопустимо большим погрешностям.

### 3.3.3. Выбросы газа

При проходке туннелей и подземных выработок из горных пород нередко выделяются взрывоопасные и вредные для здоровья людей природные газы. Наиболее часто встречаются метан ( $\text{CH}_4$ ), углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), и сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Метан (рудничный, или болотный газ) встречается в выработках, пересекающих угленосные, битуминозные, нефтеносные или соленосные пласти. В смеси с воздухом при концентрации от 4,9 до 15,4 % он взрывоопасен. Метан имеет небольшую плотность и скапливается в верхних частях горных выработок. В практике туннелестроения известны многочисленные случаи обильного выделения метана из трещин пород, сопровождающихся пожарами и взрывами.

Углекислый газ образуется в результате метаморфизма горных пород и различных биохимических процессов, происходящих в земной коре, а также в очагах проявления молодого вулканизма. Углекислый газ тяжелее воздуха и накапливается в нижней части подземных выработок. Появление его в большом количестве опасно для жизни людей. По правилам безопасности в атмосфере подземных выработок допускается содержание углекислого газа не более 0,5 %.

Сероводород образуется в результате биохимических, химических и гидротермальных процессов, протекающих в зем-

ной коре. Он ядовит, легко узнается по сильному запаху тухлых яиц даже при малой концентрации. При концентрации в воздухе более 0,01 % сероводород вызывает легкое отравление, а при концентрации около 0,1 % может быть причиной смерти. При содержании сероводорода в воздухе около 6 % образуется взрывчатая смесь. Кроме того, он оказывает разрушающее воздействие на бетон и металлы.

При газоносности пород необходима усиленная вентиляция подземных выработок. Большие газовыделения в сочетании с повышенной температурой пород нередко вызывают необходимость прокладки дополнительных воздуховодов, проходки специальных вентиляционных выработок, установки дополнительных вентиляторов и пр. Вероятность газовыделения обычно увеличивается с возрастанием глубины заложения подземных сооружений.

Как отмечает А. Д. Бондаренко, при проходке глубоких туннелей могут иметь место динамические явления, связанные с выделением газов и газонасыщенностью пород. В частности, при строительстве туннеля Арпа—Севан эти явления носили характер выбросов породы и углекислого газа, внезапных обрушений и выдавливания пород в строительную выемку с повышенным газовыделением. В этом туннеле газодинамические явления были приурочены к сильнотрециноватым порфиритам в зоне оперения крупной тектонической трещины.

Методика прогноза газовыбросоопасности еще только разрабатывается. В условиях туннеля Арпа—Севан было отмечено, что скопления газа под большим давлением были приурочены к практически рыхлым породам, которые при проходке опережающих скважин давали выход керна всего 2 %.

### 3.3.4. Повышение температуры в подземных выработках

Температура внутри горного массива при строительстве подземных сооружений глубокого заложения имеет важное значение для условий проведения строительных работ и выбора конструкции обделки. При умеренной влажности человек может работать при температуре до  $+50^{\circ}\text{C}$ , во влажной атмосфере даже при  $+40^{\circ}\text{C}$  работа становится практически невозможной, и в подземных выемках приходится применять искусственное охлаждение воздуха. Кроме того, значительная разность между высокой температурой пород и низкой температурой воды, протекающей по туннелю, вызывает дополнительные напряжения в его облицовке, что требует применения специальных конструктивных решений.

Температура горных пород закономерно повышается с глубиной в соответствии с величиной геотермической ступени.

Кроме региональных геологоструктурных факторов (см. раздел 2.5.1), на величину геотермической ступени влияет теплопроводность пород. В породах с повышенной теплопроводностью величина геотермической ступени больше, в породах с пониженной теплопроводностью — ниже. Так, в строительной шахте туннеля Арпа—Севан, пересекающего Варденисский хребет, сложенный до глубины 240 м рыхлыми породами с невысокой теплопроводностью, величина геотермической ступени в верхней части толщи не превышала 13—14 м, в нижней, представленной порфирами и гранитоидами с более высокой теплопроводностью, была близка к 33 м.

Охлаждающее влияние на температуру пород может оказывать приток подземных вод из вышележащих водоносных горизонтов и, наоборот, приток глубинных термальных вод может значительно повысить температуру пород.

Максимальная температура в подземных сооружениях, выстроенных на территории СССР, была отмечена в туннеле Арпа—Севан на глубине 1225 м, где она достигла 46,5 °С.

## ГЛАВА 4

# ТИПЫ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА. ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

## 4.1. Общие положения

Изыскания, проектирование и строительство гидротехнических сооружений в различной инженерно-геологической обстановке можно рассматривать как крупномасштабный эксперимент, результаты которого к тому же проверены практикой. Полученный опыт, проанализированный и обобщенный, можно использовать при изысканиях, проектировании и строительстве новых сооружений, но для этого нужно располагать классификацией массивов пород, на которых возведены сооружения. Разработка такой классификации требует учета большого числа признаков, отражающих геологическое строение массивов, их физическое состояние, свойства и динамику. Нужно учесть также взаимодействие массива с окружающей средой, определяющее развитие различных геологических процессов.

Построение классификации на такой широкой основе сопряжено с большими трудностями, поэтому мы ограничимся здесь применением упрощенной классификации, составленной с учетом только наиболее важных признаков. При построении логического базиса классификации в качестве ведущего признака примем строительный тип пород, определяемый характером структурных связей. Выделим по этому признаку три класса массивов:

- сложенные породами с жесткими структурными связями (скальными и полускальными);
- сложенные породами без жестких структурных связей (сыпучими и связными);
- сложного строения, в котором принимают участие породы обоих типов.

Основное внимание в книге будет уделено массивам, сложенным скальными и полускальными породами, которые могут служить основанием высоких плотин.

На втором таксономическом уровне используем геоструктурный признак — принадлежность массивов к крупным тектоническим структурам. Выделим соответственно две группы массивов:

- платформенных регионов;

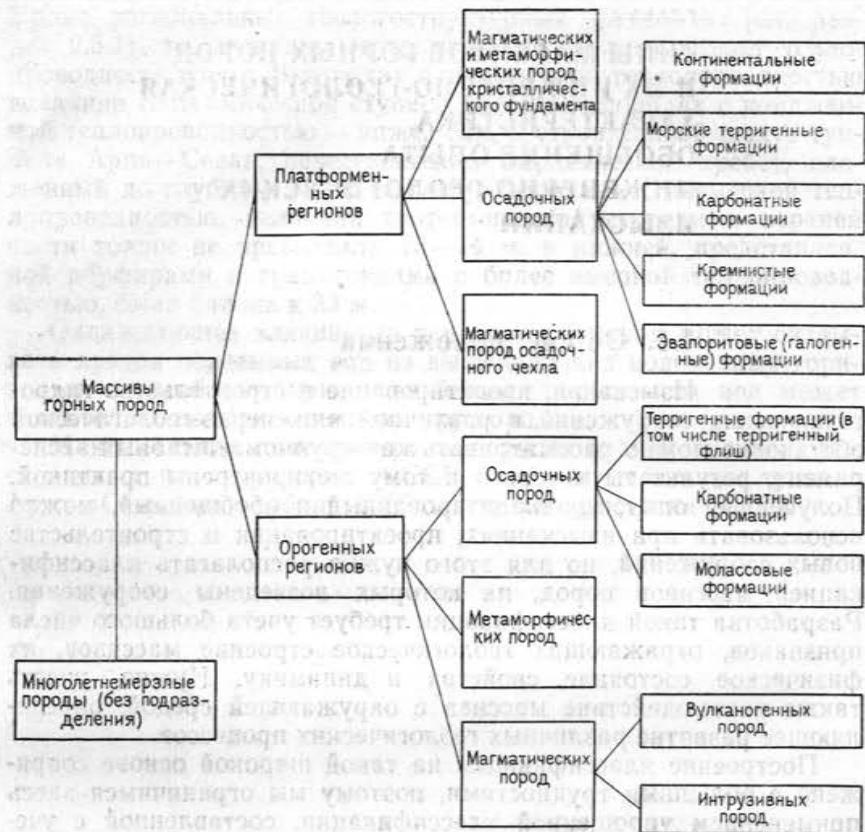


Рис. 4.1. Классификация массивов горных пород

б) орогенных регионов (сводо-глыбовых и складчатых).

В качестве третьего признака примем понимаемый в широком значении слова генетический тип пород, участвующих в строении массивов. По этому признаку выделим массивы, сложенные осадочными, метаморфическими и магматическими породами (с дополнительным подразделением последних на вулканогенные и интрузивные).

Наконец, в самостоятельную группу выделим массивы, сложенные многолетнемерзлыми породами (рис. 4.1).

## 4.2. Скальные массивы платформенных областей

В строении платформенных областей принимают участие два мегакомплекса отложений: кристаллический фундамент и осадочный чехол. Кристаллический фундамент, выхо-

дящий на поверхность в пределах плит, сложен комплексом интрузивных и метаморфических пород, представленных гнейсами и кристаллическими сланцами. Вся толща пород интенсивно дислоцирована и разбита тектоническими нарушениями на отдельные блоки. Осадочный чехол сложен породами различного литологического состава, от рыхлых несцепментированных до весьма прочных скальных, залегающих практически горизонтально или образующих пологие структуры платформенного типа. Углы падения пластов на крыльях структур редко превышают несколько градусов. Разрывные дислокации в осадочном чехле немногочисленны. Магматические породы в строении платформенного чехла либо отсутствуют, либо играют второстепенную роль (например, траппы Сибирской платформы). В соответствии с такими особенностями строения платформ выделим массивы трех типов:

- сложенные осадочными породами;
- сложенные магматическими и метаморфическими породами кристаллического фундамента;
- сложенные магматическими породами, участвующими в строении платформенного чехла.

### 4.2.1. Массивы, сложенные осадочными породами

Массивы платформенного типа сравнительно редко сложены породой какого-либо одного петрографического типа. Значительно чаще наблюдается переслаивание пород разных типов, образующих естественные парагенезы различной степени сложности — *формации*. Распределение формаций в земной коре определяется двумя факторами: тектоническим режимом и физико-географическими условиями осадконакопления. Вследствие этого на разных этапах развития платформы в районах со сходным тектоническим режимом и географической обстановкой формировались сходные формации. Это позволяет выделить типы формаций («абстрактные формации» — по принятой в этой отрасли знаний терминологии) и осуществить их классификацию. В пределах осадочного чехла платформ можно выделить четыре основные группы формаций: терригенные (континентальные и морские), карбонатные, кремнистые и эвапоритовые.

На образованиях терригенных формаций построено значительное число крупных ГЭС на Русской платформе (Нижне- и Верхне-Свирская, Горьковская, Саратовская и др.), но основанием плотин и других сооружений служат в большинстве случаев рыхлые породы — пески и глины. Поэтому терригенные формации мы здесь не рассматриваем. Опыт строительства крупных гидроэнергетических сооружений на отложениях, типичных для кремнистых формаций (опоках, трепелах, диатомитах),

в СССР пока отсутствует. В связи с этим остановимся здесь на рассмотрении опыта изысканий и проектирования ГЭС на двух группах формаций: карбонатных и эвапоритовых.

#### 4.2.1.1. Карбонатные формации

Главными представителями этой группы формаций являются известняковая, доломитовая и доломитово-известняковая с различным соотношением этих двух типов пород. Нередко в разрезе присутствуют также прослои или пачки мергелей и глин.

На участках развития карбонатных пород, сравнительно слабо поддающихся выветриванию, речные долины обычно имеют небольшую ширину и высокие, крутые склоны, что создает благоприятные условия для строительства плотин. По своим прочностным и деформационным свойствам карбонатные породы являются вполне надежным основанием для тяжелых гидроэнергетических сооружений. Эти обстоятельства, а также широкое распространение карбонатных пород на Русской платформе привели к тому, что они служат основанием большого числа ГЭС, построенных в этом регионе, от первенца отечественного гидростроения — Волховской ГЭС до ряда крупных гидростанций, возведенных на Волге, Днепре, Даугаве, Уфе и других реках.

Основные трудности строительства напорных сооружений на карбонатных породах связаны с развитием карста — современного и древнего, представленного различными формами, как открытыми, так и заполненными продуктами выветривания. Наличие карста создает опасность больших потерь на фильтрацию и другие трудности, о которых будет сказано ниже.

Рассмотрим некоторые характерные примеры. Первая крупная ГЭС, сооруженная на Русской платформе еще в двадцатых годах по плану ГОЭЛРО — Волховская — расположена на участке, где долина р. Волхов прорезает толщу известняков ордовика, представленную тремя пачками общей мощностью 24 м (рис. 4.2). Все разности известняков разбиты тремя системами трещин и распадаются на плитчатую отдельность разной мощности. Карст выражен кавернозностью отдельных слоев, которая придает им повышенную водопроницаемость (удельное водопоглощение до 50 л/мин). Для снижения потерь на фильтрацию и уменьшения фильтрационного противодавления при строительстве Волховской ГЭС впервые в практике гидротехнического строительства в СССР была применена цементационная завеса, дополненная дренажем в виде галереи, заложенной ниже цементационной завесы. Изыскания для строительства Волховской ГЭС позволили разработать основы комплексной методики исследований карбонатных пород при строительстве

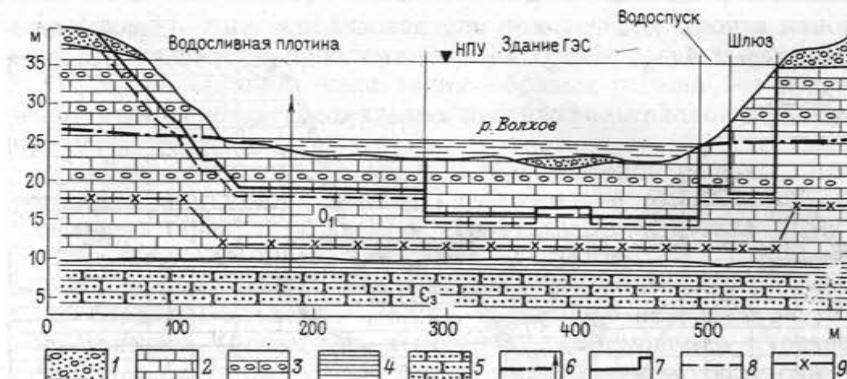


Рис. 4.2. Геологический разрез по оси плотины Волховской ГЭС. По Е. С. Карпышеву [1972]

1 — аллювиальные пески и галечники; 2 — ордовикские известняки плотные; 3 — ордовикские известняки сильноводопроницаемые; 4 — верхнекембрийские глины; 5 — верхнекембрийские песчаники; 6 — уровень и напор подземных вод; 7 — подземный контур подошвы сооружения; 8 — контур зуба; 9 — контур цементационной завесы

гидросооружений и технические решения, направленные на снижение фильтрационных потерь и противодавления.

Позднее (в 50—60-х годах) на известняках были возведены Нарвская и Плявиньская ГЭС. В основании Нарвской ГЭС [Жуковский, Каган, 1964] вскрыты те же три пачки известняков, что и на Волховской ГЭС, общей мощностью около 20 м.

Наиболее важная особенность инженерно-геологических условий строительства Нарвской ГЭС — интенсивное развитие карста. В рельфе карст не выражен и имеет преимущественно древний возраст. Главные формы карста — каверны и раскаристованные трещины, которые встречаются по всей мощности разреза карбонатных пород. Каверны преимущественно открытые, значительно реже они заполнены доломитовой мукой. Размер каверн в основном 1—2 см, реже до 10 см.

Местами наблюдается «оживание» карста, проявляющееся в выносе из трещин заполнителя и расширении карстовых пустот.

Сильнозакарстованные доломиты девонского возраста были встречены на участке строительства Плявиньской ГЭС [Белый, 1959; Пестовский, Разумов, 1972]. Карст здесь представлен глубокими вертикальными колодцами, прорезающими всю толщу доломитов до подстилающих песков, содержащих напорные воды. Колодцы образуют цепочки, приуроченные к замкам пологих антиклинальных складок, осложняющих крылья Польско-Литовской синеклизы. А. Г. Лыкошин [1968] высказал предположение о связи образования карстовых форм с разгрузкой напорных вод по трещинам, разбивающим хрупкие доломиты в замках пологих складок.

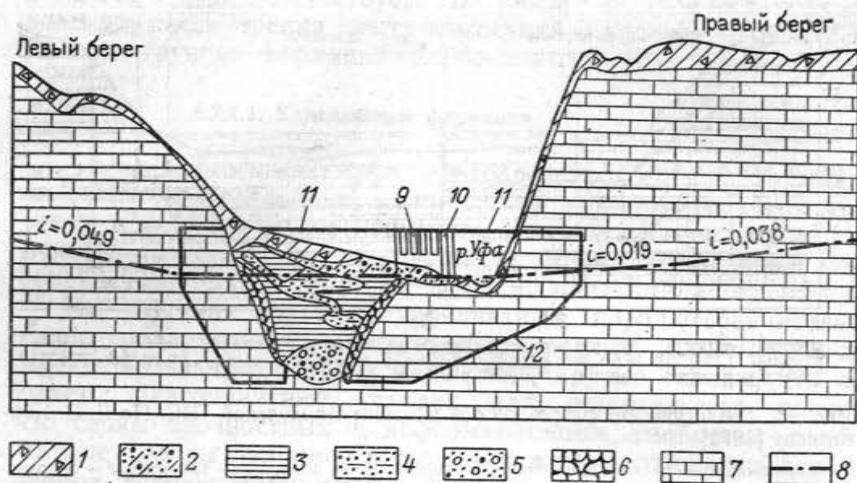


Рис. 4.3. Геологический разрез по створу плотины Павловской ГЭС. По А. Г. Лыкошину [1959]

Четвертичные отложения: 1 — делювий — суглинки с дресвой и щебнем; 2 — аллювий — пески пылеватые с гравием; неогеновые отложения: 3 — озерные глины, 4 — аллювий — пески глинистые, 5 — аллювий — пески с гравием и галькой, 6 — элювий — сильно выветрелые и разрушенные известняки; пермские отложения: 7 — известняки разных типов; 8 — уровень грунтовых вод, 9 — здание ГЭС; 10 — судоходный шлюз; 11 — земляная плотина; 12 — контур цементационной завесы.

Примером интересного решения проблем, связанных со строительством крупных гидротехнических сооружений на сильнозакарстованных породах, может служить Волжская ГЭС им. В. И. Ленина (Куйбышевская), сооруженная в районе Жигулевской дислокации. Суженный участок долины р. Волги, весьма благоприятный для строительства плотины, давно привлекал внимание гидротехников. Однако исследования показали, что весь правый склон долины, образованный Жигулевскими горами, сложен сильнозакарстованными известняками и доломитами с раскарстованными трещинами, каналами и пустотами различного размера, заполненными доломитовой мукой. Последняя, как показали опытные работы, не поддается закреплению ни одним из существующих способов мелиорации и в то же время может быть легко вымыта из пустот при напорной фильтрации. Такая обстановка заставила надолго отказаться от строительства здесь гидроузла, но позднее было найдено оригинальное решение. Разведка показала, что долина Волги в районе строительства, так же как и открывающиеся в ее овраги, переуглублены и заполнены мощной (до 200—250 м) толщей практически водонепроницаемых плиоценовых (кинельских) глин. Некоторые из таких эрозионных врезов глубоко прорезают Жигулевскую дислокацию, образуя естественные противофильтрационные завесы. Один из них — овраг От-

важненский — был использован для причленения фронта напорных сооружений, и проблема борьбы с суффозией и потерями воды на фильтрацию была таким образом решена без применения каких-нибудь специальных противофильтрационных мероприятий.

Особенно сложные инженерно-геологические условия были встречены при строительстве Павловской ГЭС на р. Уфе [Лыкошин, 1959]. На участке строительства глубокая долина р. Уфы прорезает высоко поднятое Уфимское плато, сложенное мощной толщей известняков и доломитов нижней перми. Известняки образуют слоистую толщу, состоящую из пород различного генезиса (биогенные, хемогенные, обломочные) и разной структуры (пелитоморфные, мелкокристаллические, оолитовые и др.). Вблизи современной долины разведкой обнаружена древняя переуглубленная долина р. Уфы, выполненная отложениями верхнего плиоцена — акчагыльскими песками и глинами (рис. 4.3). Толща известняков разбита горизонтальными трещинами напластования и двумя системами субвертикальных трещин отдельности на параллелепипедальные отдельности. По бортам древней и современной долин развиты также трещины бортового отпора. Большая их часть локализуется в придолинных частях склонов на расстоянии до 60—65 м, но единичные трещины этого генезиса были встречены штольней на удалении до 270 м вглубь водораздела.

При инженерно-геологической съемке было зафиксировано большое число поверхностных карстовых форм — воронок, бессточных оврагов и др., а при буровой разведке — также подземных форм, включая и небольшие пещеры. Исследования показали, что зона интенсивного карстования как бы облегает древнюю речную долину. Закарстованность правого склона долины оказалась более низкой. Детальное изучение зоны повышенной водопроницаемости позволило разделить ее дополнительно на четыре подзоны (табл. 4.1).

Выделение подзон позволило достаточно надежно определить необходимую глубину цементационной завесы.

Таблица 4.1

Расчленение зоны повышенной водопроницаемости на Павловской ГЭС. По А. Г. Лыкошину [1959]

| Показатель                     | Номер подзоны                |       |       |           |
|--------------------------------|------------------------------|-------|-------|-----------|
|                                | I (элювий и разборная скала) | II    | III   | IV        |
| Мощность, м                    | 3—5                          | 12—28 | 15—35 | 30        |
| Удельное водопоглощение, л/мин | 60                           | 7     | 3—4   | 1 и менее |

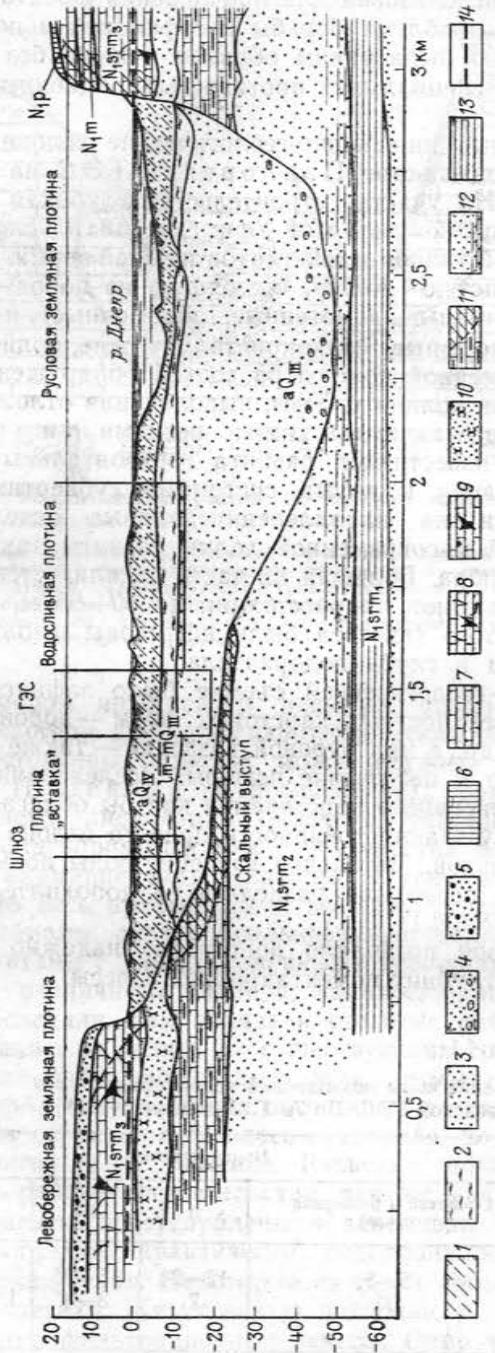


Рис. 4. Схематический геологический разрез по оси сооружений Каховской ГЭС. По Л. А. Молокову [1959].

1 — аллювиальные тонкие пески и супеси; 2 — лиманно-морские илы; 3 — мелководные аллювиальные пески; 4 — гравелистые разнозернистые аллювиальные пески; 5 — мелководные залегающие пески с дресвой; 6 — лесссы; 7 — понтические слоистые крепкие известники; 8 — мозаичные слоистые залегающие известники; 9 — верхнеэрратические тонкослоистые известники, сильноизвестняк; 10 — среднеэрратические тонкослоистые известники; 11 — среднеэрратические тонкослоистые кавернозные известники; 12 — среднеэрратические мелкозернистые пески; 13 — в основании глины; 14 — уровень грунтовых вод.

Для снижения фильтрационных потерь, противодавления и предотвращения возможной суффозии заполнителя трещин была сооружена цементационная завеса через всю долину реки, включая ее древнюю погребенную часть и разуплотненные зоны в береговых примыканиях. Общая протяженность завесы составила 1100 м при средней глубине скважин 65 м. Контрольное гидравлическое опробование и документация смотровых скважин-шахт (диаметром 915—1220 мм) показали, что, несмотря на высокую закарстованность пород, удалось достичь запроектированной плотности завесы.

Молодые карбонатные породы палеогенового и неогенового возраста были встречены на участке строительства Каховской ГЭС [Молоков, 1959а], где они, переслаиваясь с песками, слагают высокие склоны переуглубленной долины Днепра (рис. 4.4). Известняки представлены здесь различными генетическими типами, в том числе известняками-ракушечниками. Карст в известняках выражен преимущественно в форме каверн различного размера, но на левом берегу на высокой цокольной террасе под толщей аллювия были встречены также многочисленные воронки и западины. В связи с закарстованностью, приуроченной к отдельным слоям известняков, водопроницаемость последних характеризовалась повышенными и весьма непостоянными величинами. Так, в некоторых зонах значения коэффициента фильтрации достигали 500—800 и даже 1100 м/сут. Вместе с тем благодаря чередованию закарстованных слоев с незакарстованными, их выклиниванию и наличию в разрезе прослоев и линз песков и глин, водопроницаемость толщи в целом была значительно ниже. Часть карстовых каверн была заполнена продуктами выветривания — суглинистой породой различной плотности. В связи с этим создавалась опасность суффозионного вымыва заполнителя и резкого возрастания водопроницаемости толщи после поднятия напора на плотине. Однако специальные опытные работы и моделирование на ЭГДА показали, что при ожидаемых значениях гидравлических градиентов такие явления не произойдут.

Выступ известняков на левом берегу реки (см. рис. 4.5) предполагалось первоначально использовать как основание бетонных сооружений, но исследования, выполненные в кессон-лаборатории, опущенной в толщу песков до скального выступа, показали, что известняки полностью разрушены и основанием тяжелых сооружений служить не могут.

#### 4.2.1.2. Эвапоритовая (соленосная) формация

В связи с большой растворимостью галогенные породы не выходят непосредственно на поверхность в дне речных долин, а перекрываются толщами пород иного состава, главным

образом доломитами и известняками. Однако из практики строительства гидротехнических сооружений на Русской платформе известны случаи, когда и при глубоком залегании наличие галогенных пород оказывало решающее влияние на все основные проектные решения. Интересным примером в этом отношении может служить Камская ГЭС (см. рис. 1.1), выстроенная в нижнем течении р. Камы [Маменко, 1967]. Долина Камы на участке строительства прорезает толщу песчано-глинистых и залегающих ниже карбонатных пород нижней перми. В основании толщи залегает мощная толща ангидритов, перешедших в верхней части в гипс (рис. 4.5). Вся толща пород под углом около  $1^{\circ}$  падает вниз по течению реки. В результате в верхнем бьефе гипсонасные породы подходят к основанию аллювиальной толщи, образуя фильтрационное окно.

Основная опасность при строительстве напорных сооружений Камской ГЭС заключалась в возможности растворения гипсов при напорной фильтрации, что могло вызвать неравномерные осадки или даже полное разрушение сооружений. Для снижения градиентов и уменьшения расходов воды подземный контур плотины был принят весьма сложным с водонепроницаемым асфальтовым понором длиной 110 м, трехрядной цементационной завесой длиной 200 м и глубиной в среднем 60 м (до кровли толщи гипсов и ангидритов) и вертикальным глубинным дренажем из скважин большого диаметра. Дренаж обеспечил перехват воды, просочившейся через цементационную завесу, и сброс ее в нижний бьеф. Таким образом обеспечивалось формирование под телом плотины застойной зоны и существенно снижалось противодавление.

Наблюдения за плотиной в течение 25 лет эксплуатации показали следующее [Боряев, 1979]:

- осадка сооружений составила всего 14 мм;
- расход фильтрационного потока под плотиной остается практически постоянным;
- процессы опреснения и изменения химического состава подземных вод под плотиной развиваются очень медленно;
- выщелачивания прослоев и линз гипса, залегающих в толще карбонатных пород, не наблюдается.

Все это указывает на очень незначительное растворение гипсов в основании плотины, что не представляет опасности для ее нормальной эксплуатации.

Строительство Камской ГЭС доказало возможность строительства напорных сооружений на отложениях эвапоритовой формации, содержащей водорастворимые породы, и позволило разработать рациональную методику инженерно-геологических исследований и систему достаточно эффективных защитных мероприятий.

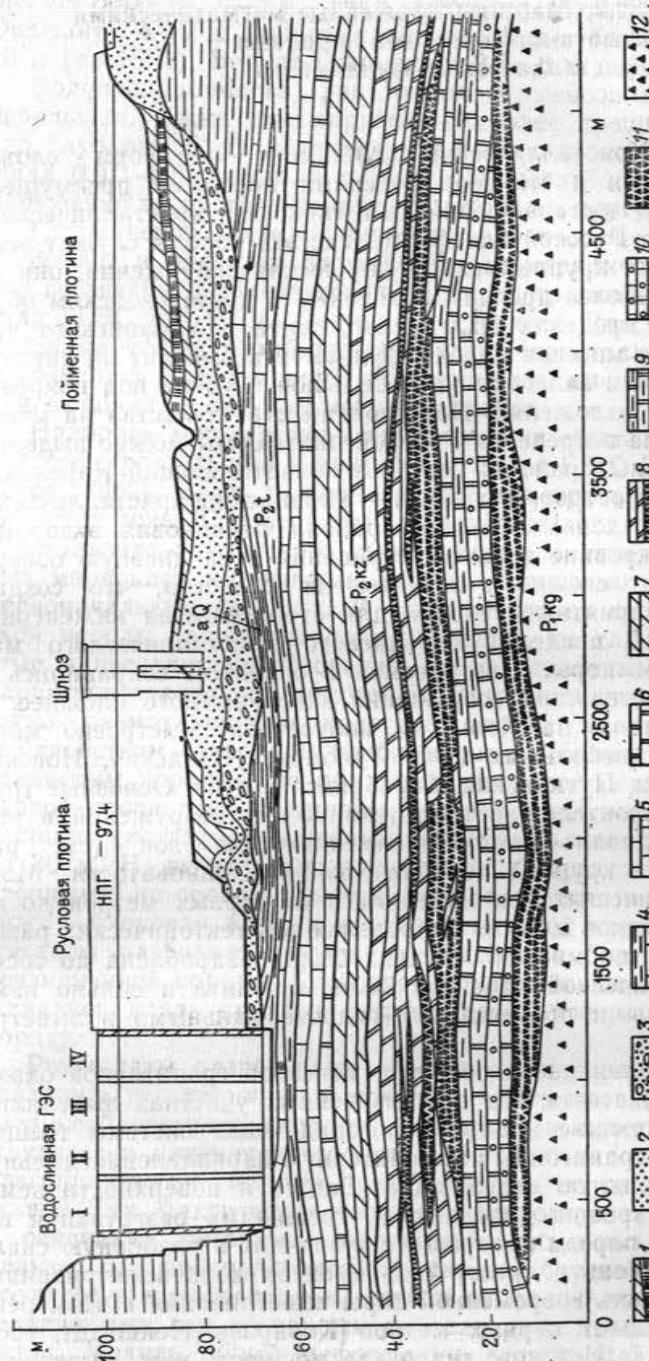


Рис. 4.5. Продольный геологический профиль по оси плотины Камской ГЭС. По Г. К. Маменко.  
aQ — аллювий; 1 — суглинки, супеси, торф; 2 — пески; 3 — галька, гравий, пески; 4 — артиллиты с прослоями известняков; P<sub>2t</sub> — татарский ярус; P<sub>2Kz</sub> — казанский ярус; P<sub>kg</sub> — кунтуровский ярус; 5 — мергели известковистые; 6 — доломиты пластичные; 7 — доломиты глинистые; 8 — доломиты; 9 — линзы гипса; 10 — доломиты глинистые; 11 — ангидриты

#### 4.2.2. Массивы, сложенные магматическими и метаморфическими породами кристаллического фундамента

Кристаллический фундамент платформ сложен магматическими и метаморфическими породами преимущественно кислого состава: гранитами, гнейсами, кристаллическими сланцами. На Русской платформе, где эти породы служат основанием многих крупных гидротехнических сооружений, они относятся к наиболее древним архейским и протерозойским образованиям. В пределах Балтийского щита и Украинского кристаллического массива породы фундамента выходят на дневную поверхность или залегают на небольшой глубине под покровом кайнозойских отложений. По условиям строительства на массивах этого типа в пределах Русской платформы можно выделить два характерных района: северный, охватывающий Карелию и Кольский полуостров, и южный — Украинский кристаллический массив. В пределах северного района ледниковая экзарация уничтожила древние коры выветривания и на дневную поверхность выходят свежие и прочные их разности, что создает весьма благоприятные условия для строительства инженерных сооружений. В пределах Украинского кристаллического массива древние коры выветривания в основном сохранились, и условия строительства сооружений здесь намного сложнее.

В Карелии и на Кольском полуострове выстроено много сравнительно небольших ГЭС: Туломская, Ондская, Иовская, Княжегубская, Путинская, Серебрянские и др. Основные трудности при строительстве гидротехнических сооружений в этих районах создавало наличие тектонических зон (см. раздел 2.2.2.2) и крупной тектонической трещиноватости. Мощность тектонических зон изменялась от первых метров до нескольких десятков метров. В пределах зон тектонических разломов порода во многих случаях была раздроблена до состояния тектонической брекции или милонита и сильно изменена вторичными процессами (гидротермальными и выветривания).

Большое влияние на свойства массивов гранитоидов оказывает трещиноватость. На всех изученных участках выделялись две крутопадающие и одна пологопадающая системы трещин, разбивающие гранитоиды на характерную параллелепипедальную или матрацевидную отдельность. Ближе к поверхности земли эти системы трещин дополняются трещинами разгрузки и выветривания и порода превращается вначале в разборную скалу, а затем в щебень и дресву (современная кора выветривания). Общая мощность современной коры выветривания в этом регионе не превышает первых метров [Конярова, Нейштадт, 1963]. Так, на участке Иовского гидроузла мощность коры выветрива-

ния составляла 1—3 м, лишь местами возрастая до 6—7 м, Ондского 4—7 м (максимально до 15 м), Княжегубского 2—10 м (до 15 м), Верхне-Туломского 0,5—6 м (до 10 м).

Водопроницаемость гранитоидов и гнейсов в этом районе небольшая. Даже для верхней, наиболее трещиноватой зоны (до глубины 10 м) величина удельных поглощений не превышала 0,01—0,05 л/мин и только в пределах зон тектонических нарушений возрастала до первых метров в минуту.

Существенно иные инженерно-геологические условия были встречены в пределах Украинского кристаллического массива, где возведены Кременчугская, Днепродзержинская и Днепровская ГЭС им. В. И. Ленина и строится Днестровская ГЭС. Здесь на толще архей-протерозойских кристаллических пород сохранилась древняя кора выветривания, имеющая значительную мощность и весьма сложное строение.

Наиболее мощная кора выветривания была встречена на участке строительства Кременчугской ГЭС [Конярова, Молоков, 1962]. Здесь в разрезе коры выветривания были выделены три зоны. С поверхности выделяется зона сапролитов, где в результате химического выветривания и замещения первичных минералов вторичными порода полностью утратила свои первоначальные свойства. В зависимости от состава материнской породы сапролиты подразделялись на глинистые, слюдистые и песчанистые. Особенно неблагоприятными свойствами характеризовались глинистые (каолинизированные) сапролиты, легко размокавшие в воде до вязкой пластичной массы. По свойствам сапролиты приближались к однотипным песчано-глинистым породам, но обладали некоторой остаточной структурной прочностью. Мощность верхней зоны на большей части площади составляла несколько метров, но местами возрастала до 30 м. Ниже залегала зона рухляка, представленная более прочными, но ослабленными и трещиноватыми породами и еще ниже — блоковая зона, в пределах которой крупные закрытые трещины разбивали массив на отдельные блоки практически неизмененной породы. Глубокие карманы выветривания прослеживались вдоль крупных тектонических трещин, рассекавших породу.

Результаты разведочных и опытно-фильтрационных работ оказались недостаточно достоверными, что вызвало в ряде случаев необходимость внесения изменений в проект сооружений. Фактически инженерно-геологические условия оказались более благоприятными, чем это представлялось по результатам изысканий. Так, фактическая площадь распространения сапролитов в основании бетонных сооружений оказалась значительно меньше, чем предполагалось по данным бурения. Свойства сапролитов в естественном залегании также оказались более благоприятными, чем по данным лабораторных исследований монолитов. Модуль общей деформации, полученный в результате

статических нагрузок на штампы, оказался равен 67 МПа, что свидетельствует о невысокой сжимаемости сапролитов.

На Днепродзержинской ГЭС [Конярова, 1962] мощность коры выветривания оказалась значительно меньше, что связано главным образом с ее размывом в пределах долины р. Днепра, а в некоторой степени, возможно, и с составом пород (здесь преобладают граниты, а не более легко выветривающиеся гранито-гнейсы).

Среднее значение коэффициента фильтрации выветрелых кристаллических пород по материалам наблюдения за водопритоками в котлованы рассматриваемых ГЭС составило 1,2 м/сут, что определило очень небольшие потери на фильтрацию. В связи со сравнительно небольшой величиной выходных градиентов (в десятки раз ниже критических) опасности вымыва заполнителя трещин также не создавалось. Тем не менее в основании сооружений были сделаны цементационные завесы, перекрывшие наиболее трещиноватую и водопроницаемую зону.

#### 4.2.3. Массивы, сложенные магматическими породами, принимающими участие в строении платформенного чехла

Магматические породы редко встречаются в составе пород платформенного чехла. Исключение составляют траппы, широко распространенные в пределах Сибирской платформы, где они образуют обширные покровы или небольшие по размеру пластовые или пологосекущие тела, получившие название *силлов*. Траппы представлены в основном диабазами — полнокристаллическими изверженными породами с характерной диабазовой (офитовой) структурой, существенно измененной вторичными процессами — (амфиболитизацией, хлоритизацией, соссюритизацией). Диабазы служат основанием многих крупных гидротехнических сооружений, выстроенных и строящихся на реках Восточной Сибири: Братской (см. рис. 1.4), Усть-Илимской и Богучанской ГЭС на р. Ангаре, Вилюйской ГЭС на р. Вилюй и др.

Силл, на котором возведена гравитационная плотина Братской ГЭС высотой 127 м залегает в толще алевролитов и песчаников ордовика (рис. 4.6), силл «Толстомысовская интрузия», на котором возведена гравитационная плотина Усть-Илимской ГЭС [Болотина, Виткина, Молоков, 1974], — в толще аргиллитов силура, песчаников и алевролитов карбона. Мощность силла под эрозионным врезом в створе Братской ГЭС, где он частично размыт рекой, не превышает 36—50 м, в створе Усть-Илимской ГЭС несколько больше, на участке Богучанской ГЭС — 80—200 м. В пределах силлов выделено не-

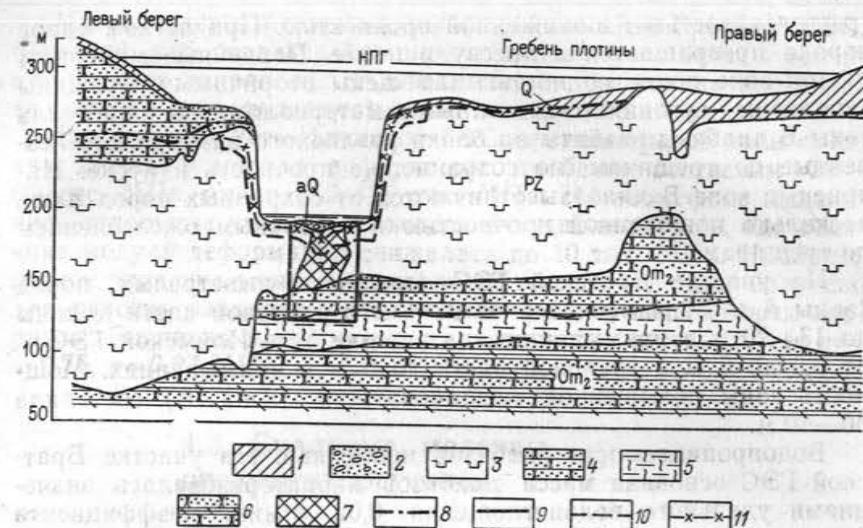


Рис. 4.6. Инженерно-геологический разрез по оси плотины Братской ГЭС. По Р. Р. Тизделю.

1 — рыхлые четвертичные отложения склонов и водоразделов; 2 — аллювиальные отложения; 3 — траппы; 4 — песчаники; 5 — алевролиты; 6 — песчаники с прослойями алевролитов; 7 — зона повышенной трещиноватости в траппах; 8 — уровень подземных вод; 9 — граница глубокой цементационной завесы; 10 — контур врезки; 11 — подошва выветрелых пород

сколько структурных разновидностей диабазов, мало различающихся по физико-механическим свойствам.

Диабазы разбиты сетью трещин, ориентировка, частота и степень раскрытия которых определяются конфигурацией отдельных частей интрузии. Трещины, развитые в пределах интрузии, относятся в основном к контракционным, образовавшимся в процессе остывания магмы. Последующие экзогенные процессы привели в основном к раскрытию существующих трещин, а образование новых трещин проявилось только в приповерхностной зоне массива. Выделены две системы вертикальных, примерно ортогональных трещин и одна субгоризонтальная, параллельная контактовым поверхностям интрузии (0—10°). До глубины 0,5—1,5 м трещины раскрыты и содержат рыхлый суглинистый заполнитель, ниже — сомкнуты или заполнены хлоритом и кальцитом. Вне зоны выветривания ширина трещин не превышает 1 мм. Судя по данным сейсмоакустических исследований, субвертикальные трещины прослеживаются на глубину до 30—50 м. Были обнаружены отдельные зоны шириной 40—70 см и протяженностью 3—6 м, где диабазы разбиты на мелкие обломки.

В строении коры выветривания на обоих описанных участках были выделены три зоны: А, Б и В. В пределах зоны А диабазы характеризуются бурой окраской, повышенной открытой

трещиноватостью и пониженной прочностью. При легком ударе порода превращается в дресву и песок. Первичные минералы в этой зоне почти полностью замещены вторичными. Трещины заполнены суглинисто-дрессвязанным материалом. В пределах зоны Б диабазы разбиты на блоки различного размера, ожелезненные по трещинам, но сохранившие прочность в куске. Наконец, в зоне В диабазы отличаются от сохранных пород лишь несколько пониженной прочностью и частичным ожелезнением по трещинам.

На участке Братской ГЭС мощность выветрелых пород (зоны А и Б) изменялась от 0—4 м в русловой части долины до 13—20 м в примыканиях, на участке Усть-Илимской ГЭС — от 0,5 до 5 м в русловой части до 6 м в примыканиях. Мощность зоны повышенной трещиноватости (зона В) составила 30—40 м.

Водопроницаемость диабазов невысокая. На участке Братской ГЭС основная масса диабазов характеризовалась значениями удельного водопоглощения 0,02 л/мин, коэффициента фильтрации — 0,05 м/сут, на участке Усть-Илимской ГЭС — соответственно 0,001 л/мин и 0,03 м/сут. Исключением являлись участки повышенной трещиноватости (см. рис. 4.6), где величина удельных водопоглощений возрастила до 5—10 л/мин (коэффициент фильтрации до 11,5 м/сут). Расчеты показали, что на Братской ГЭС потери на фильтрацию через траппы и подстилающие песчаники не превысят 2,2 м<sup>3</sup>/с, что составляет менее 1 % от среднего многолетнего расхода Ангары.

Глубокие многорядные цементационные завесы были запроектированы первоначально вдоль всего фронта напорных сооружений, но на стадии рабочего проектирования после обобщения всех имеющихся наблюдений было решено сохранить их только на участках с повышенной водопроницаемостью. На Братской ГЭС завеса была дополнена устройством двух рядов дренажных галерей, расположенных вдоль всей плотины, и двух рядов дренажных скважин. Наблюдения в первые годы эксплуатации ГЭС показали, что цементационная однорядная завеса и два ряда разгружающих скважин снимают до 86 % фильтрационного противодавления. На Усть-Илимской ГЭС ограничились устройством двух рядов дренажных скважин.

Деформационные свойства диабазов на участке Братской ГЭС изучались лабораторными методами, опытными нагрузками на штампы и сейсмоакустическими методами. Были получены следующие значения модуля общей деформации: для сохранных диабазов 27 тыс. МПа, для выветрелых 1,6 тыс. МПа. Для определения прочностных характеристик были выполнены сдвиги штампов размером 1,0×1,0 м, прибетонированных к скальному основанию (40 опытов). Испытания дали следующие значения: для сохранных диабазов  $\text{tg}\varphi=1,0$ ;  $c=0,5$  МПа; для выветрелых —  $\text{tg}\varphi=0,65$  и  $c=0,15$  МПа.

Многолетние наблюдения, выполнявшиеся на Братской ГЭС, показали, что осадка основания плотины происходит в основном за счет заполнения водохранилища и составила за 10 лет (с момента его заполнения) около 70 мм.

Для участка Усть-Илимской ГЭС для выветрелой зоны средние значения модуля деформации диабазов составили 28—60 тыс. МПа, ниже — 62—65 тыс. МПа. На этом фоне выделялись отдельные участки повышенной трещиноватости, где величина модуля деформации снижалась до 10 тыс. МПа. Наиболее низкое значение этого показателя (2 тыс. МПа) было получено для участка развития вертикальных трещин, заполненных хлоритом. Значения прочностных характеристик составили:  $\text{tg}\varphi=0,75$ ,  $c=0,27$  МПа.

### 4.3. Скальные массивы орогенных регионов

Горные сооружения можно подразделить на два основных типа: сводово-глыбовые и складчатые. Первые отвечают эпиглатформенным орогенным зонам и, как отмечает В. Е. Хайн, характеризуются абсолютным преобладанием интенсивных поднятий, средне- и высокогорным рельефом, большой (тысячи километров) протяженностью и значительной (сотни, тысячи километров) шириной. Они возникли на месте территорий, развивающихся в течение длительного времени в условиях платформенного режима. К важнейшим особенностям горных сооружений этого типа следует также отнести наличие большого числа региональных глубинных разломов, разбивающих горные массивы на блоки-ступени нескольких порядков. В некоторых регионах (например, в Забайкалье) наблюдаются также крупные надвиги древних кристаллических образований на более молодые. Внутреннее строение отдельных тектонических блоков унаследовано от платформенного этапа развития и отличается сравнительной простотой. Породы в них залегают либо горизонтально, либо формируют широкие и пологие складчатые структуры. К числу таких горных сооружений относятся значительные части Памира, Северного Кавказа, Северного Тянь-Шаня и др.

Горные сооружения второго типа отвечают геосинклинальным и эпигеосинклинальным орогенным зонам и обладают более сложным и разнообразным строением. Для них характерны также резко дифференцированные тектонические движения, поэтому они представлены высокими хребтами, чередующимися с глубокими межгорными ложбинами и котловинами. В геологическом строении таких сооружений обычно выделяется несколько структурных этажей, в пределах которых породы обладают различной степенью дислоцированности и консолидации.

Характерна также пространственная смена линейно-вытянутых зон разного строения: синклиниориев, антиклиниориев, выходов интрузивных пород разного состава и пр. В отличие от омоложенных платформ, внутреннее строение отдельных массивов отличается большой сложностью — породы смяты в складки разной интенсивности и нередко дополнительно осложнены разрывными нарушениями.

К таким горным сооружениям относятся высокие хребты Памира (Бадахшан), Тянь-Шаня, Кавказа и других горных систем.

#### 4.3.1. Массивы, сложенные осадочными породами

На первой, ранней стадии развития геосинклиналей образуется нижняя терригенная или базальная формация, представленная в низах разреза грубыми обломочными накоплениями, обычно превращенными в конгломераты и песчаники грауваккового типа, а выше по разрезу — более тонкими глинистыми осадками, превращенными в сланцы.

Для второй, зрелой или прединверсионной стадии развития геосинклиналей наиболее характерны *флишевые* (также флишоидные) и *карбонатные* формации. Основная особенность флишевых формаций заключается в наличии в них четкой градационной слоистости, создаваемой чередованием пород разного литологического состава. Широко распространен карбонатный (мергели, известняки), и нормальный терригенный (песчаники, алевролиты, глинистые сланцы) двух- или трехкомпонентный флиш.

Карбонатные формации накапливаются в условиях открытого моря, где терригенный снос ослаблен или отсутствует.

Переход геосинклинали в третью, раннеорогенную стадию развития приводит к образованию островных участков суши, которые при своем размыве обусловливают накопление нижней молассовой формации, представленной преимущественно тонкими песчано-глинистыми осадками (глинистые сланцы, алевролиты, песчаники).

Развитие геосинклиналей завершается образованием горного сооружения, подвергающегося интенсивной денудации. В эту последнюю позднеорогенную стадию развития геосинклинали происходит накопление верхней молассовой формации, которая отличается от нижней более грубыми осадками континентального или морского генезиса. Для верхней молассовой формации наиболее характерны конгломераты, образующие толщи мощностью в сотни и даже тысячи метров. Реже, в более спокойных водах, формируются толщи песков, алевролов и глинистых илов (песчаники, алевролиты, глинистые сланцы).

##### 4.3.1.1. Терригенные формации

Отложения базальной терригенной формации геосинклинального типа были встречены при строительстве Новосибирской ГЭС на р. Оби, расположенной в зоне сопряжения Салаирского кряжа и Западно-Сибирской плиты [Калинина, 1964]. Представлены они толщей слабо метаморфизованных песчаников, алевролитов, глинистых, углисто-глинистых и углистых сланцев девонского возраста, смятых в крутые складки и разбитых многочисленными дислокациями разрывного типа (рис. 4.7). Створ плотины расположен на крыле складки с почти вертикальным падением пластов.

В процессе инженерно-геологических исследований и позднее при вскрытии строительных котлованов в толще пород было установлено большое число тектонических зон мощностью от нескольких десятков сантиметров до 65 м. Так, только в котловане бетонной плотины было обнаружено 14 зон мощностью от 1 до 4 м и 19 крупных тектонических трещин. Тектонические зоны представляют собой чередование участков крепких, но сильно трещиноватых пород и песчано-щебенистой, глинисто-щебенистой или глинистой массы. Большая часть разломов совпадает с залеганием пород, но некоторые из них имеют иную ориентировку. С поверхности толща пород покрыта корой выветривания. Особенно сильно затронуты выветриванием глинистые и углистые сланцы, превращенные в щебенисто-глинистую массу. Мощность коры выветривания в русловой части сравнительно небольшая (3—8 м), но в береговых примыканиях возрастает до 25 м. Из-за трудности определения мощности сильно выветрелых и разрушенных пород в ряде случаев занижена мощность зоны съема, что привело к необходимости внесения некоторых изменений в проектные решения.

Ниже коры выветривания до глубины 30 м порода прочная, но сильно трещиноватая, ниже этой зоны порода становится практически монолитной.

Изучение водопроницаемости пород методом опытных откачек и пробных наливов показало, что в пределах выветрелой зоны удельное водопоглощение составляет в среднем 1,68 л/мин, затем уменьшается до 0,13—0,4 л/мин, а ниже 30 м — до тысячных долей литра в минуту. В зонах разломов было отмечено более высокое водопоглощение — до 8 л/мин. Для снижения потерь на фильтрацию, противодавления и предотвращения супфазионных явлений была сооружена противофильтрационная цементационная завеса глубиной от 29 до 37 м.

Песчаники в основании Новосибирской ГЭС характеризовались высокой прочностью ( $R_c = 95—110$  МПа), а глинистые сланцы — значительно более низкой ( $R_c = 40—50$  МПа). Расчетное значение коэффициента сдвига бетона по скальному основанию было принято равным 0,5.

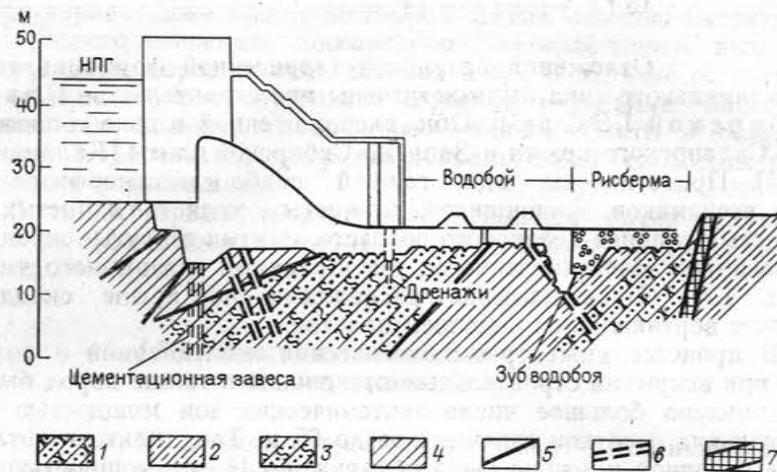


Рис. 4.7. Поперечный геологический разрез по водосливной плотине Новосибирской ГЭС. По П. И. Калининой.

1 — песчаники метаморфизованные; 2 — песчано-глинистые сланцы, чередующиеся с глинистыми сланцами, песчаниками и алевролитами; 3 — алевролиты; 4 — сланцы углистые, углисто-глинистые; 5 — тектонические трещины шириной 20—25 см, заполненные глинистым милонитом; 6 — зоны нарушений с тектонитами; 7 — милониты

Терригенные породы служат основанием и вместилищем сооружений Нурекской ГЭС (см. рис. 1.9), построенной на р. Вахш (Таджикистан). В состав гидроузла входят каменнонабросная плотина высотой 300 м, деривационные и водосбросные туннели и здание ГЭС.

В створе плотины оба склона и дно долины сложены толщей песчаников и алевролитов мелового возраста, образующих крыло крупной синклинальной складки и падающих в сторону верхнего бьефа под углом 35—40°. Песчаники грубо- и тонкослойистые, мелкозернистые, полимиктовые с глинисто-карбонатным цементом, в алевролитах преобладает глинисто-железистый цемент. Вся толща пород характеризуется значительной, но изменчивой прочностью и слабой водопроницаемостью. Временное сопротивление песчаников сжатию в водонасыщенном состоянии изменяется от 37 до 325 МПа, алевролитов — от 16 до 280 МПа. Модуль упругости обеих разностей пород изменяется от 16 до 36 тыс. МПа.

Трещиноватость песчаников вне зоны выветривания слабая. В период изысканий в массиве были выявлены три системы соскладчатых трещин, большей частью сомкнутых и небольшого протяжения (до нескольких десятков метров). Однако в подземных разведочных и строительных выработках были встречены крупные тектонические трещины, падающие примерно параллельно долине реки. Иногда по этим трещинам

фиксировались смещения с амплитудой до 0,5 м и наблюдались зоны дробления мощностью до 1 м.

По водопроницаемости в коренных породах выделено две зоны. Верхняя зона повышенной водопроницаемости с величиной удельного водопоглощения 0,01—1,5 л/мин и коэффициентом фильтрации 0,05—1,3 м/сут имела мощность от 45 м в дне долины до 120 м в бортах. Нижележащая часть массива — зона слабой водопроницаемости — характеризовалась удельным водопоглощением менее 0,01 л/мин и коэффициентом фильтрации менее 0,05 м/сут. Исходя из этих данных, глубина противофильтрационной завесы была принята в 45—120 м. Мощность зоны съема (сильновыветрелых пород) составила для песчаников 2—4 м, для алевролитов 6—8 м.

Исследования показали, что алевролиты легко поддаются выветриванию. После вскрытия котлована уже через несколько суток или даже часов порода с поверхности превращалась в дресву. В связи с этим для защиты пород от выветривания в строительных выемках и котлованах оставляли защитный слой, который удаляли не ранее чем за сутки до укладки бетона.

Под толщей меловых песчаников и алевролитов был вскрыт диапирный купол, сложенный гипсами и каменной солью. На дневную поверхность эти породы выходят в нижнем бьефе на расстоянии 0,5—1,0 км от плотины (осевая часть купола). Сооружения ГЭС расположены на склоне купола, соленосные породы вскрываются под зданием ГЭС на глубине 450 м и под плотиной на глубине более 850 м. Для изучения возможности выщелачивания солей фильтрационным потоком были выполнены специальные исследования, включавшие моделирование процесса растворения солей фильтрующимися водами. Они показали, что полный отжим рассолов, покрывающих толщу солей пресными водами, закончится под плотиной через 50 лет. После этого растворение солей может составить около 30 см за 100 лет. Под зданием ГЭС отжатие рассолов и растворение солей не будет иметь места. Расчеты были сделаны с большими допусками для повышения надежности прогнозов. Но даже если через 150 лет в кровле соленосной толщи на глубине более 850 м образуются каверны и сплошные полости высотой 30—35 см, то и это не приведет к деформации плотины.

На Нурекском гидроузле было пройдено большое число туннелей — деривационных, водосбросных, транспортных, а также несколько подземных камер большого размера (например, для размещения затворов). Общий объем подземных выемок составил примерно 3 млн. м<sup>3</sup>. Деривационные туннели имели диаметр 10—13 м и прокладывались вкrest простирания пород, т. е. в общем в благоприятных условиях. Однако проходка туннелей сопровождалась довольно крупными вывалами,

общий объем которых составил около 28 тыс. м<sup>3</sup> при величине единичных вывалов до 3 тыс. м<sup>3</sup>. Они были приурочены к пересечениям зон тектонического дробления и к участкам интенсивного выветривания алевролитов.

Весьма сложной проблемой, которую пришлось решать инженерам-геологам, проектировщикам и строителям при возведении этого гидроузла, оказалось создание водонепроницаемого ядра в плотине. Ядро шириной по основанию 135 м и у гребня 6,5 м возводилось из глинисто-щебенистых грунтов. Оно должно было обладать фильтрационной прочностью и сохранять устойчивость при сейсмических воздействиях. Для соблюдения этих условий потребовался большой объем научно-исследовательских работ по подбору состава грунтов, укладываемых в ядро, определению наиболее надежной конструкции плотины в целом и отработке технологии укладки и уплотнения грунтов. Для решения последней задачи в течение ряда лет производились отсыпка грунтов и уплотнение их различными способами на нескольких полигонах с использованием строительных механизмов. По данным этих исследований, мощность слоев отсыпаемого грунта была принята в 20—30 см, плотность грунта в ядре — около 2 т/м<sup>3</sup>. При таких параметрах материал ядра обладал суффозионной устойчивостью, невысоким коэффициентом фильтрации и следующими прочностными характеристиками:  $\phi=29^\circ$ ,  $c=0,08$  МПа.

Терригенный флиш является типичной геосинклинальной формацией и широко распространен в пределах многих горно-складчатых сооружений на территории Восточных и Центральных Карпат (в пределах СССР и ПНР), на Кавказе, в горах Средней Азии.

В Советском Союзе на флишевых отложениях пока выстроен только один гидроузел Теребля-Рикская ГЭС, расположенная в Восточных Карпатах [Молоков, 1959б].

На участке строительства мощную толщу пород палеогенового возраста прорезают долины двух небольших рек: Теребли и Рики, сближенные на одном из участков до 5 км. При этом русло р. Теребли примерно на 200 м выше, чем русло р. Рики. Эта разность высот и была использована при строительстве гидроузла: плотина и регулирующее водохранилище созданы на р. Теребле, а гидроэлектростанция — в долине р. Рики. Через водораздел проложен деривационный туннель.

Участок строительства расположен на крыле крупной антиклинальной складки, осложненной крутыми складками второго и третьего порядка (рис. 4.8). В строении складки принимают участие породы терригенного флиша с участием прочных кварцевых песчаников и алевролитов на карбонатном цементе и глинистых сланцев. В монотонном переслаивании этих пород выделяются пачки более грубого и более тонкого флиша мощ-

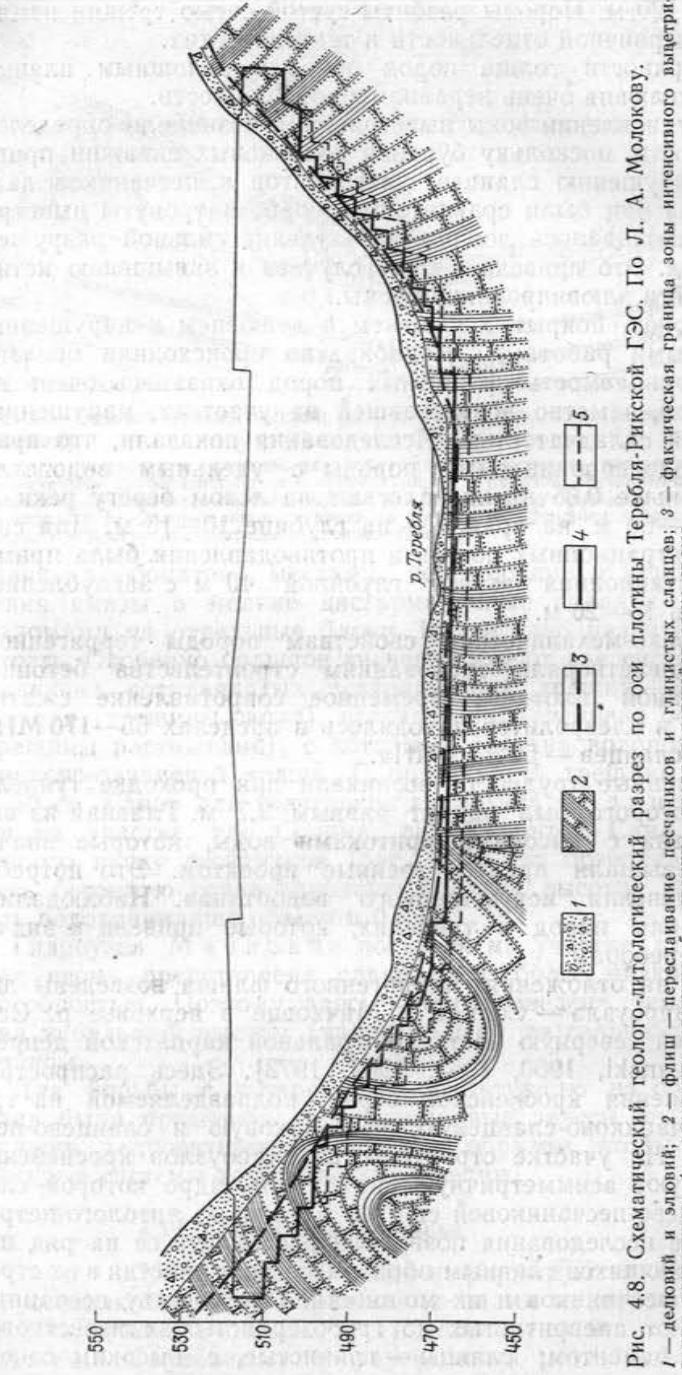


Рис. 4.8. Схематический геологический разрез по оси плотины Теребля-Рикской ГЭС. По Л. А. Молокову.  
1 — ледник и элюзии; 2 — флиш — пересыпание песчаников и глинистых сланцев; 3 — фактическая граница зоны интенсивного выветривания песчаников; 4 — основание плотины; 5 — граница предполагавшейся зоны съема

нностью до 120 м. Породы разбиты густой сетью трещин напластования, первичной отдельности и тектонических.

С поверхности толща пород покрыта сплошным плащом элювия и делювия очень неравномерной мощности.

При установлении зоны выветривания возникали определенные трудности, поскольку бурение колонковых скважин приводило к разрушению сланцев, алевролитов и песчаников даже тогда, когда они были сравнительно слабо затронуты выветриванием и создавалось ложное впечатление сильной разрушенности пород. Это привело в ряде случаев к завышению истинной мощности элювиированной зоны.

На склонах, покрытых элювием и делювием и нарушенных строительными работами, неоднократно происходили оползни.

Водопроницаемость флишевых пород оказалась очень неравномерной, заметно возраставшей на участках, нарушенных интенсивной складчатостью. Исследования показали, что практически водонепроницаемые породы с удельным водопоглощением меньше 0,05 л/мин залегают на левом берегу реки на глубине 45—50 м, на правом — на глубине 10—15 м. Для снижения фильтрационных потерь и противодавления была применена цементационная завеса глубиной 40 м с заглублением в склоны на 15—20 м.

По физико-механическим свойствам породы терригенного флиша удовлетворяли требованиям строительства бетонной гравитационной плотины. Временное сопротивление сжатию песчаников и алевролитов находилось в пределах 55—170 МПа, глинистых сланцев — 50—70 МПа.

Определенные трудности возникали при проходке туннеля, диаметр которого был принят равным 2,7 м. Главная из них была связана с высокими притоками воды, которые значительно превышали предусмотренные проектом. Это потребовало применения искусственного водоотлива. Наблюдались также вывалы пород в туннелях, которые привели к значительным переборам.

В ПНР на отложениях терригенного флиша возведены два крупных гидроузла — Солина и Мичковце в верховье р. Сан, прорезающей северную часть Центральной карпатской депрессии [Dziewanski, 1960, 1963, 1967, 1973]. Здесь распространены отложения кросненской серии, подразделяемой на три свиты: песчаниково-сланцевую, песчаниковую и сланцево-песчаниковую. На участке строительства гидроузлов кросненские слои образуют асимметричную синклиналь, ядро которой сложено сланцево-песчаниковой свитой. Детальные литологические исследования позволили расчленить ее на ряд пачек, различающихся главным образом по доле участия в их строении слоев песчаников и их мощности. По составу песчаники кварцевые, от алевритистых до грубозернистых, с известково-глинистым цементом; сланцы — глинистые, с высоким содер-

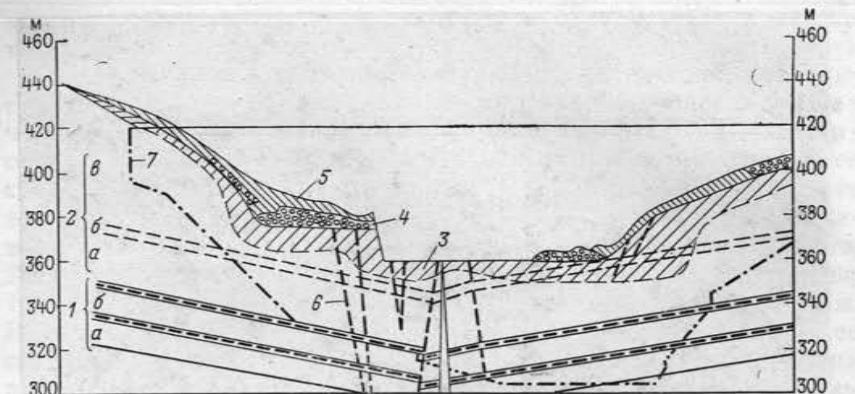


Рис. 4.9. Геолого-литологический разрез по оси плотины Солина. По Я. Дзеваньскому.

1 — серия песчаников и глинистых сланцев, кросненские слои: а — песчаники, б — сланцы; 2 — песчаники грубослоистые: а — кремнистые, б — прослой песчанико-сланцевый, в — глинистые; 3 — сильновыветрелые породы, попавшие в зону съемки; 4 — галечники средней террасы; 5 — делювиальные суглинки со щебнем; 6 — разломы и трещины бортового отпора; 7 — контур противофильтрационной завесы

жанием карбонатов, местами переходящие в мергели. Отложения смяты в мелкие дисгармоничные складки и разбиты разломами на отдельные блоки. Интенсивно развита трещиноватость. Особенно большое значение имеют две системы круто-падающих складчатых тектонических трещин — одна нормальная (трещины скола), вторая — параллельная оси складки (трещины растяжения), с которыми связана водоносность песчаниково-сланцевой толщи. С поверхности трещины раскрыты до 30 см. Створ для возведения гидроузла Солина был выбран на участке, где Солина, левый приток Саны, прорезает мощную пачку песчаников (рис. 4.9). Это позволило возвести здесь бетонную гравитационную плотину высотой 76 м и создать водохранилище объемом 0,5 км<sup>3</sup>.

Гидроузел Мичковце построен на участке, где кросненская серия представлена сланцами с более низкой несущей способностью. Поэтому здесь была возведена земляная плотина небольшой высоты (напор 15,5 м) из гравия с глиняным экраном.

Для борьбы с потерями на фильтрацию на обоих гидроузлах были применены цементационные завесы из наклонных скважин, запроектированные таким образом, чтобы перекрыть основные системы тектонических трещин.

#### 4.3.1.2. Молассовые формации

Молассовые формации формируются при замыкании геосинклиналей и образовании на их месте горноскладчатых сооружений. Молассы представлены по преимуществу грубыми обломочными образованиями различной крупности

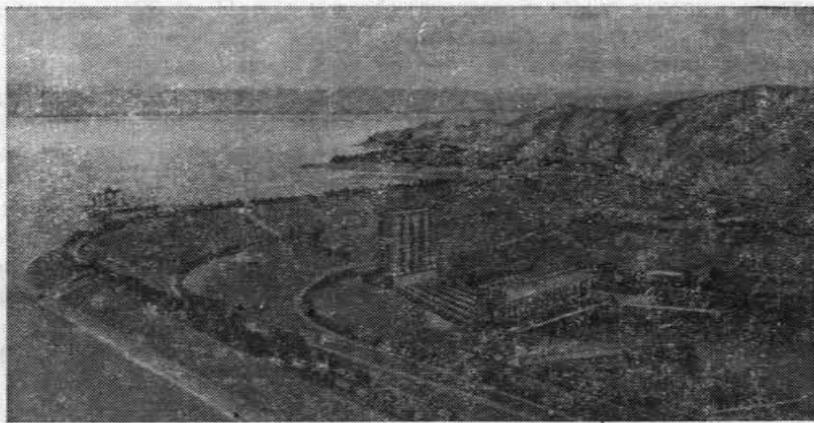


Рис. 4.10. Вид на Мингечаврскую ГЭС (фото «Информэнерго»)

и в меньшей степени глинами. Они выполняют передовые и межгорные прогибы и часто вовлекаются в орогенный процесс, образуя передовые хребты. По условиям накопления молассы могут быть как морскими, так и континентальными. В СССР широко распространены молассы, связанные с формированием горных сооружений Кавказа и Средней Азии и отвечающие по возрасту неоген-четвертичному времени, поэтому они весьма слабо изменены процессами литогенеза.

Поскольку передовые хребты в месте выхода горных рек на равнину весьма удобны для возведения плотин и создания

водохранилищ, молассы являются основанием многих гидротехнических сооружений.

В предгорьях Большого Кавказа, в пределах Куро-Араксинской впадины на р. Куре и ее притоков, построена Мингечавурская ГЭС (рис. 4.10) и строится Шамхорская ГЭС. По инженерно-геологическим условиям наиболее сложной является Мингечавурская ГЭС, возведенная в месте прорыва р. Курой крупной, осложненной надвигом, антиклинальной складки, образующей небольшой хребет длиной около 25 км и шириной 3—4 км. Ширина долины в месте прорыва 1,5—2 км, высота крутых и обрывистых склонов 200—250 м. В нижней части горловины почти параллельно правому ее склону проходят надвиг и связанная с ним мощная зона дробления. В месте прикрепления створа породы тектонически нарушены, но нарушения имеют характер локальных зон и быстро затухают с глубиной.

На участке строительства плотины залегает слоистая толща песчано-глинистого состава различной степени цементации. В процессе исследований разрез песчано-глинистых пород расчленен на большое число отдельных пластов мощностью от 0,5 до 60 м (рис. 4.11). Песчаники, принимающие участие в строении разреза, по гранулометрическому составу изменяются от тонких до грубых с включениями гравия и гальки. По петрографическому составу это полимиктовые породы с первичным глинисто-опало-карбонатным цементом. Временное сопротивление раздавливанию песчаников 0,4—0,8 МПа, показатели сопротивления сдвигу по данным полевых испытаний (средние значения):  $\phi=54^\circ$ ,  $c=0,124$  МПа.

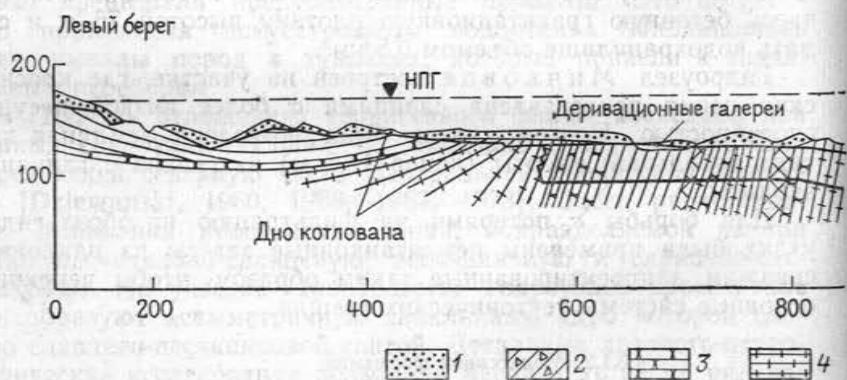
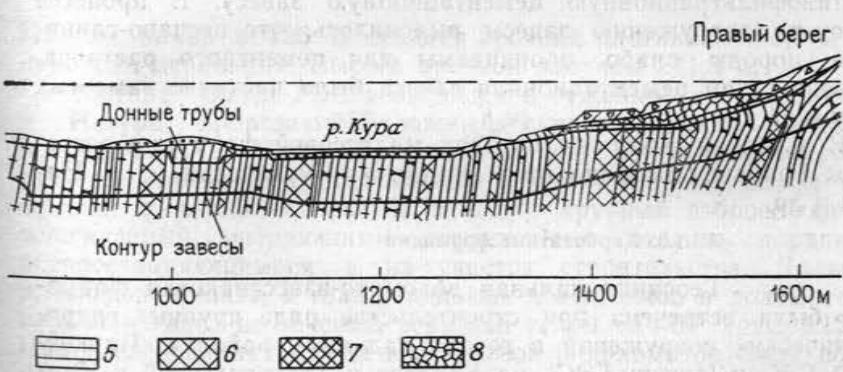


Рис. 4.11. Геологический разрез по оси плотины Мингечаврской ГЭС.

Четвертичные отложения: 1 — аллювиальные суглинки, гравий, галька и песок, делювиальный заполнителем (оползневые накопления); 2 — обломки коренных пород с суглинками глинистыми; 3 — глины; 6 — переслаивание мощных слоев песчаников, глин, алевролитов; 7 — переслаивание маломощных слоев песчаников, глин, алевролитов; 8 — тектонические нарушения.



По Л. П. Коняровой.

аллювиальные и делювиально-пролювиальные суглинки; 2 — обломки коренных пород с суглинками глинистыми; 3 — глины; 6 — переслаивание мощных слоев песчаников, глин, алевролитов; 7 — переслаивание маломощных слоев песчаников, глин, алевролитов; 8 — тектонические нарушения.

Глины монтмориллонитовые, плотные, весьма разнообразные по механическому составу и структуре. Временное сопротивление раздавливанию глин 2—5 МПа, показатели сопротивления сдвигу в слое до 5 м от основания плотины  $\phi=19^\circ$ ,  $c=0,05$  МПа, ниже —  $\phi=27^\circ$ ,  $c=0,1$  МПа.

Общая мощность коры выветривания 3—15 м. С корой выветривания связано образование «глинистого» карста, развившегося по трещинам в результате выщелачивания солей, цементирующих породу, и вымывания образующегося материала.

В этих инженерно-геологических условиях было признано целесообразным строительство земляной плотины из местных материалов. Четвертичные отложения и верхняя часть зоны коры выветривания на глубину 6—7 м в русле реки и 15—20 м в примыканиях были удалены.

Сжимаемость пород в основании плотины была определена для зоны выше уровня грунтовых вод в 4 %, ниже — в 2 %. Величина осадки при таких характеристиках пород не могла представлять опасности для земляной плотины. Величина возможного пучения глин вследствие замачивания пород зоны аэрации также оказалась незначительной.

Коэффициент сдвига плотины по естественному основанию (по результатам исследований) составил 0,47—0,50, в расчете был принят равным 0,45. Водопроницаемость пород характеризовалась значительной изменчивостью. Глины могли рассматриваться как практически водонепроницаемые породы, а водопроницаемость песчаников не превышала 69—76 м/сут. Учитывая, однако, легкую размываемость пород, наличие их в толще отдельных крупных открытых трещин, возможность химической и механической суффозии, решено было создать противофильтрационную цементационную завесу. В процессе работ по сооружению завесы выяснилось, что песчано-глинистые породы слабо проницаемы для цементного раствора, в связи с чем цементационная завеса была частично заменена битумной.

В Средней Азии на породах молассовой формации возведены Головная плотина на р. Вахш, Уч-Курганская на р. Нарын и др.

#### 4.3.1.3. Карбонатные формации

Геосинклинальная доломито-известняковая формация была встречена при строительстве ряда крупных гидротехнических сооружений в горноскладчатых районах: Чиркейской ГЭС и Ингури-ГЭС на Кавказе и Токтогульской и Чарвакской ГЭС в горах Средней Азии.

Ингури-ГЭС включает комплекс из пяти гидроэлектростанций, возводимых на р. Ингури, и самотечном отводящем канале. Напор основной станции составляет 409,5 м.

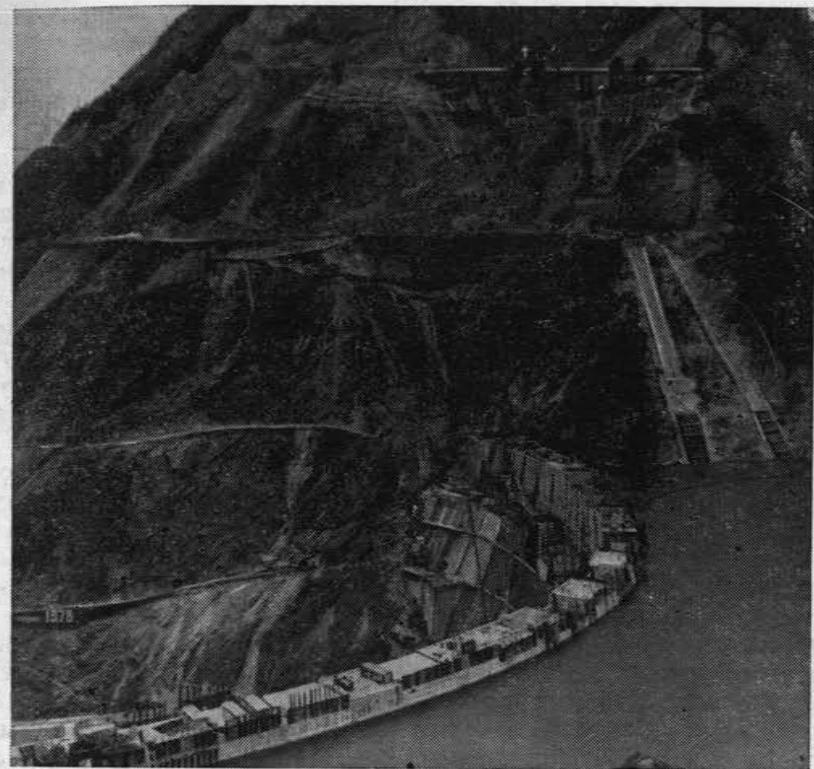


Рис. 4.12. Вид на строящуюся арочную плотину Ингури-ГЭС и правобережное примыкание, сложенное грубослоистыми известняками (фото «Информэнерго»)

Из них напор в 226 м создает арочная плотина и 183,5 м — напорная деривация. Высота арочной плотины 271,5 м.

Плотина Ингури-ГЭС возводится в суженной части долины р. Ингури, прорезающей южный склон Большого Кавказа [Ингури-ГЭС..., 1980]. В 1,5 км к югу от участка строительства проходит региональный надвиг меловых пород на юрские, а в 0,5—1,5 км к западу — крупный взбросо-сдвиг, осложненный оперяющими нарушениями второго порядка, распространяющимися и на участок строительства. Долина р. Ингури врезана в толщу меловых известняков и доломитов, падающих вниз по течению реки под углом 50—60° (рис. 4.12). При исследованиях толща известняков и доломитов была подразделена по петрографическим признакам на шесть пачек, мало различающихся по физико-механическим свойствам.

Правый склон ущелья в створе плотины осложнен разломом. Амплитуда вертикального перемещения по разлому 70—100 м, горизонтального смещения 60—80 м, угол падения

сместителя 75—80°. Зона сместителя представлена спрессованым доломитовым и известняковым песком, разбита многочисленными трещинами с зеркалами скольжения, содержит обломки и крупные глыбы вмещающих пород. Мощность зоны сравнительно небольшая: в верхней части 4—9 м, на более глубоких горизонтах 2—4 м, с местными расширениями до 16—17 м. Разлом сопровождается системой оперяющих трещин. Установлено также большое число более мелких тектонических нарушений, особенно в верхней части правого склона (над разломом). Так, в штолне, пройденной в правом склоне на глубину 150 м, встречено семь таких нарушений мощностью от 1 до 3 м. В доломитах зоны разломов выполнены преимущественно дресвой и щебнем с заполнителем из доломитового песка и муки, в известняках — щебенисто-глинистым материалом. Большее число зон дробления ориентировано по напластованию пород.

Все породы характеризуются высокой или повышенной трещиноватостью, особенно на правом берегу реки вблизи разлома. Вдоль бортов ущелья отчетливо выделяются зоны разгрузки, где тектонические трещины, особенно параллельные склонам долины реки, заметно расширены. Выделены шесть систем трещин: одна — совпадающая с напластованием и пять — пересекающих напластование под разными, преимущественно крутыми углами. На стенах трещин всех систем наблюдаются зеркала скольжения, борозды или другие следы перемещений. Большая часть трещин закрыта или заполнена спрессованными продуктами разрушения пород, образовавшимися при перемещениях.

Исследования позволили разделить весь массив пород на семь зон, различающихся по степени трещиноватости. Наименее разрушенной и трещиноватой оказалась нижняя часть обоих склонов (I зона), наиболее разрушенной и трещиноватой — верхняя часть правого склона выше разлома, где заметно сказывается его влияние (VII зона). Во всех зонах наблюдалось заметное затухание трещиноватости в глубь склона, хотя некоторое число крупных открытых трещин встречено штолнями и на расстоянии 50—100 м.

Всего в створе строительства плотины было обнаружено 25 крупных тектонических трещин с шириной раскрытия более 10 см, потребовавших применения индивидуальных мероприятий по их заделке.

При изучении физико-механических свойств пород большое внимание было уделено определению временного сопротивления образцов пород сжатию (более 1000 определений), позволявшему установить допускаемую на породы нагрузку. В результате обработки данных для выделенных зон были получены следующие значения временного сопротивления раздавливанию: от 75 МПа (наиболее слабые и разрушенные породы

VII зоны) до 110 МПа (прочные породы I зоны), в среднем по всему массиву 80 МПа. Соответственно, при коэффициенте запаса  $k=10$  значения допускаемых нагрузок были приняты от 7,5 МПа до 11 МПа, а в среднем для массива 8 МПа. Для разрушенных пород VII зоны (в направлении распора арки) допускаемое напряжение было снижено до 2 МПа.

Деформационные свойства пород исследовались методом статических нагрузок на штампы и с помощью сейсмоакустических методов. Были установлены корреляционные зависимости между величинами, определенными этими двумя способами, что позволило более детально исследовать пространственную изменчивость массива по показателям сжимаемости. Область наиболее низких значений модулей деформации (2—4 тыс. МПа) мощностью 10—15 м была выделена на поверхности обоих склонов с местными увеличениями ее мощности в пределах VII зоны. Дно ущелья и нижняя часть левого склона характеризовались значениями модуля деформации более 13 тыс. МПа, а остальная часть массива — промежуточными значениями.

Расчетные значения показателей сопротивления сдвигу были приняты для отдельных частей основания в пределах:  $\operatorname{tg} \phi$  от 0,5 до 0,7;  $c$  — 0,1—0,2 МПа (для очень прочных пород до 0,4 МПа).

Водопроницаемость пород основания плотины Ингури-ГЭС определялась главным образом степенью их трещиноватости, и на общем фоне низких значений водопроницаемости (доли литра в минуту) встречались отдельные участки и зоны, где показатели водопроницаемости заметно возрастали (до 1—2 л/мин).

Как и следовало ожидать, водопроницаемость пород на правом склоне, разбитом разломом и оперяющими трещинами, оказалась значительно выше, чем на левом. С глубиной водопроницаемость пород уменьшается, но до глубины разведки (200 м) практически водопроницаемые породы с удельным водопоглощением менее 0,05 л/мин встречены не были.

Мероприятия по укреплению естественного основания включали укрепительную цементацию на глубину 10—15 м с увеличением ее мощности в зоне разлома и выше по правому склону до 20—30 м, заделку разлома и 25 крупных трещин, а также анкеровку участков основания, пораженных сдвиготяжкими трещинами.

С целью снижения напора в нижнем бьефе плотины и предотвращения вымывания заполнителя из трещин и зон дробления была запроектирована двухъярусная цементационная засыпка глубиной 80 м в русской части и 100 м на склонах. Кроме того, предусматривалось создание многоярусных дренажных штолен в обоих бортах долины и некоторые другие дренажные мероприятия.

Другая высокая арочная плотина на Кавказе — Чиркейская выстроена на р. Сулак (см. рис. 1.7), Северный Дагестан [Кириченко, 1962]. Высота плотины 232 м. На участке строительства р. Сулак прорезает узким ущельем с почти вертикальными склонами куполообразное антиклинальное поднятие. Дно и склоны ущелья сложены верхнемеловыми плитчатыми известняками с тонкими (до 6—10 см) прослойками мергелей, мергелистых и аргиллитоподобных глин. Породы залегают спокойно, с небольшими углами падения ( $8$ — $10^\circ$ ).

Примерно в 350 м ниже створа проходит тектоническое нарушение типа сбросо-сдвига с амплитудой около 30 м, сопровождающееся мощной зоной трещиноватости. Мелкие разломы с амплитудой смещения пластов от 1 до 5 м наблюдались также на участке строительства основных сооружений.

Известняки, слагающие основание Чиркейской плотины, неравномерно трещиноваты. Наиболее интенсивная трещиноватость наблюдалась в верхней зоне разуплотнения, но открытые трещины были встречены выработками и на глубине более 100 м. Выделяются трещины напластования и две системы кругопадающих тектонических трещин: соскладчатых и диагональных. На обоих бортах ущелья, особенно на левом, примерно до 200 м в глубь склонов прослеживаются трещины бортового отпора шириной до 30 см, развившиеся по соскладчатым трещинам. Пересечение кругопадающих соскладчатых трещин с пологими диагональными трещинами приводит к образованию на склонах потенциально неустойчивых блоков, местами со следами отсыдания, но большая часть их имеет небольшие размеры. Исключение составил блок, расположенный непосредственно в створе плотины протяженностью 140 м и объемом около 250 тыс. м<sup>3</sup>. Трещинная пустотность известняков небольшая и закономерно уменьшается с глубиной, но полностью не затухает даже на глубине 100 м.

Состав заполнителя тектонических трещин разнообразен и представлен большей частью кальцитом и щебенисто-глинистыми продуктами тектонического истирания и дробления. Предполагалось, что в условиях напорной фильтрации может произойти вымывание заполнителя трещин, но исследования показали, что при ожидаемых гидравлических градиентах супфузия развиваться не будет.

Водопроницаемость известняков основания Чиркейской ГЭС небольшая. Сравнительно высокие значения водопоглощения наблюдались только в поверхностной зоне, подлежащей съему (до глубины 20 м). Средние значения коэффициента фильтрации составили: для пород левого берега 0,06—0,57 м/сут, для пород правого берега 0,12—0,64 м/сут.

Важная особенность массива известняков на участке Чиркейской ГЭС — отсутствие заметных проявлений карста. Вероятно, здесь сказались молодой возраст долины, значительная

крутизна склонов, сравнительно слабая трещиноватость известняков и наличие в них прослоев водонепроницаемых мергелей и глин.

Исследования деформационных свойств известняков с помощью статических нагрузок на штампы при нагрузках до 10 МПа дали следующие результаты: модуль общей деформации параллельно напластованию 26—31,5 тыс. МПа, нормально напластованию 11,5—29 тыс. МПа. После цементации величина модуля деформации увеличилась в 1,4—2,1 раза.

Противофильтрационная цементационная завеса из двух трёх рядов наклонных скважин в русле реки была выполнена на глубину 60—80 м и продолжена на 250—360 м в глубь бортовых примыканий. Кроме того, была проведена площадная укрепительная цементация основания плотины на глубину 15—20 м. Дренаж основания был осуществлен в виде фронтальной многоярусной дренажной завесы, расположенной на расстоянии до 40 м от оси цементационной завесы, и бортовых дренажных устройств в 50—80 м от склонов ущелья.

К одной из наиболее крупных ГЭС, возведенных на карбонатных породах, относится Токтогульская (рис. 4.13). Она построена в среднем течении р. Нарын в горах Тянь-Шаня и характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями [Токтогульская..., 1980]. Высота массивной гравитационной плотины 215 м. Долина реки на участке строительства плотины имеет характер узкого глубокого ущелья с крутыми склонами. Формирование долины происходило в несколько этапов, отвечающих периодам активизации тектонических движений. В соответствии с этим в строении склонов выделяются три части, различающиеся по возрасту, морфологии, мощности коры выветривания и другим признакам: верхняя (верхнечетвертичная), средняя и нижняя (голоценовые). Верхняя часть наиболее положена ( $35$ — $55^\circ$ ) и характеризуется широким развитием ниш отрыва обвально-оползневых тел, средняя, более крутая ( $60$ — $85^\circ$ ) прорезана многочисленными промоинами и камнепадами, нижняя имеет характер крутого, почти отвесного обрыва.

Долина р. Нарын врезана в толщу метаморфизованных, доломитизированных известняков каменноугольного периода. Она делится на несколько пачек, в строении которых принимают участие породы, различающиеся по структурным и текстурным признакам: однородные, полосчатые, пятнистые, жильчатые, брекчиевидные и др.

Массив известняков разбит многочисленными тектоническими разрывами различного размера и ориентировки. Наиболее крупные из них — Тегерекский взброс третьего порядка (относительно Талассо-Ферганского регионального разлома, который приносит за разрыв первого порядка), расположенный

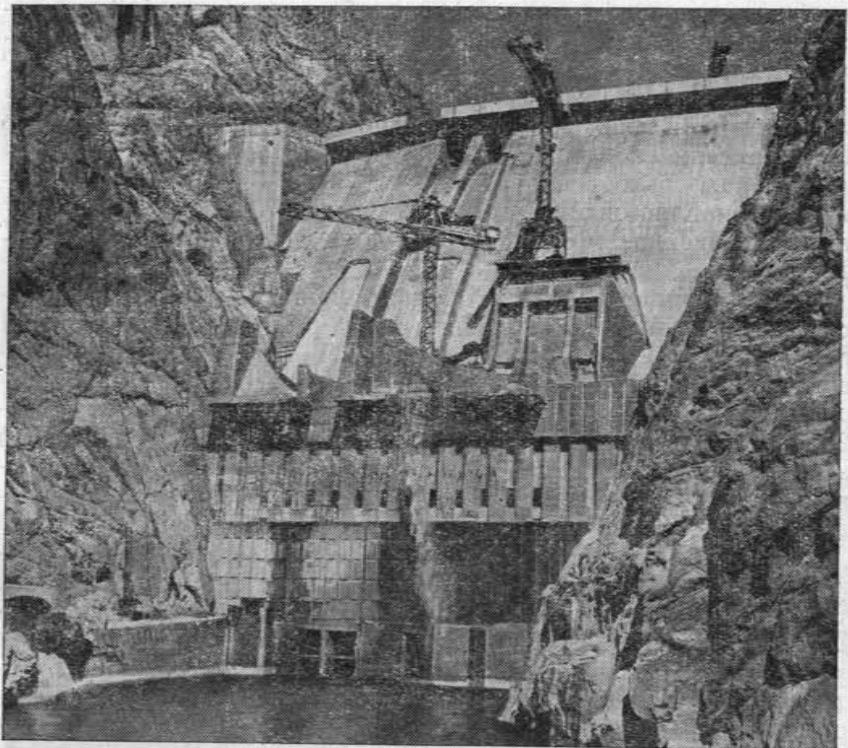


Рис. 4.13. Вид на массивную гравитационную плотину Токтогульской ГЭС (фото «Информэнерго»).

В бортовых примыканиях обнажаются известняки

на 400 м выше створа плотины, и Нижний разрыв четвертого порядка, расположенный в 500 м вниз по течению реки.

Таким образом, участок строительства расположен внутри тектонического блока четвертого порядка. В пределах блока имеется большое число более мелких разломов длиной до 500 м с амплитудой перемещения от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров. Соответственно и зона влияния таких разломов изменяется в широких пределах — от первых метров до 10 м.

Крупные разломы дополняются интенсивной трещиноватостью известняков, включающей различные генетические типы трещин. Широко развиты тектонические трещины, связанные со складкообразованием и разрывными нарушениями. В процессе исследований было выделено восемь систем тектонических трещин различного размера и ориентировок, среди которых встречаются как трещины отрыва, так и трещины скола. На стенах многих трещин имеются следы перемещений. За-

полнитель тектонических трещин представлен тектонической брекчией, милонитом, глинкой трения.

В связи с наличием глубокого эрозионного вреза на участке строительства интенсивно развиты трещины бортового и донного отпора. В склонах долины преобладают крутонаклонные трещины, в дне — пологонаклонные. В нижней части склонов трещины в основном локализуются в толще пород мощностью до 40 м в глубь склона, в средней до 60 м и в верхней — до 120 м. Трещины отпора образовались в основном за счет раскрытия и удлинения тектонических и в меньшей степени литогенетических трещин. Ширина их изменяется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, но некоторые трещины превращены вследствие гравитации и сейсмических воздействий в зияющие расщелины, отделяющие крупные блоки пород. Заполнитель трещин бортового отпора представлен материалом, образовавшимся за счет выветривания стенок трещин или вымывания в трещины поверхностных наносов.

Величина трещинной пустотности в пределах тектонических разрывов составляет 0,6—1,6 %, в пределах структурно-тектонических блоков 0,3—0,6 %. В том и в другом случаях она закономерно уменьшается с глубиной. Близость регионального сейсмоактивного глубинного разлома определяет высокую сейсмичность района строительства гидроузла. Обобщение имеющихся материалов и постановка специальных исследований показали, что на участке строительства могут происходить землетрясения силой 9 баллов с вероятностью один раз в 3—15 тыс. лет.

Исследования по изучению напряженного состояния массива и моделирование на оптических моделях позволило выделить в склонах долины четыре характерные зоны:

а) растяжения, переходящую в основании бортов, где скаживается давление перекрывающих толщ, в сжимающие. Эта зона охватывает поверхность часть дна долины и склонов. Мощность ее изменяется от 5—10 м в дне долины и нижней части склонов до 100—150 м в верхней (на высоте 200—300 м над дном долины);

б) пониженных сжимающих напряжений. В основании склонов она сливается с предыдущей зоной, а в верхней части склона достигает 100-метровой мощности;

в) повышенных сжимающих напряжений. У основания склонов мощность ее не превышает 30 м, а выше по склону увеличивается до 40—50 м;

г) постоянных напряжений. Зона занимает центральную часть водоразделов.

Величина напряжений изменяется от 5 МПа (растягивающие напряжения в пределах верхней зоны) до 156 МПа (сжимающие напряжения в зоне повышенных напряжений).

Деформационные свойства известняков изучались с помощью сейсмоакустических методов, статических нагрузок на штампы и прессиометрии. Были установлены корреляционные зависимости между значениями статического модуля деформации, определяемого с помощью штамповых испытаний, и динамического, устанавливаемого методами сейсмоакустики, что позволило распространить данные точечных испытаний, выполненных на характерных участках, на весь массив. Была установлена анизотропия известняков по деформационным свойствам, обусловленная трещиноватостью. Самые низкие значения модуля деформации получены в направлении, нормальном к борту долины и системе трещин бортового отпора, наиболее высокие — параллельно борту долины. Величина модуля общей деформации в пределах структурно-тектонических блоков составила от 4,5 до 15 тыс. МПа, в пределах зон тектонических нарушений — от 1 до 6 тыс. МПа.

Прочностные свойства пород были определены с помощью сдвигов целиков и бетонных штампов по породе. Показатели, характеризующие отдельные типы нарушений, приведены для трещин с разным заполнителем в табл. 4.2.

Исследования водопроницаемости пород с помощью откаек из одиночных скважин и поинтервальных нагнетаний показали, что она зависит от возраста склона и закономерно уменьшается с глубиной. Значения коэффициента фильтрации в пределах структурно-тектонических блоков составляют сотые и тысячные доли метров в сутки, в пределах тектонических зон они увеличиваются до 0,5—2,0 м/сут.

Отметим, что на участке строительства плотины было установлено около 30 потенциально неустойчивых блоков пород, отчлененных от склонов трещинами бортового отпора. Объем отдельных блоков изменялся от 30 тыс. м<sup>3</sup> до 1 млн. м<sup>3</sup>, общий объем достигал 9 млн. м<sup>3</sup>. Расчеты показали, что трудозат-

Таблица 4.2

Показатели сопротивления сдвигу по трещинам с различным заполнителем. По М. Л. Кагану, В. В. Каюкину, В. З. Чечету и Л. А. Молокову

| Вид поверхности ослабления               | Заполнитель                   | Показатели сопротивления сдвигу |           |
|--|-------------------------------|---------------------------------|-----------|
|  |                               | $\operatorname{tg} \varphi$     | $c$ , МПа |
| Тектонические разрывы четвертого порядка | Глина трения                  | 0,60                            | 0,055     |
| То же                                    | Монолит, брекчия трения       | 0,60—0,80                       | 0,055—0,2 |
| Крупные экзогенные трещины               | Суглинисто-дресчевый материал | 0,70                            | 0,060     |

раты на укрепление таких массивов соизмеримы с работами по возведению всего гидроузла. В связи с этим было принято решение допустить обрушение массивов, обеспечив соответствующими мероприятиями сохранность напорного фронта.

Для выравнивания деформаций основания плотины были применены железобетонные решетки в наиболее крупных разломах и трещинах и индивидуальная цементация таких зон под давлением (40—60) 10<sup>5</sup> Па. Для предотвращения супфозии заполнителя из трещин в нижнем бьефе, где величина гидравлического градиента достигала 10, было предусмотрено применение противофильтрационных шпонок в наиболее крупных разломах и трещинах и дренажных устройств.

Свообразные инженерно-геологические условия наблюдались при строительстве Чарвакской ГЭС на р. Чирчик в Узбекистане [Калмыкова, Молоков, 1962]. Район строительства ГЭС расположен в пределах юго-западных отрогов Тянь-Шаня. Ширина долины, имеющей на участке строительства характер ущелья, 350—600 м, высота крутых скалистых склонов 200—250 м. Оба борта и дно долины сложены каменноугольными известняками, смятыми в синклинальную складку, ось которой примерно совпадает с направлением долины. В ядре, и на крыльях складки наблюдаются складки второго порядка, а в ядрах последних — еще более мелкие складки (дисгармоническая складчатость), ориентированные вдоль направления долины. Углы падения пластов на крыльях складок высших порядков изменяются от 30 до 90°. Разрывные нарушения типа сбросов с амплитудой 90—100 м были выявлены на правом склоне долины.

В толще известняков были выделены две разновидности: известняки массивные, толстослоистые, слагающие нижнюю часть правого склона и известняки тонкослоистые, с прослойками глин и мергелей, слагающие верхнюю часть правого склона, левый склон и дно долины. В толще известняков были встречены в виде неправильной формы разобщенных тел своеобразные и малоизученные породы гидротермально-пневматолитического генезиса, получившие название каранкулитов. Это полускальная кремнистая порода, состоящая на 80—90 % из кремнекислоты и на 5—15 % из полуторных окислов алюминия и железа. В отличие от известняков, каранкулиты легко выветриваются и размокают в воде, при извлечении на поверхность быстро превращаются в землистую массу. В профиле долины каранкулитам отвечают расширенные участки с выпуклыми склонами. Объемная масса этой своеобразной породы изменяется от 1,4 до 2,0 г/см<sup>3</sup>, временное сопротивление раздавливанию 6—88 МПа (в среднем 15 МПа). Каранкулиты практически водонепроницаемы. В пределах долины р. Чирчик было встреченено два больших тела каранкулитов (одно из них мощностью более 270 м) и большое число мелких

(мощностью до 60 м). С вмещающими породами каранкулиты связаны постепенными переходами, что типично для пород гидротермально-пневматолитического генезиса. Контакты вмещающих пород с каранкулитами уходят почти вертикально на большую глубину.

В известняках выделены литогенетические и тектонические трещины напластования. Они развиты весьма широко и разбивают породу на отдельные пласты мощностью от 1 до 30—40 см. Ориентировка и углы падения трещин зависят от их положения относительно элементов складок высших порядков и от формы последних. Ширина трещин уменьшается от 10—50 мм в зоне выветривания до нескольких миллиметров или долей миллиметра на глубине 15—20 м. Трещины напластования дополняются секущими внутрипластовыми трещинами первичной отдельности, разбивающими известняки на крупноплитчатую отдельность.

Установлены также три системы тектонических трещин разной пространственной ориентировки с углами падения 10—90°. В зоне выветривания они зияющие, шириной до 30—50 мм, ниже — шириной 1—3 мм, в той или иной степени заполненные песчано-глинистым материалом. Как показали наблюдения в штольнях, коэффициент трещинной пустотности уменьшается от 2—4 % на глубине 10—12 м до 1—2 % на глубине 20—25 м.

Известняки закарстованы. Наиболее интенсивная закарстованность наблюдается на контакте между известняками и телами каранкулитов, а также на участках, осложненных мелкой складчатостью. В глубь склона карстовые полости прослеживаются на 50 м и более. Сильно разрушенные закарстованные породы были встречены в русле реки на глубине 35 м. Большая часть карстовых полостей заполнена песчано-глинистым материалом.

### 4.3.2. Массивы, сложенные метаморфическими породами

К группе метаморфических относят породы осадочного и магматического генезиса, глубоко измененные различными эндогенными процессами (метаморфизмом). Изменения эти проявляются в частичной или полной перекристаллизации пород, распаде первичных минералов и замещении их вторичными, более устойчивыми в новой термодинамической обстановке. В результате порода, сильно измененная метаморфизмом, отличается от первоначальной по всем признакам (минеральному составу, структуре и текстуре), которые определяют ее инженерно-геологические свойства.

В зависимости от условий и факторов, определяющих развитие процессов метаморфизма, различают метаморфизм региональный, динамический, контактный, гидротермально-пневмати-

ческий и др. Наиболее важное практическое значение имеет региональный метаморфизм, связанный с погружением пород на значительную глубину (в подвижных зонах земной коры) и сопровождающим его значительным возрастанием геостатической нагрузки и температуры. Региональный метаморфизм обычно сопровождается динамическим, обусловленным развитием в толще пород мощных односторонних тектонических напряжений. В результате регионального и динамического метаморфизма образуются наиболее распространенные типы метаморфических пород — метаморфические и кристаллические сланцы, гнейсы. В зависимости от генезиса исходных пород их дополнительно подразделяют на парасланцы и парагнейсы, образовавшиеся за счет осадочных пород, и ортосланцы и ортогнейсы, связанные с изверженными породами.

Контактовый метаморфизм вызывается тепловым и химическим воздействием на вмещающие породы крупных магматических тел. Примером этого типа метаморфизма может служить образование грейзенов на контакте с интрузией гранитов, наблюдавшееся в основании сооружений Сергиевской ГЭС. Гидротермально-пневматолитический метаморфизм связан с преобразованием пород под воздействием горячих растворов и газов. Примером может служить образование каранкулитов в толще известняков, слагающих основание Чарвакской ГЭС (см. раздел 4.3.1.3).

Из сооружений, возведенных на толще метаморфических пород, рассмотрим ГЭС Наглу на р. Кабул в Афганистане [Калачев, Чечот, Молоков, 1972], построенную по советскому проекту при участии советских специалистов. На участке строительства долина р. Кабул имеет характер глубокого ущелья, врезанного в толщу моноклинально залегающих (под углом 60—70°) парагнейсов, отличающихся по структуре и составу. На правом берегу развиты в основном крупно- и мелкочковые гнейсы с линзами и прослоями мраморизованных известняков, на левом — тонкокристаллические биотитовые гнейсы с подчиненными прослоями роговообманковых и очково-полосчатых гнейсов и гранито-гнейсов.

Вне зон тектонических нарушений и выветривания породы характеризуются высокой прочностью. Временное сопротивление сжатию образцов неизмененных пород не падало ниже 60 МПа.

Массив гнейсов разбит нарушениями двух генераций: древними, предположительно герцинскими, и молодыми, предположительно альпийскими. Древние нарушения представляют собой сбросы с амплитудой до 25 м, залеченные гранитной магмой и имеющие в настоящее время характер жил и даек гранит-аппарата. Молодые, альпийские нарушения являются секущими или близкими к пластовым и представляют собой сбросо-сдвиги с амплитудой, изменяющейся от первых метров до

десятков, а в единичных случаях до сотен метров. Встречаются и такие нарушения, где породы только раздавлены и обладают повышенной трещиноватостью, но без следов смещения. Наиболее крупное нарушение с зоной дробления мощностью 4—7 м было вскрыто в русле реки под толщей аллювия. Помимо крупных тектонических нарушений отмечены также зоны ослабления («деградированные гнейсы») с открытыми трещинами, заполненными продуктами выветривания, приуроченные к контактам пород различной прочности (мраморизованные известняки — гнейсы, гнейсы — гранит-аплит и др.).

С зонами тектонических нарушений связана повышенная трещиноватость пород. Трещины в основном заполнены пылевато-слюдистым или песчано-глинистым материалом, реже (в поверхностной части массива) они открытые. Зоны разломов и дробления являются путями для глубокого проникновения в толщу пород агентов выветривания. Поэтому породы, выполняющие зоны разломов или прилегающие к ним, сильно выветрелы, легко разламываются в руке и размокают в воде.

Среди трещин, разбивающих массив пород, было выделено шесть систем: одна — трещин напластования и пять систем тектонических трещин с различными азимутами и углами падения. Вблизи дневной поверхности трещины почти всех систем зияющие или выполнены продуктами выветривания.

На склонах долины наблюдаются гравитационные перемещения крупных блоков пород, отделившихся по системам трещин. Выше и ниже по течению створа плотины был зафиксирован ряд крупных блоковых оползней объемом в некоторых случаях до 450 тыс. м<sup>3</sup>.

Для оценки пород в отношении пригодности их использования как основания плотины была разработана классификация пород по степени сохранности, приведенная в табл. 4.3.

Породы I и II групп сохранности не поддаются цементации и являются нестойкими в суффозионном отношении. Специальные опыты показали, что суффозионные явления начинаются при градиенте около 0,5, а при градиенте 0,9 происходит массовое вымывание заполнителя. Породы III—IV групп сохранности поддаются укрепительной цементации, при этом их деформационные и прочностные характеристики повышаются в 1,5—2 раза. Породы V группы искусственного укрепления не требуют.

Для выравнивания деформационных и сдвиговых характеристик основания и предотвращения суффозионных деформаций породы I и II групп были удалены, а глубже по всему основанию плотины была выполнена площадная цементация в русле и на правом берегу до глубины 10—15 м, на левом (в зоне разуплотнения) — до 35 м.

Расчетные характеристики прочности пород были приняты с учетом цементации: для левобережной секции плотины, рас-

Таблица 4.3

Классификация пород по степени сохранности на участке плотины Наглу.

По Б. Б. Калачеву, В. З. Чечоту, Л. А. Молокову [1972]

| Номер группы | Характеристика породы   | Среднее расстояние между трещинами, м | Площадь блоков, м <sup>2</sup> | Модуль общей деформации $E_0$ , МПа | Коэффициент внутреннего трения | Сцепление $c$ , МПа |
|--------------|---|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| I            | Перетертый глинисто-щебенистый материал зон тектонических нарушений и контактных зон и заполнитель крупных трещин | —                                     | —                              | 150                                 | —                              | —                   |
| II           | «Деградированная» скальная порода   | 2—10                                  | до 2                           | 400                                 | 0,77                           | 0,02                |
| III          | Мелкоблочная скальная порода, легко разбивающаяся кайлом  | 11—30                                 | 2—10                           | 1 800                               | 0,82                           | 0,27                |
| IV           | Среднеблочная порода  | 30—50                                 | 10—50                          | 5 000                               | 1,7                            | 0,27                |
| V            | Крупноблочная порода  | 50                                    | 50                             | 15 000                              |                                |                     |

положенной в зоне разгрузки, —  $\operatorname{tg} \phi = 0,7$ ,  $c = 0,02$  МПа, для русской и правобережной частей —  $\operatorname{tg} \phi = 0,7$ ,  $c = 0,2$  МПа. Тектонические зоны были выбраны на глубину 3—5 м и заделаны бетоном.

Сильная трещиноватость пород обусловила высокую и неоднородную водопроницаемость массива. В верхней выветрелой зоне и зоне разуплотнения на левом борту значения коэффициента фильтрации изменялись от 2 до 50 м/сут (местами до 160 м/сут), вдоль зон тектонических нарушений в русле и бортах долины от 2 до 20 м/сут, вне этих зон снижались до десятых и сотых долей метра в сутки.

В связи с большой неоднородностью пород по степени водопроницаемости была применена цементационная завеса сложной конструкции. На левом борту в зоне разуплотнения и частично в верхней части правого борта она сделана двухрядной, причем один ряд выполнен вертикально, второй — под углом 60° вкрест простирации пород с тем, чтобы пересечь возможно большее число открытых трещин. Вне зоны разуплотнения принята однорядная вертикальная завеса. В зоне разуплотнения на левом берегу завеса доведена до глубины 100 м и

является «висячей», т. е. не достигает пород с низкой водопроницаемостью (менее 0,05 л/мин). Для снятия фильтрационного противодавления в подошве плотины за цементационной завесой заложены дренажные скважины глубиной 30—40 м.

Левобережный откос был укреплен анкерованием на глубину 20 м, для чего использовалась одна из штолен.

Другим примером гидроузла, сооруженного на метаморфических породах, может служить Саянская ГЭС на р. Енисее (Западный Саян) (см. рис. 1.8). В состав сооружений гидроузла входит арочно-гравитационная плотина высотой 236 м.

Район строительства находится в пределах крупного антиклиниория, сложенного метаморфическими породами протерозоя. При инженерно-геологическом районировании территории в пределах этого антиклиниория выделен Джойско-Кибинский структурный блок шириной 20—25 км. Основные сооружения расположены в центральной его части. Детальные геоморфологические исследования, дополненные высокоточными геодезическими наблюдениями, показали, что дифференциальных тектонических движений в пределах этого блока не наблюдается. Сейсмическая опасность участка оценена в VII баллов.

В пределах створа плотины оба берега и дно долины сложены пара- и ортосланцами, слагающими крыло антиклинальной складки, падающее под углом 70—80° в сторону правого берега реки. Выше по течению в долине Енисея на дневную поверхность выходит гранитная интрузия, полого погружающаяся под толщу сланцев. На контакте с интрузией сланцы претерпели интенсивный метаморфизм. Непосредственно вдоль контакта с интрузией в полосе шириной около 100 м тянется зона сильного ороговикования, переходящая в зону среднего ороговикования шириной около 1 км. Основные сооружения гидроузла расположены в пределах второй зоны. В результате ороговикования все разности сланцев характеризуются повышенной прочностью. Средние значения временного сопротивления сжатию составляют: в воздушно-сухом состоянии 125 МПа, в водонасыщенном 140 МПа; скорость продольных волн 5430 м/с, модуль упругости 55 тыс. МПа.

Подземные воды в массиве скальных пород образуют единый безнапорный водоносный горизонт, дренируемый рекой. Уклон зеркала подземных вод довольно высок (0,4—0,6), что свидетельствует о сравнительно слабой трещиноватости массива пород.

Массив скальных пород рассечен семью системами трещин, из которых пять систем крутопадающих, одна — пологих (углы падения 5—35°) и одна — наклонных (35—55°) трещин. Для мелкой трещиноватости характерны небольшое раскрытие (до глубины 40 м трещины шириной менее 1 мм составляют 70—90 %) и отсутствие рыхлого заполнителя. Зона интенсивного

выветривания пород (зона съема) на левом берегу составила 15 м, в русле 5 м и на правом берегу 10 м. Мощность зоны разуплотнения пород на левом берегу до 40 м, в русле до 60 м и на правом берегу до 30 м. На обоих берегах в русле выявлены крупные пологие тектонические трещины. Для массива в целом приняты расчетные значения  $\operatorname{tg} \phi = 1$  и  $c = 0,5$  МПа, а при совпадении направления сдвига с плоскостью тектонических нарушений  $\operatorname{tg} \phi = 0,7$  и  $c = 0,05$  МПа.

В данных инженерно-геологических условиях было признано целесообразным возведение плотины арочно-гравитационного типа. В основании плотины и на левом берегу для выравнивания податливости основания была предусмотрена площадная цементация до границы зоны разуплотнения с сохранными породами, характеризующимися величинами модуля деформации более 16 тыс. МПа. На правом берегу такая цементация производилась на разобщенных участках. Потери на фильтрацию в основании и примыканиях были оценены в 21 м³/с. Для снижения потерь воды на фильтрацию и противодавления была создана противофильтрационная завеса, глубина которой в основании плотины достигала 100 м.

#### 4.3.3. Массивы, сложенные вулканогенными породами

На территории СССР наиболее широко распространены два типа формаций вулканогенных отложений: кайнотипная андезито-базальтовая и ее палеотипный аналог — порfirитовая (андезитовых и базальтовых порfirитов).

Андезито-базальтовая формация распространена в районах активной вулканической деятельности в неоген-четвертичное время в Закавказье, на Дальнем Востоке, в Приморье, на Камчатке. Наиболее полно образования этой формации изучены при строительстве каскада сооружений на р. Раздан в Армении. Комплекс вулканических образований представлен здесь несколькими потоками базальтов, андезито-базальтов и андезитов, переслаивающихся со шлаковыми зонами и вулканическими выбросами (туфы, туфосланцы, туфобрекции, пемзы, обсидианы), а также толщами аллювиальных отложений. Мощность лавовых потоков изменяется от 10 до 70 м, мощность вулканических выбросов обычно не превышает 10—15 м.

В качестве примера на рис. 4.14 приведен разрез толщи эфузивов по оси плотины Арзинской ГЭС [Нейштадт, 1962], где она представлена двумя потоками андезито-базальтов, разделенных небольшой шлаковой зоной.

Сходное строение имеет андезитово-базальтовая формация в районе Ереванской ГЭС [Белый, 1959; Тольконников, 1974], где разрез толщи начинается плиоценовыми долеритовыми

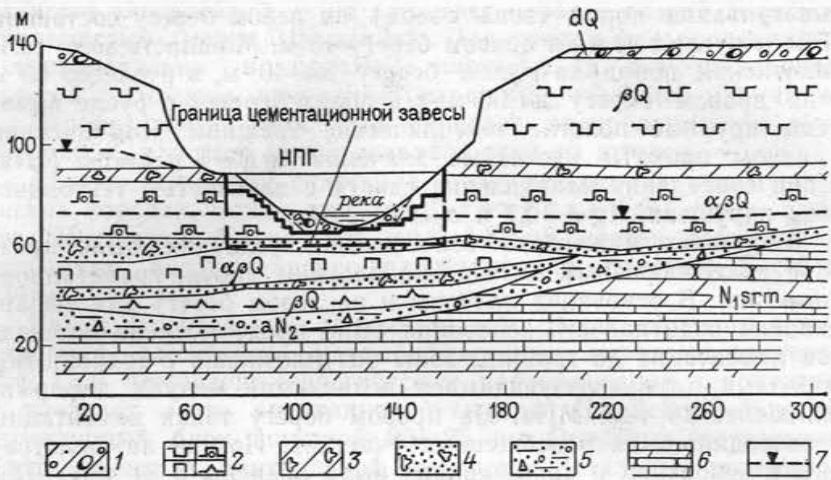


Рис. 4.14. Геолого-литологический разрез по оси плотины Арзинской ГЭС. По Л. И. Нейштадт.

1 — современные аллювиальные и делювиальные отложения; 2 — базальты и андезитобазальты различных типов; 3 — шлаковая зона; 4 — оплавленные глыбы и щебень с песчано-суглинистым заполнителем; 5 — вулканические выбросы: щебень и дресва базальта с песчано-глинистым заполнителем; 6 — древнеаллювиальные отложения; 7 — сарматские глины и мергели с прослойками известняков и песчаников; 7 — уровень грунтовых вод

базальтами, лежащими на обожженных красно-бурых глинах. Они перекрываются нижнечетвертичными озерно-аллювиальными глинами и суглинками с линзами галечников, а последние — четвертичными эфузивами, представленными тремя потоками базальтов и одной размытой и разрушенной толщей туфов. Мощность потоков изменяется от 15 до 75 м. Еще более сложное строение имеет эфузивная толща на участке строительства Храми ГЭС-I на р. Храми (приток Куры), где в ее разрезе выделено семь покровов лав мощностью 10—15 м.

Как видно из приведенных примеров, основными членами рассматриваемой формации являются лавы базальтового, андезитового и андезито-базальтового состава. Базальты относятся к числу наиболее плотных и прочных пород. Плотность их достигает  $3,3 \text{ г}/\text{см}^3$ , объемная масса  $3,0 \text{ г}/\text{см}^3$ , прочность на раздавливание — до 500 МПа. Наряду с этим встречаются пористые, сравнительно слабые разности базальтов с прочностью на раздавливание, не превышающей 20 МПа. Близки по свойствам к ним андезито-базальты, андезиты и долериты, прочность которых зависит в большой степени от их минерального состава, структуры и текстуры.

В составе описываемого парагенеза часто присутствуют также пемзы и обсидианы. Пемзы представляют собой очень легкую крупнопористую породу невысокой прочности, со-

стоящую из крупнопузырчатого или волокнистого стекла. Обсидианы также представляют собой вулканическое стекло, но более плотное и однородное.

Отложения вулканических выбросов представлены туфами, туфосланцами, туфобрекциями, агломератами, состоящими из твердых продуктов вулканических извержений (пепла, песка, лапиллей, бомб), а также уплотненных и сцементированных обломков пород невулканического происхождения. Эти породы классифицируются по размеру обломков (агломератовые, псевфитовые, псаммитовые и др.), составу (базальтовые, андезитовые и др.), форме обломков и другим признакам.

Физико-механические свойства этих пород изменяются в широких пределах. Рыхлые разности приближаются по свойствам к несцементированным щебенистым, песчаным или алевритовым накоплениям, сцементированные нередко мало уступают по прочности отвечающим им по составу излившимся породам.

Все разности вулканогенных образований в той или иной степени трещиноваты. Преобладают трещины первичной отдельности (контракционные), связанные с уменьшением объема пород при их остывании. В зависимости от состава и режима остывания породы распадаются на отдельности различной формы. В лавовых потоках долины р. Раздан были выделены брекчие-видная, мелко- и крупностолбчатая, пучковатая и другие виды отдельности. Наиболее тонкой трещиноватостью характеризовались брекчие-видные базальты, наиболее крупной и открытой — толстостолбчатые. Ширина трещин между «столбами» нередко достигала 5—10 см, а внутри «столбов» сохранялась монолитность.

За относительно короткий срок существования неоген-четвертичных эфузивов на них сформировалась сравнительно небольшая по мощности кора выветривания — от долей метра до первых метров. Выветривание проявляется в раскрытии существующих и образовании новых трещин, постепенном снижении прочности пород и образовании на поверхности блоков тонкой глинистой корки.

Водопроницаемость эфузивов зависит от трещиноватости и мощности зоны разуплотнения, в пределах которой развиты открытые трещины. Существенную роль играет также степень заполнения трещин продуктами выветривания, которые у основных эфузивов имеют глинистый состав.

На участке строительства Ереванской ГЭС коэффициент фильтрации плиоценовых базальтов изменялся от 0,1 до 21,7 м/сут, при среднем значении 2,45 м/сут, четвертичных базальтов — от долей метра в сутки в верхней части толщи до нескольких тысяч метров в сутки на контакте с подстилающими галечниками и в местах, где имелись открытые трещины. Среднее значение коэффициента фильтрации для всей толщи было принято равным 10 м/сут.

Водопроницаемость вулканических выбросов обычно меньше водопроницаемости эфузивов. Так, на участке Арзинской ГЭС удельное водопоглощение вулканических выбросов составило в среднем только 0,075 л/мин, а коэффициент фильтрации, по данным лабораторных исследований, — 0,0002 м/сут. Это позволило считать вулканические выбросы водоупором. Так же была оценена и шлаковая зона.

Для уменьшения потерь на фильтрацию и предотвращения механической супфозии на всех плотинах Разданского каскада были созданы многорядные цементационные завесы глубиной до 35 м. В отношении устойчивости и деформируемости эфузивы опасений не вызывали, поэтому здесь была применена только поверхностная укрепительная цементация на глубину 2 м.

В ГДР на толще эфузивов выстроен гидроузел Пель [Hänichen, 1959]. Массивная гравитационная плотина, входящая в состав гидроузла, высотой около 57 м, возведена в долине р. Триб, притоке р. Вейссе Эльстер (Фогтланд). Основанием плотины служат диабазовые туфы, состоящие из сильно уплотненных и скементированных пепла, песка, лапиллей, бомб и невулканического обломочного материала. В целом основание плотины было оценено как вполне надежное, но в толще туфов был вскрыт ряд рудных жил (железо-марганцевых и сульфидно-медных), частично отработанных еще в XV столетии. Крутопадающие жилы мощностью до 1,5 м ориентированы в основном вдоль долины реки (рис. 4.15). В процессе изысканий непосредственно в створе плотины на глубине около 25 м была обнаружена частично обрушившаяся штолня, выше которой все отработанное пространство было заполнено пустой породой. Судя по сохранившимся материалам, на глубине около 50 м должна была находиться штолня нижнего яруса, но положение ее с помощью разведочных выработок (шахты с квершлагами) и буровых скважин установить не удалось.

Наличие отработанных жил и подготовительных выработок создавало угрозу больших потерь на фильтрацию и потребовало выполнения сложного комплекса противофильтрационных мероприятий. Отработанное пространство было очищено от выполняющей его породы и заполнено бетоном. Наклонная шахта и квершлаги до отметок ниже предполагаемого положения второй штолни были также заполнены бетоном. Кроме того, была создана противофильтрационная цементная завеса до глубины 30 м. В целом эти мероприятия полностью себя оправдали. Рассмотренный случай является, по-видимому, единственным примером строительства плотины над заброшенными горными выработками.

При строительстве ряда ГЭС была встречена палеотипная порfirитовая формация, представленная в основном пироклас-

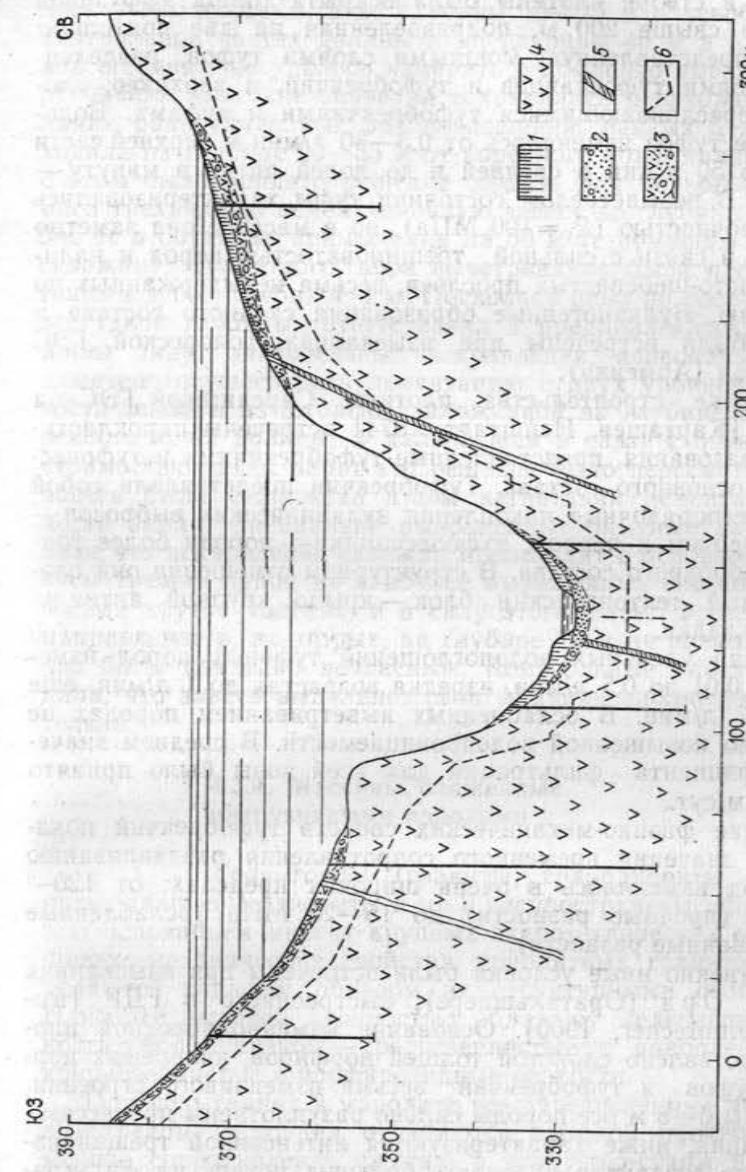


Рис. 4.15. Геолого-литологический разрез по оси плотины Пель (ГДР).  
1 — элювий; 2 — аллювиальный материал; 3 — диабазовые конгломераты и брекчи; 4 — песчано-гравийный заполнитель; 5 — выветрельные; 6 — врезка плотины, частично отработанная; бурные жилы, частично отработанные;

тическими образованиями, отвечающими по составу андезито-базальтам.

Характерным примером может служить Ириклинская ГЭС, где в створе плотины была вскрыта толща эфузивов мощностью свыше 200 м, подразделенная на две подтолщи: нижнюю, представленную мощными слоями туфов, разделенными прослойками туфосланцев и туфобрекций, и верхнюю, сложенную переслаивающимися туфобрекциями и туфами. Водопоглощение туфов изменялось от 0,3—30 л/мин в верхней части разреза до 50 л/мин в средней и до долей литра в минуту — в нижней. В невыветрелом состоянии туфы характеризовались высокой прочностью ( $R_c = 100$  МПа), но в массиве она заметно снижалась в связи с сильной трещиноватостью пород и наличием глинисто-щебенистых прослоев, весьма невыдержаных по простирианию. Вулканогенные образования сходного состава и строения были встречены при изысканиях Толорской ГЭС на р. Сисиан (Армения).

На участке строительства плотины Сарсангской ГЭС на р. Тертер [Карташев, Нейштадт, 1974] встречены пирокластические образования, представленные туфобрекциями и туфопесчаниками основного состава. Туфобрекции представляли собой мощные беспорядочные накопления вулканических выбросов — бомб со щебнем и пеплом, туфопесчаники — породу более тонкого и однородного состава. В структурном отношении они слагали единый тектонический блок — крыло крупной антиклинальной складки.

Величина удельных водопоглощений туфовых пород изменилась от 0,01 до 0,5 л/мин, изредка возрастая до 1 л/мин, еще реже до 7 л/мин. В ослабленных выветриванием породах не обнаружено повышенной водопроницаемости. В среднем значение коэффициента фильтрации для всей зоны было принято равным 2 м/сут.

Изучение физико-механических свойств туфобрекций показало, что значения временного сопротивления раздавливанию этих пород изменялось в очень широких пределах: от 120—160 МПа (прочные разности) до 15—20 МПа (ослабленные рассланцеванные разности).

Существенно иные условия были встречены при изысканиях гидроузла Ора (Оратальшпера), выстроенного в ГДР [Rudeloff, Steinbrecher, 1960]. Основание каменнонабросной плотины представлено слоистой толщей порфиров, кварцевых порфиров, туфов и туфобрекций весьма изменчивого строения. До глубины 6—8 м все породы сильно разуплотнены процессами выветривания, ниже характеризуются интенсивной трещиноватостью, что создавало опасность больших потерь на фильтрацию. Были выявлены три системы открытых трещин, заполненных песчано-щебенистым материалом. Для оценки трещиноватости использовались два показателя: выход керна и удельное

водопоглощение, но корреляции между этими показателями установить не удалось, поэтому пришлось полагаться в основном на результаты нагнетаний. Водопоглощение пород оказалось очень высоким, и до глубины 10—15 м в левобережной и центральной частях долины и до глубины 40 м в правобережной его даже не удалось измерить с помощью имевшегося оборудования. Высокие значения сохранялись и глубже. Так, изолинии равноудаленных водопоглощений, равных 5 л/мин, проходила на глубине 20—55 м от коренного ложа долины. В связи с этим было принято решение создать для борьбы с фильтрацией трехрядную цементационную завесу до глубины 70 м, углубив ее в бортовые примыкания на 50 м (с помощью наклонных скважин). Кроме того, кора выветривания была прорезана бетонным зубом глубиной 4 м. Поскольку опыт по сооружению забес такой глубины отсутствовал и предполагалось, что скважины дадут значительные искривления, первоначально было намечено осуществлять цементацию с двух уровней: с поверхности земли и из штолни, заложенной на глубине 35 м от коренного ложа долины. В дальнейшем в связи с очень большой стоимостью таких работ это решение было пересмотрено, и вся завеса была сооружена путем нагнетания цемента с поверхности земли. Специально выполненные опытные работы показали, что искривление скважин происходит в основном под влиянием трещин одной из наиболее выраженных систем, имеющих весьма крутое падение, и в силу этого имеет, во-первых, одно направление и, во-вторых, на глубине 70 м не превышает 2,6 м, что было признано безопасным. Контрольные работы подтвердили, что завеса выполняет свои функции вполне удовлетворительно.

#### 4.3.4. Массивы, сложенные интрузивными породами

Гранитоиды (граниты, гранодиориты, плагиограниты, кварцевые диориты и др.) распространены широко и служат основанием многих крупных гидротехнических сооружений. Физико-механические свойства монолитных гранитоидов определяются главным образом их структурными особенностями. Наиболее высокой прочностью обладают мелкозернистые разности, более низкой — среднезернистые и наиболее низкой — крупнозернистые и порфировидные разности.

При испытаниях в монолите все перечисленные породы в невыветрелом состоянии отличаются высокой прочностью. Временное сопротивление сжатию в воздушно-сухом или водонасыщенном состоянии образцов пород этой группы превышает, как правило, 100 МПа и обычно находится в пределах 120—200 МПа. В массиве свойства гранитоидов определяются в основном степенью их выветрелости и трещиноватости.

Граниты девонского возраста были встречены на участке строительства Красноярской ГЭС [Леонов, Мазуров, Пирогов, 1967]. Здесь преобладают средне- и мелкозернистые разности гранитов, прорванные многочисленными дайками диабазовых порфиритов, сиенитов мощностью от нескольких сантиметров до 5—7 м. Граниты и жильные породы местами подверглись каолинизации, а местами также окремнению. Так, временное сопротивление сжатию неизмененных гранитов составило 110—130 МПа, каолинизированных и окремненных 70—80 МПа, а каолинизированных 30—60 МПа. Сильно каолинизированные породы превращены в глинисто-щебенистую массу, прочностные свойства которой в связи с трудностью отбора образцов определить не удалось. Каолинизированные и каолинизированно-окремнелые породы залегают в виде зон, совпадающих с простираемием даек и разрывных тектонических нарушений и направленных под углом к створу плотины. С поверхности граниты изменены процессами выветривания. Мощность зоны интенсивно выветрелых пород изменяется от первых метров до 10—15 м, возрастаая в пределах разломов, жил, зон каолинизированных пород, где образовались «карманы выветривания». Мощность коры выветривания определила мощность зоны съема. Однако фактическая зона съема под некоторыми сооружениями оказалась больше, чем это предусматривалось проектом. Основными причинами увеличения мощности зоны съема явились: неровность поверхности коренных пород в русле реки, разуплотнение и выветривание вследствие длительного разрыва во времени между вскрытием котлована и укладкой бетона, большая интенсивность взрывных работ.

В гранитах были установлены три основные системы трещин: две — крутопадающих трещин, пересекающихся почти под прямым углом, и одна — разноориентированных пологих трещин с углами падения 15—20°. Интервал между трещинами в зависимости от структурно-тектонических условий отдельных участков колебался от 0,1 до 2 м. Трещины расчленяют граниты на блоки плитчатой, матрацевидной, параллелепипедальной формы.

Массив гранитов в створе плотины пересекает под косым углом крупный разлом типа сдвига, с почти вертикальным падением. В нарушенной зоне порода превращена в милонит и тектоническую брекчию суммарной мощностью от 0,1 до 4 м. Разлом сопровождался зоной повышенной трещиноватости пород. Суммарная мощность измененных и тектонически нарушенных пород составила 10—12 м. Установлен ряд более мелких разломов с мощностью милонитов от 0,1 до 1 м. Милониты представляют собой плотную глинисто-щебенистую массу, размокающую в воде.

Водопроницаемость гранитов изменилась в широких пределах. Для неизмененных гранитов с умеренной трещинова-

тостью вдали от тектонических зон удельные водопоглощения находились в пределах 0,1—1 л/мин, для каолинизированных и каолинизированно-окремненных разностей, обладающих повышенной трещиноватостью — до 1—5 л/мин. В крыльях круто-падающих тектонических зон, где имеются пологонаклонные трещины отрыва, удельные водопоглощения достигали десятков и сотен литров в минуту.

Деформационные характеристики гранитов были определены опытными нагрузками на штампы. Для слаботрещиноватой породы модуль деформации составил 16 тыс. МПа, для среднетрещиноватой — 9 тыс. МПа и для сильнотрещиноватой 4,5 тыс. МПа. Значения прочностных характеристик были приняты согласно СН-123—60:  $\text{tg } \varphi = 0,7$ ;  $c = 0,3$  МПа, что хорошо согласовывалось с результатами опытных работ.

При проектировании большое внимание было уделено главному разрывному нарушению, которое могло существенно осложнить распределение напряжений в плотине и привести к появлению растягивающих напряжений на контакте ее верховой грани с основанием. Для снижения этого эффекта нарушение было заделано бетонной пробкой на глубину 15 м. Наличие многочисленных тектонических разломов, крупных трещин разгрузки, зон каолинизации, которые имели характер дрен или барражей, создавали большую фильтрационную анизотропию основания, существенно усложняли распределение противодавления на тело плотины и затрудняли осуществление противофильтрационных мероприятий. Создавалась также опасность суффозионного вымыва заполнителя из трещин и милонита из зон разломов. Для предотвращения этих явлений и выравнивания противодавления были применены двухрядная цементационная завеса до глубины 60 м и глубинный дренаж в виде двух рядов скважин глубиной до 40 м, расположенных за завесой. Для предотвращения суффозии проведена также усиленная цементационная блокада каолинизированных и милонитизированных зон. Для придания монолитности основанию, разбитому пологонаклонными трещинами на отдельные плиты, и для выравнивания осадок плотины использовалась укрепительная цементация на глубину 20—30 м от подошвы плотины.

Граниты мезозойского возраста были встречены при изысканиях строящейся Буреинской ГЭС на р. Бурея (приток р. Амура) с бетонной плотиной высотой 142 м. Характерной особенностью массива гранитов на участке строительства является интенсивная трещиноватость и большое число разрывных нарушений, в пределах которых порода разрушена до тектонической брекции или милонита. Мощность зоны интенсивного выветривания гранитов составила в русле реки 1—8 м, на склонах долины 4—5 м. Водопроницаемость гранитов заметно уменьшается с глубиной. В интервале глубин до 35 м удельное водопоглощение изменялось в пределах 0,01—5 л/мин, в интервале

35—80 м — не превышало 0,1 л/мин, а граница зоны с водопоглощением менее 0,01 л/мин была установлена на глубине 80—100 м. Граниты характеризуются высокой прочностью. Временное сопротивление сжатию свежей породы составляет в среднем 200 МПа. Цементационная завеса доведена до глубины 50—70 м.

Диориты были встречены на участке Зейской ГЭС на р. Зея [Горянский, Шпаковский, 1974]. Основанием сооружений служит нижнепалеозойская интрузия диоритов, прорванная жилами мезозойских андезитовых порфиров и лампрофиров. Массив диорита ограничен крупным разломом, заложенным в палеозое, но проявлявшим признаки оживления вплоть до верхнего мела. Разлом пересекает долину р. Зеи и является главным тектоническим нарушением региона. Длительный и сложный процесс развития разлома оказал существенное влияние на степень раздробленности массива.

В структуре массива отчетливо проявляются две фазы тектогенеза, сопровождавшиеся образованием разломов и трещин: нижнепалеозойская и мезозойская. Первая вызвала интенсивное раздробление и милонитизацию пород, но в результате последующей гидротермальной деятельности трещины и разломы были залечены, что восстановило монолитность массива. Вторая фаза привела к образованию тонкой трещиноватости и отдельных крупных тектонических трещин и разломов, в пределах которых породы раздроблены до глыб, щебня, дресвы с глинкой трения. Исследования позволили выявить шесть систем крупных трещин. В штолнях через каждые 10—20 м встречались зоны дробления мощностью до 0,2 м, реже 1—3 м и изредка до 5—8 м. На участке основных сооружений были встречены в общей сложности 12 разрывных нарушений мощностью более 0,5 м. С поверхности диориты покрыты корой выветривания мощностью от 2—3 м в русле реки до 10—15 м, местами до 20 м в бортах долины. Современные тектонические движения не установлены.

Массив диоритов весьма неоднороден по фильтрационным свойствам: водопоглощение в скважинах изменяется от 0,005 до 100 л/мин. Высокие водопоглощения были встречены в небольшом числе пунктов и на разных глубинах (трещины). Центральные части разломов, заполненные глинкой трения или милонитом, в большинстве случаев слабоводопроницаемы, внешние, представленные трещиноватой породой, характеризуются, наоборот, повышенной водопроницаемостью.

Сдвиговые характеристики установлены натурными испытаниями с помощью штампов. Расчетные их значения были приняты следующие:  $\text{tg } \phi = 0,70$ ;  $c = 0,2$  МПа. По сжимаемости диориты подразделены на слаботрещиноватые с модулем деформации 50 тыс. МПа и раздробленные породы тектонических зон с модулем деформации 5 тыс. МПа.

Габбро широко распространены на Урале, Алтае и в пределах других горнокладчатых сооружений, где они образуют крупные лакколиты, штоки и интрузивные тела другой формы. Постепенными переходами габбро связаны с диоритами.

Габбровые массивы явились основанием Бухтарминской и Усть-Каменогорской ГЭС, построенных в пределах Рудного Алтая.

На участках строительства Усть-Каменогорской ГЭС, возведенной на р. Иртыше [Васильева, 1959], интрузия габбровых пород прорывает толщу девонских метаморфических сланцев и вскрывается в склонах и русловой части речной долины. Габбро характеризуется мелко- или среднезернистой структурой и массивной однородной текстурой. В толще габбро наблюдаются дайки диабазов, гранит-порфиров и многочисленные жилы кварца, аплита и пегматитов.

На участке Бухтарминской ГЭС [Конярова, Нейштадт, 1963] габбро образуют пластовые интрузии в толще сильнодислоцированных метаморфических сланцев. Процессы метаморфизма вызвали сильное рассланцевание габбро и частичное замещение первичных минералов вторичными. Местами габбро превращены в амфиболиты. Последующая интрузия гранитов еще больше осложнила строение габбрового массива, вызвав образование тектонических трещин различной мощности (от волосных до 1,5—2 м) с последующим формированием кварцево-кальцитовых жил.

На участке Усть-Каменогорской ГЭС габбровый массив изменен меньше, но разбит системой крутопадающих мелких разломов и крупных тектонических трещин, прослеживающихся на значительную глубину. Вдоль тектонических нарушений образовались зоны катаклизированных и милонитизированных пород мощностью до 5—10 м. Выветривание, распространившееся по зонам разломов на десятки метров в глубь массива, превратило милониты в землистую щебенисто-глинистую массу. Особенно мощные узлы милонитизации и выветривания наблюдаются в местах пересечения тектонических зон. Между разломами и тектоническими трещинами расположены участки неизмененной прочной породы, разбитой трещинами отдельности на отдельные блоки объемом 1—3 м<sup>3</sup>.

В строении кор выветривания, развитых на габбровых массивах в пределах участков строительства обеих ГЭС, выделяются на две зоны:

- верхняя, мощностью 3—5 м, в пределах которой габбро разрушены до состояния щебня с песчано-глинистым заполнителем;
- нижняя, мощностью 6—10 м, где порода превращена в разборную скалу.

Суммарная мощность коры выветривания изменилась от первых метров в русловой части долины до 10—15 м

в примыканиях. В пределах зон дробления и милонитизации, а также на участках развития амфиболитов (Бухтарминская ГЭС) мощность коры выветривания возрасла до 20—25 м. При строительстве верхняя выветрелая и сильнотрещиноватая зона пород была удалена на глубину 10—22 м.

Исследования показали, что породы в зонах тектонических нарушений, превращенные в щебень, дресву и глину, обладают меньшей водопроницаемостью, чем трещиноватые вмещающие породы. Так, водопоглощение в тектонических зонах не превышало 0,1 л/мин, а в породах с трещинами отдельности, примыкающих к этим зонам, было на порядок выше. Для уменьшения фильтрационных потерь и снижения противодавления на основание плотин были применены многоярусная противофильтрационная цементационная завеса, вертикальный дренаж и площадная цементация основания.

Габбро представляют собой прочную скальную породу. Минимальные значения временного сопротивления сжатию образцов габбровых пород на Бухтарминской ГЭС, где они заметно изменились вторичными процессами, составило 110 МПа, на Усть-Каменогорской ГЭС — 125 МПа в водонасыщенном и 190 МПа в воздушно-сухом состоянии. Коэффициент сдвига для основания Бухтарминской ГЭС был принят равным 0,70, для Усть-Каменогорской 0,75.

#### 4.4. Массивы, сложенные многолетнемерзлыми скальными породами

До недавнего времени массивы мерзлых скальных пород считались не менее надежным основанием, чем талые, но неоднократно наблюдавшиеся деформации сооружений,строенных на таких основаниях, заставили пересмотреть эту точку зрения [Каган, Кривоногова, 1978]. Поведение мерзлых скальных оснований во взаимодействии с инженерными сооружениями определяется главным образом наличием в них льда, заполняющего поры, каверны, трещины, пустоты. Поскольку значительная пористость свойственна только немногим осадочным и эфузивным породам, а каверны и полости встречаются лишь в закарстованных карбонатных породах, наиболее широко распространен лед, заполняющий трещины.

Промерзание скальных пород происходит эпигенетически, т. е. после образования пород и рассекающих их трещин и других полых форм, поэтому можно было бы ожидать, что содержание в них льда не будет превышать нормальной трещинной пустотности, характерной для пород того или иного типа, находящихся в определенной тектонической обстановке. Однако высокие значения льдистости, полученные при изучении массивов

скальных мерзлых пород, и большая величина осадок при их оттаивании свидетельствуют о расщепленности скальных пород и значительном превышении содержания льда над такими цифрами. Механизм этого явления выглядит в схеме следующим образом. В теплое время года вода, насыщающая породы и заполняющая трещины, находится до глубины 3—6 м в жидким состоянии, в зимнее время она постепенно замерзает, причем фронт промерзания продвигается в основном сверху вниз. В результате в средней части слоя вода оказывается в условиях закрытой системы, и в ней развивается значительное по величине давление.

Расчеты и опыты показывают, что уже при температуре, равной минус 0,1°C, давление в воде достигает 1,2 МПа, что примерно соответствует весу призмы скального грунта высотой 5 м. При температуре минус 1°C эта величина возрастает до 12 МПа и продолжает быстро увеличиваться по мере дальнейшего падения температуры [Каган, Кривоногова, 1978]. Это приводит к тому, что вода раздвигает и приподнимает блоки породы и образует жилы инъекционного льда. Поскольку смена промерзания и оттаивания земной коры в некоторых районах СССР происходила неоднократно, а фронт промерзания то интенсивно продвигался в глубь толщи пород, то задерживался, подвергаясь осцилляциям, и вода переходила из жидкого состояния в лед и обратно, можно полагать, что процесс расщепления и разуплотнения пород должен был затронуть в той или иной степени скальные массивы в этих районах на довольно значительную глубину.

Расщепление проявляется не только в увеличении раскрытия и длины уже существующих трещин, но и, возможно, в образовании новых трещин.

Льдистость пород, как и трещиноватость, подчиняется некоторым общим закономерностям: степень ее уменьшается как сверху вниз — от дневной поверхности в глубь массива, так и от склонов долины к водоразделам. Наибольшей льдистостью обладает кора выветривания.

Голоценовые и более древние четвертичные коры выветривания, сформировавшиеся в условиях холодного нивального или субарктического климата, имеют небольшую мощность и представлены в основном грубыми продуктами морозного выветривания. На склонах речных долин, где денудация приближается по интенсивности к выветриванию, мощность коры выветривания не превышает первых метров, на плоских водоразделах увеличивается до 7—10 м.

Кроме четвертичных маломощных кор выветривания встречаются и значительно более мощные древние коры выветривания, сформировавшиеся в существенно иной климатической обстановке. Так, в процессе изысканий для строительства Аргалинской ГЭС выяснилось, что андезиты, слагающие участ-

ток строительства, превращены до значительной глубины в сапролиты — типичный продукт химического выветривания, который мог сформироваться только в условиях жаркого и влажного климата. Это позволяет считать, что здесь развита не современная, а древняя кора выветривания, сформированная в палеогене, а возможно, и в более древние геологические эпохи. Керн андезитов, поднятый из скважин с глубины 30—80 м, через несколько суток после оттаивания рассыпался в хрящ [Веденников, 1969], что указывает на значительную мощность сильновыветрелых пород. Льдистость пород в пределах коры выветривания может достигать 15—30 %, но встречались случаи, когда содержание льда превышало содержание обломков пород.

Ниже коры выветривания расположена зона разуплотнения пород, которая также характеризуется наличием раскрытых трещин, заполненных льдом или льдонасыщенным обломочным материалом. Нижняя граница этой зоны повторяет в слаженной форме контуры рельефа, в том числе речной долины. Мощность зоны разуплотнения изменяется от 10—30 м в платформенных условиях до 60—100 м, а в пределах горноскладчатых сооружений иногда и больше. Некоторые исследователи [Кривоногова и др., 1976] отмечают, что эта зона также иногда характеризуется распущенностью пород, хотя и не в таких масштабах, как кора выветривания. Это явление следует рассматривать как унаследованное от времени промерзания пород. Ниже этой зоны могут быть встречены только единичные раскрытые трещины, заполненные льдом или льдонасыщенным материалом.

Льдистость скальных пород зависит в большей степени от их литолого-петрографического состава и структурно-текстурных особенностей. Наименьшей льдистостью при прочих равных условиях характеризуются, как правило, массивные изверженные породы типа гранитов, диоритов, габбро и др. В этих породах даже в верхней 20—30-метровой толще льдистость, как правило, не превышает 1—3 %, однако в массивных изверженных породах могут быть встречены отдельные крупные ледяные жилы. Такие жилы мощностью 20—40 см и протяженностью до 25 м были прослежены, например, в бортах долины Хеникаджи в верховье р. Колымы [Гольдтман, 1973].

Для слоистых осадочных и сланцеватых метаморфических толщ характерны слоистые и слоисто-сетчатые структуры; основные включения льда в них приурочены к трещинам напластования или трещинам, развивающимся по сланцеватости. Льдистость таких пород достигает нередко 10—15 %. Некоторые разности осадочных (песчаники, алевролиты, известняки и др.) и эффузивных (определенные типы лав и их туфов) пород обладают значительной пористостью (до 15—20 %, а иногда и больше). В таких породах развит также лед-цемент, который

на механических свойствах пород оказывается в небольшой степени и в этом отношении опасности не представляет.

В карбонатных закарстованных породах значительные скопления льда приурочены к раскарстованным трещинам, кавернам и более крупным карстовым пустотам.

Существенное влияние на льдистость скальных пород разных типов оказывает тектоника. Наименьшей льдистостью обладают породы, находящиеся в условиях спокойного залегания (на платформах, плато, в некоторых случаях в пределах глыбовых гор). В сильно дислоцированных породах льдистость значительно возрастает, особенно при наличии крупных тектонических зон, активизировавшихся в четвертичное время. Терригенные породы в пределах таких зон часто превращены в насыщенный льдом щебенисто-песчано-глинистый материал. Трещины, заполненные льдом и имеющие ширину до 10 см, были встречены в тектонических зонах на глубине до 300—350 м, а иногда и более [Втюрина, Втюрин, 1970].

Явления раслучивания сопровождаются расчленением массива пород на отдельные блоки, разделенные ледяными жилами. Поскольку даже небольшие нагрузки вызывают вязко-пластичное течение льда, это приводит к развитию в скальном массиве явлений ползучести (крипа) — медленного смещения глыб пород под воздействием силы тяжести. Отчетливые следы таких смещений, примерно на 0,9 м вниз по склону, были зафиксированы, например, в отмеченном выше гранитном массиве на р. Хеникаджи [Гольдтман, 1973].

Температурный режим мерзлых пород зависит от климатических условий соответствующего региона и теплового баланса верхней зоны лitosферы. Вблизи южной границы зоны распространения многолетнемерзлых пород температура в толще пород близка к 0 °C, в центральных и северных районах Восточной Сибири снижается до минус 10—12 °C. Тепловое поле в пределах речной долины обычно характеризуется значительной неоднородностью. На склонах северной экспозиции температура обычно на 2—3 °C ниже, чем на склонах южной экспозиции. В дне речной долины тепловой режим нарушен отепляющим влиянием водотока. Это приводит к тому, что здесь часто образуются глубокие талики.

Глубина таликов в руслах рек зависит в большей степени от состава и степени трещиноватости пород, определяющей их водопроницаемость и интенсивность водообмена. Так, в долине р. Вилюй, на участке, где развиты глинисто-мергелистые отложения ордовика, превращенные в пределах коры выветривания в практически водоупорные глины, глубина таликов не превышает 45 м, а на участке, где русло врезано в трещиноватые долериты, — больше 100 м [Кривоногова и др., 1976]. В некоторых случаях залегание в дне долины сильнотрещиноватых

скальных пород приводит к образованию сквозных таликов даже в условиях развития низкотемпературных мерзлых толщ. Такая картина наблюдалась, например, на р. Колыме на участке строительства Колымской ГЭС, несмотря на то что она расположена в зоне еще более сурового климата.

Создание водохранилищ, которые являются аккумуляторами тепла, приводит к оттаиванию мерзлых пород и вытапливанию льдов, содержащихся в трещинах или пустотах. Это снижает несущую способность мерзлых пород и может повлечь за собой деформации склонов и оснований плотин любого типа, а также других наземных и подземных сооружений.

## ГЛАВА 5

### ЗАДАЧИ, ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ И ОРГАНИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 5.1. Общие положения

Гидroteхнические узлы — сложный комплекс сооружений, связанных общим инженерным решением и единой технологией. По своему пространственному расположению, компоновке, типу, условиям работы они тесно связаны с природными условиями местности — топографическими, гидрологическими, инженерно-геологическими и др. Особенно большое значение имеют инженерно-геологические условия, которые в значительной степени определяют выбор места строительства, типа сооружений, их размеры и пр. и в конечном счете — стоимость гидроузла, а вместе с тем нередко и целесообразность его сооружения. В связи с исключительно большим многообразием геологических ситуаций, характерных для территории СССР, ГДР и ПНР, инженерно-геологические условия, встречающиеся при изысканиях отдельных гидроузлов, всегда обладают значительными особенностями и своеобразием (см. гл. 4). Поэтому в гидroteхническом строительстве не допускается, как правило, шаблона, и в каждом отдельном случае возникающие задачи решаются в большой мере индивидуально, на основе глубокого изучения местных природных условий, постановки специальных комплексных исследований, глубокого и всестороннего анализа полученных результатов и использования их при проектировании.

Соответственно и инженерно-геологические исследования, хотя и должны подчиняться некоторым общим методическим установкам, выработанным на основании обобщения отечественного и зарубежного опыта, одновременно должны сохранять значительный элемент творческого подхода.

Инженерно-геологические исследования, выполняемые для обоснования проектов гидroteхнических сооружений, совмещаются с топографическими, гидрологическими и некоторыми другими видами исследований, образуя единый комплекс инженерных изысканий, направленный на выявление природных условий, в которые предполагается «вписать» проектируемые сооружения. Это необходимо, с одной стороны, для оценки возможного воздействия природной обстановки на строительство и эксплуатацию сооружений, с другой — для предсказания, а затем и устранения или ослабления возможного влияния

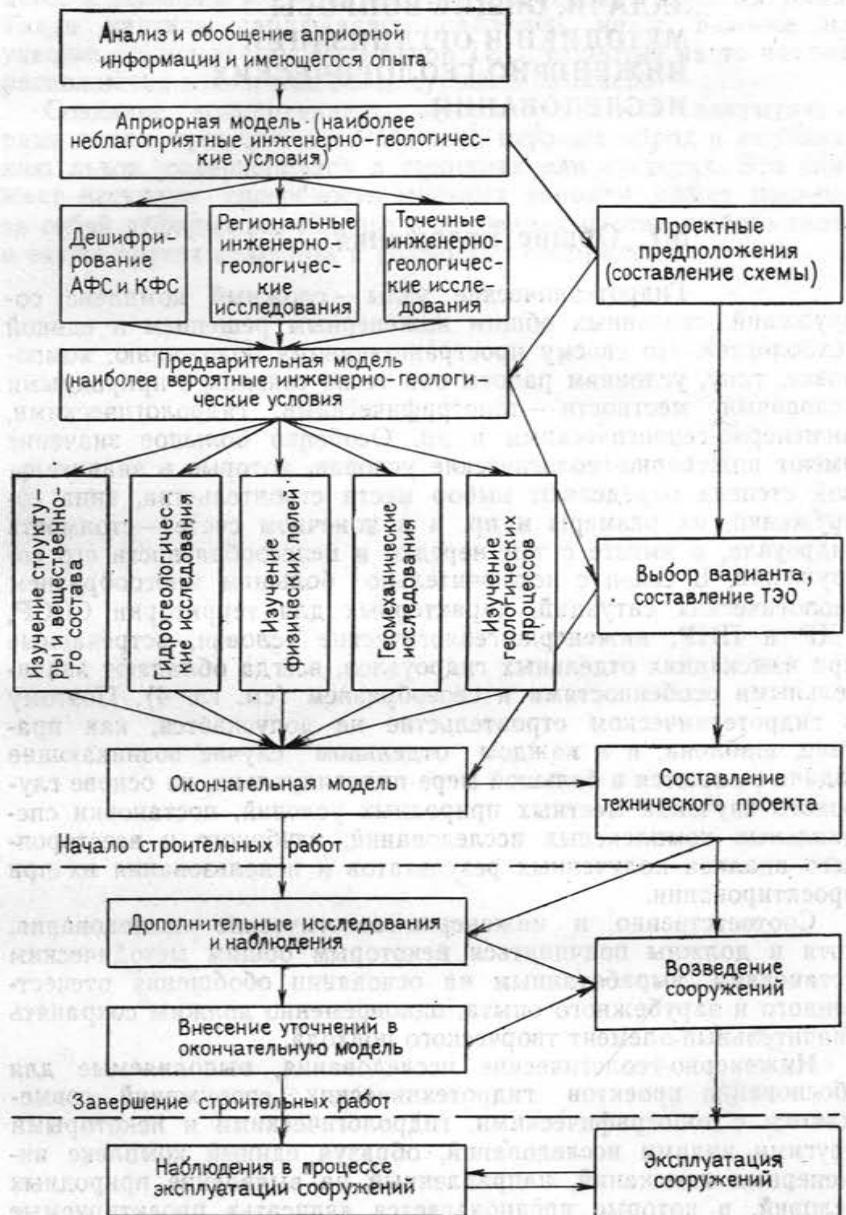


Рис. 5.1. Общая схема последовательности проектно-изыскательских работ

строительства на окружающую среду. В этом комплексе на инженерно-геологические исследования возлагается задача изучения геологических компонентов природной среды, которые принято объединять понятием «инженерно-геологические условия».

Одно из важнейших требований, от соблюдения которого во многом зависит успех проектно-изыскательских работ, заключается в тесной увязке инженерно-геологических исследований с проектированием сооружений (рис. 5.1). Такая увязка состоит в первую очередь в том, что по мере углубления знаний об инженерно-геологических условиях района и участка строительства уточняются проектные решения, а это в свою очередь определяет направление дальнейших исследований. Связь изысканий с проектированием позволяет определить также необходимую детальность, точность и надежность изучения отдельных геологических компонентов в соответствии с требованиями проектирования сооружений, характером применяемых расчетных методов и пр. Увязка обеспечивает, наконец, единую последовательность и этапность проектных и изыскательских работ, которые образуют по существу звенья единого технологического процесса.

## 5.2. Составление моделей массивов горных пород

В связи с большой сложностью геологических систем всестороннее их изучение и описание представляет значительные трудности. Но в этом нет необходимости, так как для решения различных практических задач, в том числе связанных с проектированием гидротехнических сооружений, достаточно располагать хотя и большой, но все же ограниченной информацией. Такой подход позволяет рассматривать исследуемые геологические системы в несколько упрощенном, схематизированном виде — в форме моделей, отвечающих по содержанию, принципам построения, детальности, точности и надежности задачам инженерных изысканий.

Конструирование моделей основано главным образом на анализе, обработке собранной информации и позволяет перейти от эмпирического уровня к некоторым обобщениям, которые дают возможность выявить различные причинные, временные и пространственные связи и закономерности, представляющие интерес для проектирования сооружений и решения других сопутствующих вопросов. В этом заключается познавательная и практическая ценность составления моделей. Наряду с эмпирическим материалом при составлении моделей используются также теоретические представления инженерной геологии и других наук, поэтому в них всегда содержатся некоторые элементы дедукции и прогноза. Если прогнозные аспекты доминируют, модели называются прогнозными, или *моделями-прогнозами*.

В моделях<sup>\*</sup> массивов пород должны найти отражение основные характеристики геологических систем, которые были рассмотрены в гл. 2 — структура, вещественный состав, физическое состояние и др. Принципиальное значение имеет подразделение моделей на два типа: статические и динамические. Первые отображают исследуемые геологические системы на какой-то определенный момент времени (например, на момент завершения изысканий и начало строительных работ), вторые — изменение системы во времени (на период строительства и эксплуатации сооружений).

Из моделей первого типа в практике инженерно-геологических исследований используются в основном структурные или, точнее, структурно-вещественные, в которых находит отражение две важнейшие характеристики массивов пород — структура и вещественный состав. Такие модели представляются в форме карт и разрезов, на которых показываются в принятом масштабе форма, размеры, пространственное положение и соотношение геологических тел, их состав (породы), а также различные структурные неоднородности. На них изображаются также оползни, обвалы, блоки отседания, участки развития карстовых пустот и пр. Такие модели весьма информативны, наглядны и удобны для различных измерительных операций. При накоплении данных о механических и фильтрационных свойствах пород их легко трансформировать в расчетные модели.

Находят применение также модели, характеризующие гидрогеологические условия или отражающие физическое состояние массива пород — например, структуру и параметры поля напряжений или теплового поля (последнего — в основном в зоне распространения многолетнемерзлых горных пород). Модели последнего типа составляются либо на основании непосредственной обработки данных изучения массивов в их естественном залегании, либо путем лабораторного моделирования на ЭВМ или с помощью эквивалентных материалов. Последний метод относится главным образом к моделированию напряженного состояния массивов пород. Описание основных методов лабораторного исследования — тензометрической сетки, фотоупругости, стереотензометрического — содержится в работе Л. Б. Розовского и И. П. Зелинского [1975] и др. Модели физических полей обычно изображаются в изолиниях исследуемого параметра — нормального или тангенциального напряжения, температуры и пр.

К составлению моделей приступают практически с момента начала изыскательских работ, для чего привлекают различные литературные, фоновые и архивные материалы, геологические карты разных масштабов и др. Поскольку такие модели составляются перед началом полевых работ, их можно условно назвать *априорными* (рабочая гипотеза). Отражая в модели

различную геологическую информацию, необходимо в первую очередь выявить те трудности и «опасности» для проектирования сооружений, которые могут быть скрыты в данной геологической обстановке. Это позволяет, во-первых, направить исследования в первую очередь на решение ключевых вопросов и, во-вторых, выбрать наиболее подходящий для этого комплекс методов. Поскольку в априорных моделях должны быть по возможности отражены все потенциальные опасности, они могут оказаться в отдельных случаях более сложными и неблагоприятными, чем реальные условия. Так, при составлении модели массива карбонатных пород в пределах глыбово-складчатых гор в нее должны быть включены такие потенциальные опасности, как наличие тектонических разломов, проявления древнего и современного карста, трещин бортового отпора, блоков отседания на склонах речной долины и др. Не исключено, что некоторые из сделанных предположений отпадут уже при анализе имеющихся геологических материалов, другие — при выполнении геологической съемки, третьи — при проведении геофизических работ, но только таким образом можно избежать просчетов при разработке программы инженерно-геологических исследований. Разумеется, что при этом не следует включать в априорные модели такие трудности и опасности, которые заведомо невозможны в данной геологической обстановке.

В дальнейшем, по мере получения новой информации, составленные модели постепенно совершенствуют, уточняют и детализируют. На заключительном этапе исследований (технический проект, рабочие чертежи) инженерно-геологические модели трансформируют в расчетные схемы узкого целевого назначения: для расчета оснований по деформациям, по устойчивости, определения потерь воды из водохранилища на фильтрацию и др. Поскольку расчеты ведутся методами механики пород, гидродинамики и других наук механико-математического цикла, такие схемы должны отвечать требованиям соответствующих отраслей знания, применяемым расчетным методам, возможностям вычислительной техники и пр. Такие модели обычно составляются инженерами-геологами совместно с проектировщиками.

Важная особенность инженерно-геологических моделей заключается в том, что они составляются, как правило, в условиях недостатка информации, особенно на ранних этапах исследований. Поэтому построение моделей осуществляется с использованием не только прямой информации по строгим формальным правилам, но и различной косвенной информации, материалов по районам-аналогам, имеющегося личного и коллективного опыта и геологической интуиции. В результате составляемые модели всегда сохраняют некоторый элемент неопределенности.

### 5.3. Инженерно-геологические прогнозы

Под термином прогноз мы будем понимать любое высказывание об исследуемых геологических объектах, если в нем сохраняется существенный элемент неопределенности и его следует трактовать в вероятностном смысле. При этом вероятность можно рассматривать в этом случае не только в чисто статистическом (частотном) смысле, но и как «меру разумной уверенности» в правильности высказанного предположения. Так, характеристику разлома, полученную на основании прямых описаний и измерений в шахте или штольне, нельзя, очевидно, считать прогнозом, так как неопределенность здесь практически отсутствует, но утверждение о том, что разлом сохранит свои параметры и за пределами области наблюдений, следует рассматривать уже как прогноз. Если придерживаться этой точки зрения, понятие «прогноз» можно распространить на широкий круг геологических явлений, связанных с оценкой возможности строительства, выбором места расположения сооружений, способом производства строительных работ, воздействием сооружений на окружающую среду и пр. Так, на самых ранних этапах проектирования, когда в принципе решаются вопросы о возможности и целесообразности строительства гидроузла, составляются прогнозы водоудерживающей способности чаши водохранилища и сейсмической опасности района, надежности береговых примыканий и оснований сооружений, на период строительства сооружений — прогнозы устойчивости строительных откосов, скорости выветривания пород в дне и откосах открытых выемок, притоков воды в котлованы, суффозионных явлений в трещинах пород и др., на период эксплуатации сооружений — прогнозы деформаций и устойчивости плотины, устойчивости примыканий в условиях напорной фильтрации, потерь воды на фильтрацию и др.

Особенно важную роль играет инженерно-геологическое прогнозирование при проектировании и строительстве подземных сооружений, поскольку в этом случае выполняемый объем изысканий очень ограничен. Для этих сооружений необходимы прогнозы о составе и свойствах пород и гидрогеологических условиях по трассе туннелей, а также прогнозы о возможности развития неблагоприятных геологических процессов: горного давления, пучения пород, прорывов воды и газа, повышения температуры и пр.

В некоторых из перечисленных задач применяются решения, основанные на достаточно строгих физических моделях (механических, гидродинамических и др.) и корректных математических методах, вследствие чего их обычно называют расчетами, а не прогнозами. Однако весьма приближенная их адекватность объекту исследований и, главное, использование в расчетных формулах числовых характеристик, представляю-

щих собой параметры распределения случайных величин, вносит в них элемент неопределенности, что и дает нам право отнести их также к категории прогнозов.

В зависимости от назначения, прогнозы можно разделить, как и модели, на два класса: прогнозы геологических систем в статическом состоянии (статические прогнозы) и прогнозы динамики геологических систем (динамические прогнозы). При решении различных инженерных задач наибольшее значение имеют последние, поэтому рассмотрим их более подробно.

Классификацию динамических прогнозов можно осуществить по двум основным признакам: временному и применяемому методу составления. При построении классификации по первому признаку можно воспользоваться с некоторыми упрощениями схемой, предложенной Е. П. Емельяновой, выделив следующие типы прогнозов:

- долгосрочные — на периоды, соизмеримые с длительностью эксплуатации сооружений (десятки или сотни лет);
- заблаговременные — на периоды, соизмеримые с длительностью строительства сооружений (месяцы или несколько лет);
- краткосрочные — на небольшие периоды, отвечающие продолжительности какого-либо конкретного мероприятия, например установки временной крепи в подземной выработке и др. (дни, недели);
- экстренные предупреждения — в случае, когда возникает угроза катастрофы и за короткий промежуток времени (минуты, часы) следует эвакуировать людей и оборудование.

В практике гидротехнического строительства возникает необходимость в составлении прогнозов всех этих типов. По методам составления прогнозы можно разделить с некоторой условностью на четыре группы.

Прогнозы первой группы основаны на обобщении эмпирического материала в свете теоретических представлений инженерной геологии и других геологических наук и имеют в основном качественный характер. Ведущая роль принадлежит здесь историко-геологическому подходу, рассматривающему массив пород как исторически развивающуюся систему, претерпевающую закономерные изменения под влиянием внешних и внутренних взаимодействий. Выявление закономерностей достигается путем восстановления генезиса системы и истории ее развития в геологическом прошлом (главным образом в плиоцен-четвертичное время). Для этого используются методы неотектоники, геоморфологии и многих других геологических наук.

Главная трудность использования историко-геологического подхода для составления инженерно-геологических прогнозов связана с тем, что строительство сооружений вносит существенные изменения в структуру внешних и внутренних связей и в развитие геологической системы. Однако в некоторых случаях,

если эти изменения могут быть учтены или ими можно пренебречь, такие прогнозы могут дать надежные результаты, не уступающие в практическом отношении расчетам, выполненным на основе тех или иных механико-математических моделей. Так, предсказание, что оползень произойдет в течение ближайших двух-трех лет, основанное на изучении закономерностей развития склона, может служить примером такого достаточно определенного прогноза. Однако для инженеров-гидротехников, проектирующих сооружения и ориентирующихся в основном на формальные инженерные методы расчета, такие прогнозы не всегда достаточно убедительны.

Прогнозы второй группы основаны на привлечении теоретических моделей механики, реологии, гидродинамики и некоторых других точных наук, которые описываются с помощью детерминированных математических зависимостей. Модели такого типа используются для прогноза (расчета) многих важнейших геологических процессов (нарушении устойчивости склонов и оснований инженерных сооружений, потерю на фильтрацию и др.) и обеспечивают необходимую надежность и точность предсказания, но при условии выполнения двух требований: а) достаточной адекватности модели исследуемому явлению и б) установления надежных расчетных показателей свойств массива пород, параметров водоносных горизонтов, характеристик физических полей. К сожалению, выполнить эти условия довольно сложно, так как изучаемые процессы обычно имеют сложную структуру и складываются из большого числа «подпроцессов», нередко имеющих различную физическую природу и зависящих в свою очередь от множества факторов, трудно поддающихся количественной оценке. Характерным примером может служить нарушение устойчивости скальных откосов, которое связано с геостатической нагрузкой, гидростатическим и гидродинамическим давлением, воздействием сейсмических нагрузок, изменением прочностных свойств пород под влиянием разуплотнения и выветривания и многих других процессов. Должны быть учтены также такие факторы, как положение трещин в пространстве, их форма, ширина, протяженность, состав и свойства заполнителя, наличие на стенах трещин скальных выступов, их число, размеры, форма, степень выветрелости и пр. Все эти характеристики могут быть изучены только на небольших участках (в шахтах, штолнях), а на всю остальную площадь поверхности смещения их значения экстраполируются на основании общих соображений. Ясно, что в этих условиях трудно составить такую механико-математическую модель, которая бы учитывала в достаточной степени все эти процессы и факторы и обеспечивала получение вполне надежных и точных результатов.

Применение моделей, учитывающих только некоторые из влияющих факторов, также, очевидно, не может обеспечить вы-

сокую точность. Несовершенство таких моделей подчеркивали в своих работах многие видные специалисты по инженерной геологии и механике грунтов (К. Терцаги, Р. Пек, А. Шейдеггер и др.), но в настоящее время некоторые специалисты склонны переоценивать значение такого подхода, нередко в ущерб глубокому геологическому анализу и использованию других методов прогноза.

Прогнозы третьей группы основаны на выявлении зависимостей или закономерностей в кажущейся случайности явлений с помощью методов математической статистики, теории информации и некоторых других математических дисциплин, разработанных для этой цели. Так, весьма ответственной задачей в практике гидротехнического строительства является предсказание частоты и интенсивности землетрясений. Для решения подобного рода задач используются стохастические методы исследования временных последовательностей (модель Пуассона и др.), позволяющие предсказать с той или иной степенью надежности наиболее вероятный интервал между землетрясениями определенной магнитуды или балльности и вероятное число подобных событий за время существования сооружения. На основе таких прогнозов принимаются расчетные параметры воздействия землетрясений на проектируемые сооружения. Аналогичный подход применяется к прогнозированию оползней, обвалов, селей и других геологических процессов.

Для целей прогноза используются также регрессионные модели, устанавливающие связь между прогнозируемыми явлениями и какими-либо другими событиями (признаками, факторами), которые легче поддаются изучению или о которых имеется более обширная и надежная информация (например, более продолжительные ряды наблюдений). Регрессионный анализ применяется также для построения экстраполяционных моделей, в которых для прогноза процесса в будущем используются данные о его развитии за прошедший период.

Прогнозы четвертой группы основаны на использовании метода аналогий. Идея метода заключается в том, что если сравниваемые объекты обладают достаточно большим сходством по некоторому числу существенных признаков, то можно считать, что это сходство может быть распространено и на другие признаки, важные в том или другом отношении. В инженерной геологии при сравнении объектов используются в первую очередь такие признаки, которые отражают генетические или историко-геологические аспекты, поскольку общность их происхождения и истории развития повышает уверенность в том, что установленная аналогия не случайна. Большие перспективы дает привлечение к решению этого вопроса формационного подхода, так как однотипность формаций свидетельствует о вероятном сходстве сопоставляемых объектов по широкому набору признаков.

При выборе признаков следует возможно шире привлекать различные количественные характеристики, так как это открывает возможности для использования при сопоставлениях различных формальных методов, основанных на математической теории распознавания образов, теории подобия и других разделов математики [Розовский, 1969; Розовский, Зелинский, 1975 и др.]. Не следует, однако, и преувеличивать возможности формальных методов, так как многие важнейшие геологические характеристики (генетические, историко-геологические) не поддаются формализации, а сопоставление по второстепенным признакам, даже выраженным числом и мерой, не всегда может обеспечить достаточную надежность выводов. С большой осторожностью следует относиться к различным обобщенным показателям сходства, интегральным мерам подобия, которые строятся, как правило, на аддитивном принципе (суммировании) и могут обладать высокими значениями при сопоставлении объектов, весьма различных по свойствам. Кроме того, такие комплексные показатели практически не поддаются геологической интерпретации.

В современной практике метод инженерно-геологических аналогий привлекает к себе все большее внимание. Это объясняется тем, что введение сооружения в той или иной геологической обстановке представляет собой, как мы отмечали уже ранее, крупномасштабный натурный эксперимент, к тому же проверенный практикой, т. е. наиболее объективным и надежным способом. Поэтому перенесение полученного опыта на новый объект при установлении достаточно полной аналогии может оказаться более полезным, чем любые расчеты. Быстрота числа сооружений, возводимых в разной геологической обстановке, значительно облегчает выбор подходящего аналога.

Характерным примером успешного применения метода аналогий может служить проектирование Братской, Усть-Илимской и Богучанской ГЭС на р. Ангаре. Основанием высоких бетонных гравитационных плотин, входящих в комплекс сооружений этих трех крупных гидроузлов, служат диабазовые силлы, обладающие большим сходством по всем основным инженерно-геологическим и гидрогеологическим характеристикам. Первой была выстроена Братская ГЭС, где были выполнены большие по объему и весьма детальные исследования и получены достаточно надежные значения различных геологических и гидрогеологических параметров. Сходство условий строительства позволило распространить полученные данные и на две другие ГЭС, что существенно сократило объем буровых и других изыскательских работ.

Широкое применение находит метод аналогий при оценке устойчивости гидroteхнических туннелей, что более подробно рассмотрено в гл. 7.

Кроме перечисленных выше методов для прогноза геологических процессов применяются также методы лабораторного моделирования, как математического (на аналоговых и числовых ЭВМ), так и физического (на эквивалентных материалах).

Отметим, что в сложных случаях следует использовать комплекс методов, контролирующих и дополняющих друг друга,— это может обеспечить составление наиболее надежных прогнозов.

#### 5.4. О необходимой полноте инженерно-геологических исследований

Как показывает опыт, при строительстве большей части крупных гидроэнергетических объектов наблюдаются некоторые расхождения между проектной и исполнительной документацией, что нередко вызывает необходимость внесения в проекты сооружений тех или иных изменений, задержки в производстве работ, увеличение их объемов и пр. Как отмечает А. Г. Лыкошин [1978б], в большинстве случаев подобного рода изменения или уточнения проекта вызываются следующими причинами: а) вскрытием строительными выемками зон тектонических нарушений, крупных трещин или карстовых пустот, не отраженных в геологической документации; б) неустойчивостью строительных откосов; в) увеличением зоны съема в основании или примыканиях сооружений; г) изменением представлений о водопроницаемости пород в основании, примыканиях и на путях обходной фильтрации.

Такие расхождения наблюдаются достаточно часто и, естественно, возникает вопрос, следует ли их рассматривать как недопустимые геологические погрешности или рассматривать их в некоторых разумных пределах как естественное следствие несовершенства современной методики инженерно-геологических исследований. Ряд соображений по этому поводу высказал А. Г. Лыкошин [1978б]. Коротко их можно свести к следующим:

1. Учитывая, с одной стороны, большую сложность строения массивов пород, наличие различных неоднородностей, тектонических нарушений, трещин, карстовых пустот, имеющих случайное пространственное распределение, с другой — дискретный характер основных методов инженерно-геологической разведки (бурение, горные работы), можно считать, что даже самыми детальными инженерно-геологическими исследованиями нельзя выявить все без исключения дефекты естественных оснований. Это подтверждается практикой исследований, показывающей, что даже при использовании весьма густых сетей буровых скважин (например, 25×25 м) не удается избежать пропуска отдельных крупных трещин, карманов выветривания и пр.

2. Применение современных методов технической мелиорации и некоторых других мероприятий позволяет без больших трудностей устраниТЬ возможное влияние выявленных неоднородностей на поведение естественного основания при его взаимодействии с инженерным сооружением. Если в недалеком прошлом такие работы, как анкерование неустойчивых массивов, заделка трещин бетоном, усиление водоотлива, рассматривались как чрезвычайные меры, то теперь они вошли в обычную строительную практику.

Эти соображения позволяют изменить принятное отношение к необходимой полноте инженерно-геологических исследований и считать, что некоторый процент таких расхождений является не только допустимым, но и вполне оправданным, так как позволяет избежать чрезмерной детализации исследований и сосредоточить внимание на решении принципиальных вопросов, определяющих основные проектные решения. Это, естественно, требует от строителей определенной подготовленности в отношении оперативного применения различных защитных, мелиоративных или иных мероприятий. Иными словами, их следует заранее информировать о характере возможных расхождений. Так, при исследовании структуры массива пород геолог должен составить принципиальную схему — модель трещиноватости, основанную на полученной информации о генезисе трещин, их протяженности, характере заполнителя, шероховатости стенок и пр., но это не означает, что он должен стремиться к определению положения каждой отдельной трещины. Это относится также к разломам, хотя индивидуальный подход здесь более оправдан, особенно в отношении таких нарушений, которые по пространственному расположению представляют особую опасность для устойчивости сооружений или откосов котлованов.

Изложенный подход позволяет избежать задержки в выполнении изыскательских работ и сократить их объемы.

## 5.5. Общая схема последовательности инженерно-геологических исследований

Инженерно-геологические исследования, проводимые для обоснования гидротехнического строительства, выполняются в несколько этапов, подчиненных общей схеме работ по планированию гидроэнергетического строительства и составлению проектов отдельных гидроузлов. Последние подразделяются на два цикла: предпроектные работы и собственно проектирование.

Предпроектные работы включают составление схемы комплексного использования реки и технико-экономическое обоснование строительства (ТЭО). Основное назначение предпроектных работ заключается в: а) оценке технической возможности

и экономической целесообразности использования энергетических ресурсов реки (схема) и б) выборе мест строительства отдельных гидроузлов и разработке основных технических и экономических решений (ТЭО).

Проектные работы подразделяются в свою очередь на две стадии: технического проекта и рабочих чертежей. Каждому из этапов (стадий) отвечают свои задачи исследований, определяющие также особенности методики и организации работ.

### 5.5.1. Инженерно-геологические исследования для обоснования схемы комплексного использования реки

Схемы комплексного использования реки составляются для определения возможностей использования реки для судоходства, ирригации, получения электроэнергии и других целей. На этом этапе намечаются места для строительства отдельных гидроузлов и создания водохранилищ, выбирается объект первоочередного строительства. Для большей части крупных рек СССР такие схемы составлены и задача сводится в основном к их уточнению в свете изменяющихся требований к технико-экономическому обоснованию. Инженерно-геологические исследования, выполняемые для составления схемы, делятся на две части: а) общее инженерно-геологическое изучение долины реки и б) изучение участков размещения отдельных гидроузлов и водохранилищ.

Изучение геологического строения долины реки основано главным образом на использовании материалов геологических съемок, имеющихся по району работ. Анализ и обобщение имеющейся информации дополняются дешифрированием космических снимков и аэроснимков, а также рекогносцировочным обследованием. При сложном геологическом строении региона, широком развитии опасных геологических процессов проводится инженерно-геологическая съемка долины реки в масштабах 1 : 50 000—1 : 100 000.

При изучении мест возможного размещения гидроузлов проводятся более детальные исследования (инженерно-геологические съемки масштабов 1 : 10 000—1 : 25 000), сопровождающиеся в небольшом объеме геофизическими, горно-буровыми и опытно-фильтрационными работами.

Инженерно-геологические съемки выполняются в соответствии с общепринятыми требованиями, но с особым вниманием к геоструктурным условиям территории, проявлениям новейшей тектоники, сейсмической активности, а также к развитию в районе строительства современных геологических процессов: оползней, обвалов, карста, селей и др.

При картировании используются методы полевой геофизики (главным образом сейсмо- и электроразведки, реже гравиметрии

и магнитометрии), позволяющие получить данные о положении крупных тектонических нарушений, строений и мощности зон естественного разуплотнения пород и кор выветривания, а также проследить границы комплексов пород под покровом рыхлых четвертичных отложений.

Разведочные выработки закладываются в минимальном объеме по створам напорных сооружений и трассам дериваций с таким расчетом, чтобы совместно с данными инженерно-геологической съемки, геофизических работ и других исследований они могли обеспечить составление схематических инженерно-геологических разрезов, позволяющих предварительно оценить условия строительства сооружений.

Гидрогеологические исследования выполняются для оценки влияния подземных вод на строительные работы и эксплуатацию сооружений, прогноза возможных потерь на фильтрацию, решения вопроса о необходимости противофильтрационных и дренажных сооружений и определения их примерных параметров. Исследования выполняются в основном методами гидрогеологической съемки, дополняемой некоторым объемом опытно-фильтрационных работ и режимных наблюдений. В небольшом объеме выполняются гидрохимические исследования, главным образом с целью установления наличия и мест разгрузки глубинных подземных вод. Установление гидрохимических аномалий может представлять также интерес для выявления в основании сооружений водорастворимых пород (гипса, каменной соли).

К числу важных гидрогеологических проблем, которые должны быть решены уже на этом этапе исследований, относится оценка возможных потерь воды на фильтрацию в соседние долины. Хотя подобная опасность возникает довольно редко, можно привести ряд примеров, когда эта проблема имела большое значение (Каховская ГЭС на р. Днепре, где возникла опасность фильтрации воды через водораздел в Черное море, Каунасская ГЭС, где такую опасность создавало наличие недалеко от русла р. Немана глубокого эрозионного вреза р. Семены, и др.).

Расчетные значения показателей прочностных и деформационных свойств пород при составлении схемы использования реки устанавливаются на основании косвенной информации (петрографической, геофизической) и определения некоторых простейших характеристик, таких как объемная масса пород, временное сопротивление сжатию и др.

Для возведения гидротехнических сооружений требуются в больших объемах различные строительные материалы. Наличие или отсутствие стройматериалов определенных видов нередко определяет выбор того или иного типа сооружения. В связи с этим в инженерно-геологическом обосновании выбора места строительства сооружений должна быть приведена пред-

варительная оценка обеспеченности строительства естественными строительными материалами, указаны местоположение месторождений стройматериалов, сведения об их качестве, а также об ориентировочных запасах, которые должны в 2—3 раза превышать установленную потребность. Сведения о строительных материалах приводятся на основании поисков, проводимых при инженерно-геологической съемке. Поиски сопровождаются небольшим объемом разведочных работ, что обеспечивает оценку запасов стройматериалов по категории С<sub>1</sub> (см. разд. 7.4).

### 5.5.2. Инженерно-геологические исследования для составления технико-экономического обоснования (ТЭО)

В ТЭО окончательно выбирается участок строительства гидроузла и применительно к нему предварительно намечается створ подпорных сооружений, определяются НПУ и основные параметры гидроузла, типы сооружений и их компоновка, ориентировочные объемы строительных работ и пр. [Руководство по определению состава..., 1974].

Одна из наиболее важных и ответственных задач, которые решаются при составлении ТЭО, заключается в выборе участка створа плотины, так как он определяет в значительной мере направление и содержание всех дальнейших исследований.

Основным видом работ является инженерно-геологическая съемка, которую проводят на площади расположения сопоставляемых створов. Масштаб съемки с учетом степени сложности геологического строения долины реки и других факторов принимается в пределах от 1 : 50 000 до 1 : 25 000.

Инженерно-геологическая съемка позволяет наметить ряд сопоставляемых створов, где проводятся дальнейшие более детальные исследования. Съемки крупного масштаба выполняются также по трассам дериваций, в местах расположения подземных камер машинных залов, порталов, туннелей, строительных шахт и пр.

Разведочные горно-буровые работы проводятся на участках всех сопоставляемых створов. Объем этих работ принимается таким, чтобы вместе с материалами инженерно-геологической съемки, геофизической разведки и данными опытно-фильтрационных работ он позволил составить достаточно обоснованные инженерно-геологические разрезы по каждому из выбранных участков.

Выработки располагают в первую очередь по линиям (створам), которые к началу разведочных работ являются наиболее перспективными для расположения оси плотины.

Буровые скважины закладывают также на участках возможного расположения камер подземных ГЭС, наиболее неблагоприятных и сложных участках трасс туннелей, на порталах

туннелей, участках строительства других ответственных сооружений (по всем сравниваемым вариантам).

Для получения более полного представления об инженерно-геологических условиях примыканий плотин к бортам горных долин в некоторых случаях проходят шурфы и штольни.

Гидрогеологические исследования должны обеспечить получение данных, необходимых для обоснования прогноза возможных потерь воды на фильтрацию, снижения фильтрационного давления, механической и химической супфозии, притоков воды в котлованы, агрессивных свойств воды по отношению к металлу и бетону и др. [«Руководство по определению состава...», 1974]. Для решения этих вопросов проводятся гидрогеологические наблюдения (в составе инженерно-геологических съемок) и специальные гидрогеологические работы (опытные откачки, нагнетания, опыты по изучению скорости движения воды, гидрохимические исследования и др.).

Изучение физико-механических свойств пород на этом этапе основывается преимущественно на лабораторном определении различных простейших показателей (объемная масса, временное сопротивление сжатию и др.), которые могут дать представление о деформативных и прочностных свойствах пород. Прямые полевые определения этих свойств выполняются в единичных случаях, когда другие способы прогноза не могут дать достаточно надежного результата.

Продолжаются также работы по поискам и разведке месторождений строительных материалов.

По результатам выполненных исследований составляются инженерно-геологические описания отдельных створов, дополняемые необходимой графикой (инженерно-геологическими картами, «разрезами»).

Как показывает опыт, при выборе створа плотин встречаются два характерных случая. В первом створ выбирается в пределах сравнительно короткого отрезка долины реки, где сопоставляемые участки различаются только по некоторым деталям морфологии речной долины или ее геологического строения. Во втором случае створы располагают на разобщенных участках долины, где они часто существенно различаются по всем основным морфологическим и геологическим характеристикам.

Характерным примером ситуации первого типа может служить выбор створа Усть-Каменогорской ГЭС на р. Иртыше, где на участке длиной 2,6 км было намечено пять вариантов возможного размещения сооружений. На каждом створе было пройдено от 3 до 12 скважин глубиной до 50 м и выполнено некоторое число вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). На основании полученных материалов проведено сравнение створов, при котором учитывались такие параметры, как ширина русла и речной долины, мощность четвертичных отло-

жений в русле реки и на склонах речной долины, состав и степень трещиноватости пород, мощность зоны выветривания и др.

Сравнение показало, что наиболее благоприятным по инженерно-геологическим условиям является третий створ, где русло и речная долина имеют небольшую ширину, основания и примыкания сложены весьма прочными породами (габбро), а мощность четвертичных отложений в русле реки и на склонах долины по сравнению с другими створами минимальна. На этом створе были поставлены дальнейшие более детальные исследования. На коротких отрезках долины располагались сопоставляемые створы Братской, Ингурской, Чиркейской, Сарсангской и некоторых других высоких плотин.

Примером ситуации второго типа может служить выбор створа Усть-Илимской ГЭС, где исследования выполнялись на отрезке долины реки длиной около 120 км. Для долины Ангары, на которой выстроена эта ГЭС, характерно чередование расширенных участков, приуроченных к слабым осадочным породам, с «прижимами», отвечающими участкам расположения прочных изверженных пород — траппов. Инженерно-геологические исследования проводились на трех разобщенных участках сужений: Шаманском, Бадарминском и Толстомысовском. По сумме экономических, инженерно-геологических и иных показателей окончательное решение было принято в пользу Толстомысовского створа, где в настоящее время сооружена Усть-Илимская ГЭС.

Выбор створа потребовал в этом случае выполнения большого объема исследований: крупномасштабного картирования на площади 422 км<sup>2</sup>, проходки 7400 м скважин и 650 м шурfov, проведения 84 опытных кустовых и одиночных откачек и 140 позонных наливов. Кроме того, проводились мелкомасштабные геологосъемочные работы на протяжении всего участка расположения створов.

### 5.5.3. Инженерно-геологические исследования для обоснования технического проекта

В число задач, решаемых на стадии технического проекта, входят выбор типов сооружений и их компоновки, составление проекта производства работ и пр. [«Руководство по определению состава...», 1974].

Важные и ответственные задачи должны быть решены при инженерно-геологических исследованиях. К ним относятся:

а) оценка совместной работы плотины и массива горных пород (в отношении деформируемости, устойчивости и пр.);

б) прогноз устойчивости бортов долины в местах примыкания плотины на период строительства и эксплуатации сооружений;

в) уточнение сейсмической опасности участка строительства (в сейсмически активных районах) и получение исходных сейсмических характеристик, необходимых для проектирования сооружений;

г) установление мощности зоны съема выветрелых и разуплотненных пород в основании и примыканиях плотины и других сооружений;

д) оценка фильтрационных свойств массива пород, суффозионной устойчивости заполнителя трещин, возможности развития напорно-фильтрационных деформаций, а также получение исходных параметров, необходимых для проектирования противофильтрационных и дренажных устройств;

е) прогноз инженерно-геологических процессов, которые могут осложнить строительство или нарушить нормальную эксплуатацию сооружений;

ж) разведка месторождений строительных материалов с подсчетом запасов по установленным категориям и проведением необходимых технологических исследований.

Для решения перечисленных и ряда других задач выполняется большой объем инженерно-геологических исследований, включающий инженерно-геологические съемки разных масштабов, геофизические, горно-буровые, опытно-фильтрационные работы, полевые определения механических свойств пород и др.

Инженерно-геологическая съемка должна охватывать весь участок размещения сооружений, включая все возможные варианты их компоновки. Масштаб съемки принимается в зависимости от сложности геологического строения территории в интервале масштабов 1:2000—1:10 000. Кроме того, средние и крупномасштабные съемки проводятся по трассам гидротехнических туннелей (в масштабах 1:10 000—1:25 000), на участках камер подземных машинных залов (в масштабах 1:1000—1:5000) и в местах расположения других ответственных сооружений.

В горных районах со сложной тектоникой инженерно-геологическая съемка дополняется структурно-геологическими исследованиями с количественной оценкой тектонической нарушенности пород, трещиноватости и выветрелости, в районах с фоновой сейсмичностью, превышающей 6 баллов,— специальными сейсмологическими исследованиями с микросейсмическим районированием территории, в районах с многолетней мерзлотой — работами по изучению режима мерзлоты, и др.

На стадии технического проекта завершаются также работы по поискам и разведке строительных материалов с подсчетом запасов по категориям В и А.

В качестве примера в табл. 5.1 приведен объем инженерно-геологических исследований, которые были выполнены для обоснования технического проекта Токтогульской ГЭС на р. Нарын (см. раздел 4.3.1.3).

Таблица 5.1

Виды и объемы работ, выполненных для обоснования технического проекта Токтогульской ГЭС

| Наименование работ                              | Объемы работ | Наименование работ                                      | Объемы работ |
|---|--------------|---|--------------|
| Инженерно-геологическая съемка, км <sup>2</sup> |              | Опытные откачки, опытов                                 | 95           |
| масштаба 1:2000                                 | 3,0          | Каротаж скважин, м                                      | 1200         |
| „ 1:500   | 0,65         | Сейсмопрофилирование штолен, м                          | 5800         |
| Бурение колонковое, пог. м                      | 10 000       | Полевые определения деформативных свойств пород, опытов | 140          |
| Бурение ударное, м                              | 1 500        | то же, сдвиговых свойств пород                          | 28           |
| Проходка штолен, м                              | 7 900        |   |              |
| Опытные нагнетания, зон                         | 600          |   |              |

Инженерно-геологические съемки сопровождаются геофизическими исследованиями (главным образом электро- и сейсморазведкой), дающими полезную информацию для определения мощности зон разуплотнения и выветривания, выявления разломов, зон повышенной трещиноватости и для приближенной оценки деформационных свойств пород и др. Геофизические исследования позволяют также правильно установить сеть разведочных выработок.

Буровые скважины закладываются по намеченной оси плотины и нескольким параллельным линиям, расположенным выше и ниже по течению реки. Число разведочных линий и расстояние между ними зависят от ширины основания плотины, ее высоты, размеров котлованов, сложности геологического строения и гидрогеологических условий.

Крутые склоны горных долин разведают штольнями, которые располагают с интервалами по высоте в 20—50 м и перпендикулярно к долине или под углом к ней с тем, чтобы выявить строение берегового массива в разных направлениях (см. рис. 6.7). Наиболее подробно разведают склоны в том случае, если проектируется арочная плотина, которая передает основную нагрузку на борта долины. Горные выработки проходят с учетом проведения в них опытов по исследованию деформационных свойств, сопротивления сдвигу и упругого отпора скальных пород.

Объемы горно-буровых и других разведочных работ по трассам туннелей на стадии технического проекта устанавливаются в зависимости от капитальности проектируемых туннелей и сложности геологического строения.

При проектировании туннелей большой протяженности основное внимание уделяется участкам трассы с мелким заложением

туннелей и плохой обнаженностью коренных пород. Здесь частота расположения буровых скважин должна быть максимальной.

На участках порталов туннелей со сложными геологическими условиями разведочные скважины закладываются как по оси туннелей, так и на поперечниках. Порталы туннелей высокого класса капитальности, а также находящиеся в сложных инженерно-геологических условиях разведуются штолнями.

Гидрогеологические исследования на стадии технического проектирования проводятся для тех горизонтов или водоносных зон, которые в строительный период могут существенно осложнить производство работ, а в период эксплуатации сооружений повлиять на их устойчивость, размеры фильтрационных потерь или подпор грунтовых вод в верхнем и нижнем бьефах плотины.

По всем водопроницаемым толщам, выделенным на геологических разрезах основания сооружения, должны быть определены коэффициенты фильтрации. С этой целью водоносные толщи опробуют опытными откачками, а необводненные — опытными наливами и нагнетаниями воды или воздуха.

Объем и состав гидрогеологических исследований по трассам туннелей и на участках размещения подземных сооружений устанавливают исходя из необходимости получения достаточно надежных данных о водоносности и водопроницаемости пород, которые необходимы для расчета возможных водопритоков в подземные выработки, распределения гидростатических напоров, агрессивного воздействия подземных вод на металл и бетон и др.

При глубоком заложении туннелей, камер машинных залов и других подземных сооружений на стадии технического проекта проводят также специальные исследования и наблюдения по изучению температурных условий и газоносности горных пород.

Деформационные и прочностные характеристики пород определяют различными полевыми приборами: бетонными штампами, прессиометрами и др. (см. разд. 6.3.4).

#### 5.5.4. Инженерно-геологические исследования, выполняемые для обоснования рабочих чертежей и в процессе строительства сооружений

Инженерно-геологические исследования, выполняемые на этом этапе, отличаются разнообразием как по назначению, так и по методике. Рассмотрим некоторые из них, имеющие наибольшее значение.

1. Документация строительных котлованов, выемок и подземных сооружений. Этот вид работ представляет собой эффективный метод проверки инженерно-геологических прогнозов

в отношении структурных особенностей массива пород, степени разуплотнения пород, их выветрелости и пр. Установление несоответствий между проектной и исполнительной документацией позволяет своевременно внести изменения в рабочие чертежи или проект производства работ. В соответствии с этим документация рассматривается как весьма важная и ответственная задача инженерно-геологических исследований. Поскольку при документации должна быть проконтролирована правильность определения обобщенных и расчетных показателей свойств пород, она обычно сопровождается небольшим объемом инженерно-геологического опробования пород и лабораторных исследований.

2. Дополнительные исследования с целью уточнения инженерно-геологических условий. Опыт показывает, что как бы детально не были выполнены исследования на стадии технического проекта, всегда остаются некоторые вопросы, требующие уточнения. Нередко они возникают в процессе строительства сооружений, при документации строительных выемок, котлованов или подземных сооружений, когда обнаруживаются новые геологические факты, требующие изучения и оценки. Эти вопросы могут касаться разных сторон геологической обстановки — структурных особенностей массива пород, гидрогеологических условий, физико-механических свойств пород и др., в связи с чем существенно различаются содержание, методика и объемы выполняемых исследований. Такие исследования позволяют обосновать рекомендации по совершенствованию принятых конструкций сооружений или внести изменения в способы строительных работ.

3. Наблюдения за изменениями гидрогеологических условий. Проходка строительных выемок, котлованов и подземных сооружений вызывает общее снижение уровня грунтовых вод на строительной площадке и формирование глубоких депрессионных воронок, которые могут охватить и поверхностный водоток. Образование воронок сопровождается значительным увеличением гидравлических градиентов, что может явиться причиной супфозионных явлений, напорно-силовых деформаций и привести к нарушению устойчивости строительных откосов. Прогнозирование этих явлений весьма сложно и не всегда достаточно надежно, поэтому проверка прогнозов в период строительства имеет большое практическое значение и позволяет в случае необходимости внести в проекты нужные изменения. Гидрогеологические наблюдения проводятся по сети наблюдательных скважин, которая предварительно закладывается на участке строительства. Одновременно ведется наблюдение за изменением химического состава подземных вод и тщательно фиксируются все признаки выноса твердого материала, которые могут указывать на развитие супфозии. Измеряются также притоки воды в строительные выемки, котлованы и подземные

сооружения. Гидрогеологические наблюдения позволяют также оценить эффективность работы водопонизительных установок, под защитой которых осуществляется проходка выемок и котлованов.

4. Наблюдения за развитием геологических процессов. Проходка строительных выемок, котлованов и подземных сооружений часто является причиной оживления имевших место или развития новых геологических процессов. В скальных породах к ним относятся выветривание, разуплотнение, развитие различных гравитационных процессов, иногда карста. Составление обоснованных прогнозов этих явлений также весьма сложно, поэтому и в этом случае натурные наблюдения могут своевременно помочь уточнению прогноза. Наблюдения за развитием геологических процессов осуществляются обычно одновременно с проведением документации сооружений.

5. Опытно-строительные работы. В тех случаях, когда применение обычных методов инженерно-геологических исследований не обеспечивает достаточно надежного решения вопросов, связанных с определением параметров сооружений или их конструкций, а также если необходимо уточнение технологии отдельных видов строительных работ, ставятся крупные натурные эксперименты — опытно-строительные работы. Чаще всего их проводят при проходке котлованов, устройстве цементационных завес, при разработке строительного камня, укладке грунта в земляные сооружения и др. Поскольку выполнение таких работ требует применения тяжелого специального оборудования, к ним привлекаются строительные организации, а время их проведения переносят на начало строительного периода. Задача инженера-геолога при выполнении опытно-строительных работ сводится в основном к выбору типичного участка, совместной разработке программы работ, наблюдениям за их выполнением и экстраполяции полученных данных на весь участок работ.

Кроме перечисленных выше видов исследований, на стадии составления рабочих чертежей и в период строительства часто завершаются также работы, начатые на стадии технического проекта, но не завершенные из-за их большой продолжительности (например, опытные работы по определению механических свойств пород, режимные гидрогеологические наблюдения и др.).

#### 5.5. Участие инженеров-геологов в наблюдениях за эксплуатируемыми сооружениями

Как правило, на всех построенных крупных гидroteхнических сооружениях ведутся регулярные наблюдения за:

- а) перемещениями сооружений; б) деформационно-напряженным состоянием массива пород; в) изменениями гидрогеологи-

ческих условий; г) развитием геологических процессов, которые могут представлять опасность для выстроенных сооружений или окружающей среды.

Особенно большое значение имеют наблюдения первых двух групп, так как они обеспечивают контроль за сохранностью и нормальной работой сооружений. Основные задачи натурных гидрогеологических наблюдений заключаются в выявлении закономерностей движения фильтрационного потока в основании плотины и ее примыканиях, зонах размещения противофильтрационных завес и дренажей, изменений характеристик фильтрационного потока во времени, химического состава подземных вод и др. Гидрогеологические наблюдения позволяют проверить прогнозы и оценить надежность работы противофильтрационных и дренажных устройств, определить наличие суффозионных явлений и в случае возникновения опасности для сооружений своевременно осуществить необходимые защитные мероприятия. Наблюдения за развитием геологических процессов касаются в первую очередь нарушения устойчивости склонов долины реки в верхнем и нижнем бьефах в связи с изменениями природной обстановки.

В качестве примера можно привести организацию наблюдений на Красноярской ГЭС [Брызгалов, Шушарин, 1976], где ведутся наблюдения за горизонтальными смещениями и наклоном секций плотины (с помощью оптических визуальных створов, системы обратных и прямых отвесов, пространственных щелемеров и др.), за фильтрационными расходами в дренажных системах плотины и основания (с помощью систем напорных и безнапорных пьезометров за работой цементационной завесы (с помощью системы пьезометров), за химическим составом фильтрующейся воды и др. Измерительная сеть насчитывает 5819 точек замеров.

## ГЛАВА 6

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 6.1. Основные положения

Для решения задач, намеченных в предыдущей главе, используется широкий комплекс методов, частично оригинальных, частично заимствованных из других геологических и негеологических наук. При этом для решения любой сколько-нибудь сложной задачи используется, как правило, не какой-либо определенный метод, а комплекс взаимодополняющих и контролирующих методов. Примером может служить инженерно-геологическая съемка, где наряду с дешифрированием космических снимков и аэроснимков применяются также геофизические исследования, горные и буровые работы, лабораторные исследования и многие другие методы. Каждый из этих частных методов призван решать определенную часть общей задачи. Именно это заставило нас отказаться от традиционного изложения материала по видам или методам исследований (аэрометоды, геофизические методы и др.) и сосредоточить внимание на решении узловых вопросов — исследовании основных характеристик массивов пород (см. гл. 2): структуры и вещественного состава массивов пород, их физического состояния, динамики и пр. Кроме того, для большей стройности изложения мы разделили исследования несколько условно на две части: региональные, выполняемые в основном на ранних стадиях проектно-изыскательских работ, и детальные, проводимые на более поздних стадиях на месте сооружения конкретного гидроузла.

## 6.2. Региональные инженерно-геологические исследования

Региональные исследования, выполняемые в основном для обоснования схемы комплексного использования реки и в меньших объемах при составлении ТЭО, базируются на инженерно-геологических съемках среднего масштаба — 1 : 200 000—1 : 50 000.

Задача инженерно-геологических съемок заключается в получении информации о всех компонентах инженерно-геологической обстановки, которые определяют выбор места строительства гидроузла, установление рациональных для данной геологической обстановки типов сооружений и решение других

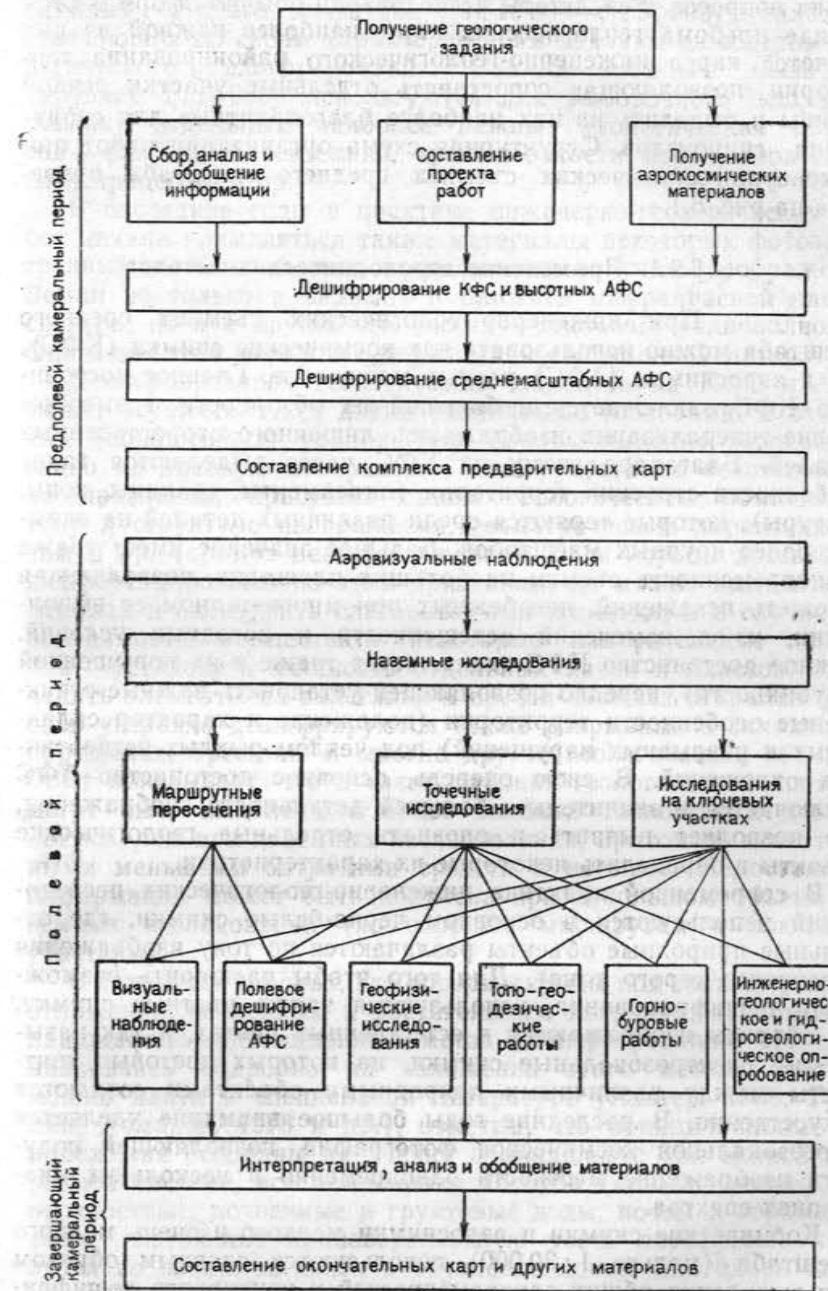


Рис. 6.1. Схема организации работ при инженерно-геологических съемках среднего масштаба с применением аэрокосмических методов

общих вопросов. Результаты исследований обычно оформляются в виде альбома геологических карт; наиболее важной из них является карта инженерно-геологического районирования территории, позволяющая сопоставить отдельные участки речной долины и выделить из них наиболее благоприятные для сооружения гидроузлов. Структурная схема организации работ при инженерно-геологических съемках среднего масштаба приведена на рис. 6.1.

### 6.2.1. Применение аэрокосмических методов

При инженерно-геологических съемках среднего масштаба можно использовать как космические снимки (КФС), так и аэроснимки (АФС) разных масштабов. Главное достоинство КФС заключается в большой их обзорности и высоком уровне генерализации изображения, лишенного второстепенных деталей. Благодаря этому на КФС часто выделяются такие особенности строения территории (линеаменты, границы, зоны, контуры), которые теряются среди различных деталей на снимках более крупных масштабов. Большое значение имеет также единовременность съемки на больших площадях, позволяющая избежать искажений, неизбежных при многоэтапном ее выполнении, из-за изменений освещенности и погодных условий. Важное достоинство КФС заключается также в их повышенной «глубинности», нередко позволяющей установить важные структурные особенности территории (положение и характер складчатых и разрывных нарушений) под чехлом рыхлых четвертичных отложений. В свою очередь, основное достоинство АФС заключается в значительно большей детальности изображения, что позволяет выявить и опознать отдельные геологические объекты и определить некоторые их характеристики.

В современной практике инженерно-геологических исследований используются в основном черно-белые снимки, где отдельные природные объекты различаются по тону изображения (плотности серого тона). Для того чтобы расширить возможности дешифрирования, используются также цветные снимки, где объекты изображаются в естественных цветах, и так называемые спектрональные снимки, на которых цветовые контрасты между различными природными объектами создаются искусственно. В последние годы большое внимание уделяется многозональной космической фотографии, позволяющей получать изображение местности одновременно в нескольких диапазонах спектра.

Космические снимки и аэроснимки мелкого и очень мелкого масштаба (меньше 1 : 30 000) используются главным образом для выявления общих закономерностей и контурного дешифрирования. Установление содержания выделенных контуров — задача уточняющего дешифрирования, которое проводится на

снимках среднего масштаба (1 : 10 000—1 : 30 000), наиболее отвечающих по своим характеристикам задачам инженерно-геологического дешифрирования. Снимки крупного масштаба (крупнее 1 : 10 000) используются для выборочного дешифрирования отдельных наиболее важных геологических объектов — разрывной тектоники, трещиноватости пород, геологических процессов и пр.

В последние годы в практике инженерно-геологических работ начали применяться также материалы некоторых фотоэлектронных методов съемки, позволяющих получать изображение Земли не только в видимой и ближней инфракрасной частях спектра, но и в других его частях — тепловой, радиоволновой. Описание этих методов содержится в специальной литературе.

Дешифрирование геологических объектов на КФС и АФС может осуществляться двумя различными способами. В открытых (обнаженных) районах, где породы выходят непосредственно на дневную поверхность, дешифрирование основывается на признаках, присущих самим геологическим объектам — тону и структуре изображения, геометрическим характеристикам и пр. (прямое дешифрирование). Если породы достаточно дифференцированы по этим признакам, их можно выделить на снимках и оконтурить слагаемые ими площади, а в случае необходимости осуществить некоторые измерительные операции — установить мощность отдельных пачек и пластов, определить элементы их залегания и пр. На снимках открытых районов уверенно дешифрируются также разрывные и складчатые нарушения, трещины и многие другие геологические объекты. Опыт показывает, что в таких районах геологические контуры могут быть выделены с более высокой точностью и детальностью, чем при наземных исследованиях, притом со значительно меньшими затратами средств и времени. Недостающая информация может быть получена при небольшом объеме наземных исследований (по опорным маршрутам и ключевым участкам).

В закрытых районах, где породы скрыты под толщей рыхлых отложений, почвенным и растительным покровом, используется ландшафтно-индикационный метод дешифрирования. Не останавливаясь подробно на изложении этого метода, которое можно найти в специальной литературе [Альтер, 1968; Гудилин, Комаров, 1978 и др.], отметим, что принципиальные его положения основаны на учении о ландшафте как единой природной системе, все компоненты которой (климат, рельеф, поверхностные, почвенные и грунтовые воды, почвы и горные породы, слагающие приповерхностную часть литосферы) находятся во взаимной связи и обусловленности. Благодаря этому устанавливается определенное соответствие между внешней, видимой частью ландшафта и недоступной для непосредственного наблюдения его внутренней частью — литогенной основой.

В результате на основании выделения на снимках различных типов природных комплексов, изучения их структуры и внешних компонентов (в первую очередь форм рельефа и растительности) возможно получение цепной информации о геологическом строении и гидрогеологических условиях изучаемых территорий.

Дешифрирование КФС и АФС во всех случаях сочетается с наземными исследованиями; соотношение между этими видами работ зависит в большей степени от природных особенностей территории, степени ее хозяйственного освоения и многих других факторов. Как показывает опыт, оно может дать от 30 до 60 % информации, которая необходима для составления инженерно-геологических карт среднего масштаба.

Особенно большое значение для изучения и оценки условий строительства крупных гидротехнических сооружений на скальных основаниях имеет выявление разрывных тектонических нарушений и оценка трещиноватости пород.

Выделение разрывных тектонических нарушений основывается на первом этапе работ — на изучении связи между строением рельефа и тектоникой исследуемого региона. Построение по КФС и АФС с использованием других геологических материалов карты неотектоники с выделением поднятий и погружений и осложняющих их поперечных дислокаций позволяет одновременно наметить вероятное положение крупных разрывных нарушений. Дальнейшее уточняющее дешифрирование заключается в выделении линеаментов — различных линейных элементов строения рельефа, представляющих собой в основном формы или части форм рельефа — обрывы, уступы, перегибы склонов, эрозионные борозды и пр. На КФС и АФС они опознаются не только по присущей им геометрии, но и по распределению других элементов ландшафта, в первую очередь растительности, что создает тоновые или цветовые контрасты изображения (рис. 6.2—6.3). Положение разломов можно установить также по наличию длинных прямолинейных участков русел рек, цепочкам источников, несовпадению структурных планов отдельных частей территории (рис. 6.4) и другим признакам.

Дешифрирование дает также полезные сведения о трещиноватости пород, главным образом в открытых районах или там, где четвертичный покров имеет незначительную мощность. На АФС крупные трещины отображаются в виде тонких темных линий или штрихов разной длины. С поверхности они обычно заполнены мелкоземом, на котором формируется почвенный слой и разрастается моховой, травяной или кустарниковый покров, вследствие чего они выделяются на снимке темными полосами на фоне более светлых межтрещинных целиков.

Полезную информацию о трещинной тектонике дает дешифрирование гидрографической сети. Угловатая в плане форма

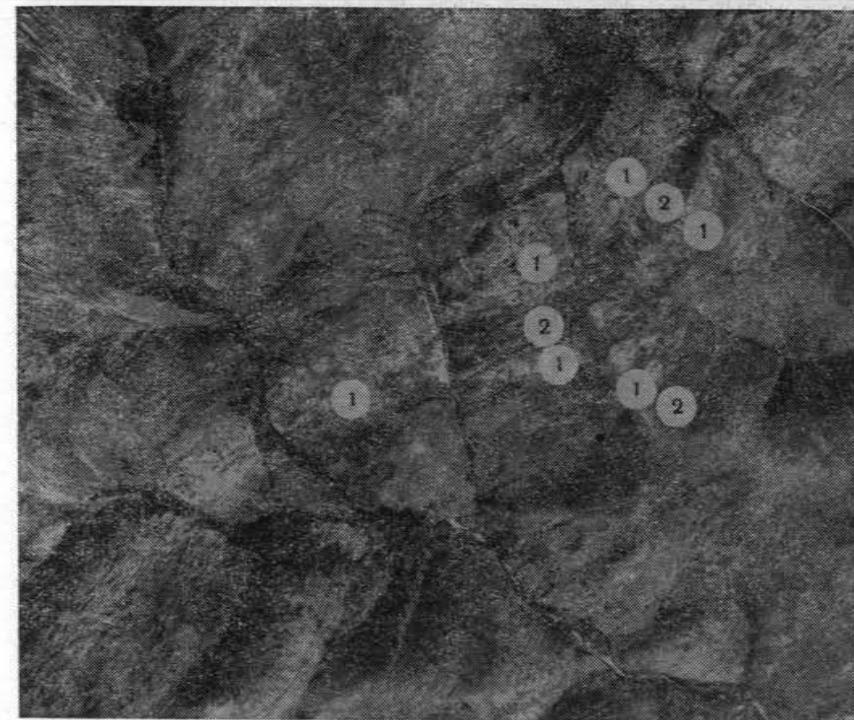


Рис. 6.2. Плановый АФС горного массива с блоковой тектоникой [Гудилин, Комаров, 1978]. Хорошо видны разрывные тектонические нарушения, к которым приурочены ложбины и долины ручьев.

1 — россыпи на выходах прочных пород; 2 — песчано-глинистый элювий на слабых породах, покрытый растительностью

русл ручьев и рек, ортогональное или близкое к нему сочленение притоков разных порядков указывают на интенсивное развитие крупных тектонических трещин, а ориентировка отрезков русел — на простирание основных систем трещин. Как показывает опыт, на АФС удается, как правило, выделить больше крупных трещин, чем при наземной геологической съемке. На рис. 6.5 приведен фрагмент карты трещиноватости, составленной на основании дешифрирования аэроснимков.

При дешифрировании снимков масштаба 1 : 10 000—1 : 15 000 с использованием зеркально-линзового стереоскопа с увеличением 1,3 можно выявить трещины длиной 10—15 м. Число трещин даже в пределах одного массива может быть очень большим, поэтому изучение трещиноватости по АФС осуществляется выборочно на небольших по площади опорных участках, число которых зависит от площади массива. Поскольку на основании дешифрирования удается установить главным

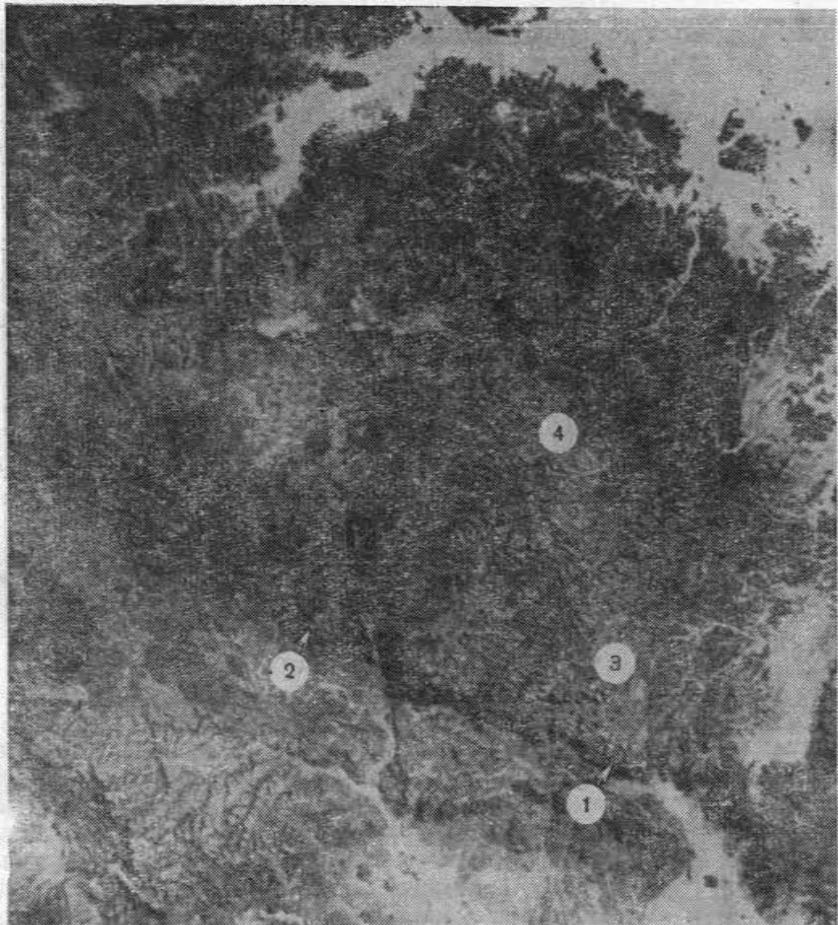


Рис. 6.3. Космический снимок горного района с блоковой тектоникой (Аравийская платформа, горы Эль-Асир.). Снимок получен с пилотируемого корабля «Джемини-IV» [Гудилин, Комаров, 1978].

1 — региональный разлом; 2 — крупные оперяющие деформации; 3 — субпараллельные разломы второго порядка; 4 — участки со сложной блоковой тектоникой

образом простирание трещин, результаты измерений оформляются в виде роз трещиноватости (рис. 6.6).

Дешифрирование аэроснимков позволяет получить также информацию о современных геологических процессах (карсте, оползнях, обвалах и др., см. раздел 6.3.5).

Полезным дополнением к дешифрированию КФС и АФС являются аэровизуальные наблюдения, выполняемые с вертолетов. Они обладают рядом достоинств, из которых в первую очередь следует отметить возможность изучения местности

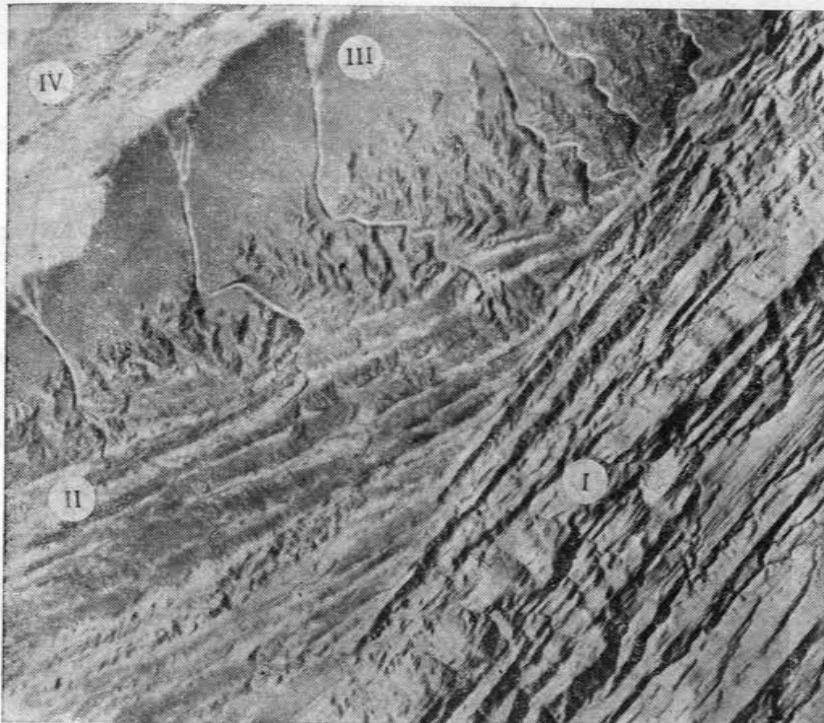


Рис. 6.4. Разлом, опознаваемый на АФС по несовпадению структурных планов. I — низкогорья, сложенные более древними и прочными карбонатными породами неогена; II — низкогорья, сложенные более молодыми и менее прочными песчано-глинистыми неоген-четвертичными отложениями; III, IV — предгорная равнина [Гудилин, Комаров, 1978]

в широком диапазоне масштабов (в зависимости от высоты полета), при этом не только в плановом, но и в перспективном изображении, т. е. в более привычном для глаза ракурсе. Опознание многих объектов существенно облегчается также возможностью видеть местность во всем богатстве присущих ей цветов и оттенков. Аэровизуальные наблюдения обычно сопровождаются перспективным фотографированием (линеаментов, естественных обнажений, проявлений различных геологических процессов, выходов источников и пр.), что позволяет получать наглядную документацию и одновременно существенно облегчает привязку результатов наблюдений к точкам на местности. Аэровизуальные наблюдения могут дополняться внеаэродромными посадками вертолета с обследованием обнажений, выходов источников, проявлений геологических процессов и пр.

По результатам дешифрирования КФС и АФС и аэровизуальных наблюдений составляются различные предварительные

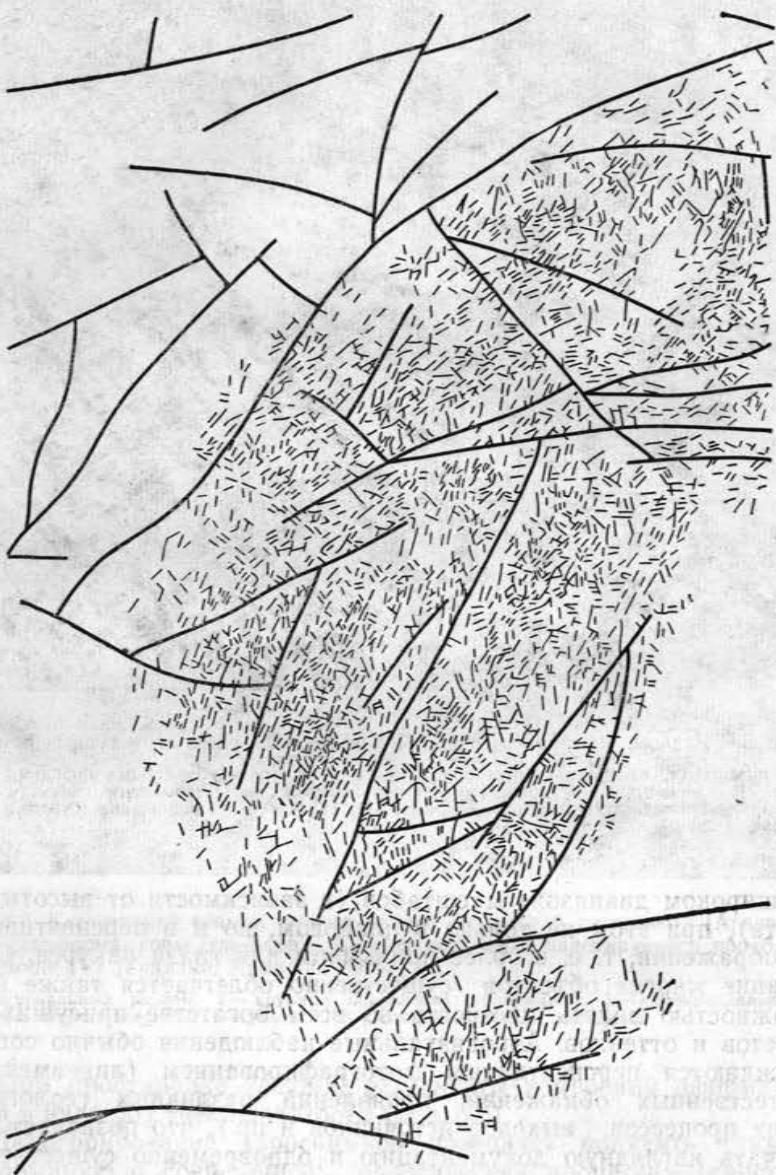


Рис. 6.5. Фрагмент карты тектонических нарушений и трещиноватости массивов основных и ультраосновных пород Кольского полуострова, составленный на основании дешифрирования АФС [«Комплексная...», 1972]

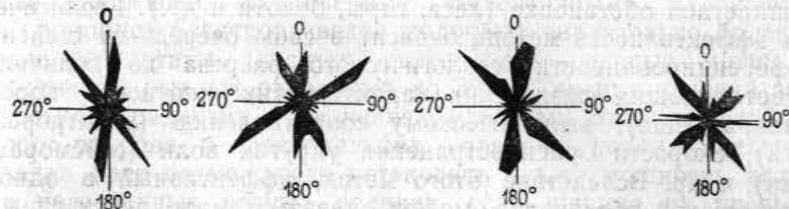


Рис. 6.6. Розы трещиноватости, построенные для различных по составу массивов изверженных пород Кольского полуострова на основании дешифрирования АФС [«Комплексная...», 1972]

карты и схемы: структурно-тектоническая, геоморфологическая, геологические — дочетвертичных (в хорошо обнаженных районах) и четвертичных отложений, водопоявлений, геологических процессов и др. Они служат в дальнейшем основой для составления окончательных карт после завершения наземных исследований и получения различной дополнительной информации.

### 6.2.2. Наземные исследования

Дешифрирование КФС и АФС дополняется комплексом наземных исследований, включающим маршрутные обследования, применение геофизических методов и горно-буровые работы.

Маршрутные обследования позволяют, во-первых, контролировать и уточнять результаты дешифрирования, во-вторых, получить дополнительную информацию о составе, физическом состоянии и свойствах пород и, в-третьих, отбирать образцы пород и пробы воды для лабораторных работ.

Значительное место в комплексе работ отводится геофизическим методам, которые самостоятельно или вместе с другими методами позволяют решать ряд задач, имеющих большое значение для выявления условий строительства гидротехнических сооружений. К их числу относятся: а) определение глубины залегания и картирование кровли скальных пород под покровом четвертичных отложений; б) расчленение массива пород на геологические тела и картирование этих тел; в) выявление, прослеживание и изучение строения зон тектонических нарушений; г) изучение трещиноватости пород; д) определение мощности и строения кор выветривания; е) выявление участков развития древнего и современного карста.

Для решения большей части перечисленных задач применяется ряд геофизических методов, основанных на различных физических предпосылках. Выбор метода определяется его эффективностью (возможностью однозначной интерпретации полученных данных, точностью и надежностью определения геологических параметров), экономическими соображениями, возможностью применения соответствующих технических средств

в конкретной обстановке (леса, горы, болота и др.). Геологическая эффективность метода зависит в свою очередь от степени дифференцированности геологического разреза по величине соответствующих физических характеристик: плотности пород (гравиразведка), электрическому сопротивлению (электроразведка), скорости распространения упругих волн (сейсморазведка) и др. Вследствие этого метод, эффективный в одной геологической обстановке, может оказаться мало действенным или даже бесполезным в другой. Следует также учитывать, что физические свойства пород определяются не только их составом, структурными и текстурными особенностями, но и их физическим состоянием, трещиноватостью, водоносностью и пр. В одних случаях это затрудняет геологическую интерпретацию полученных данных, в других, наоборот, расширяет возможности применения геофизических методов для получения инженерно-геологической и гидрогеологической информации. Иногда хорошие результаты дает комплексирование геофизических методов, обеспечивающее более надежную и однозначную геологическую интерпретацию полученных данных и возможность решения более широкого круга вопросов. Обязательным является сочетание геофизических методов с горно-буровыми работами, которое позволяет выполнить параметрические измерения показателей физических свойств пород на отдельных образцах или в их естественном залегании. Это позволяет также сопоставить результаты геофизических наблюдений, выполненных вблизи шурфа или скважины, с вскрытым геологическим разрезом.

Задача определения глубины залегания и картирования кровли коренных пород под покровом рыхлых четвертичных отложений возникает уже на ранних стадиях изысканий (составление схемы, ТЭО), когда нужно выбрать конкурирующие участки для размещения комплекса гидротехнических сооружений. Большая мощность рыхлых четвертичных отложений на склонах и водоразделах, наличие переуглубления речной долины или древнего эрозионного вреза в пределах выбранного створа могут служить серьезным препятствием при выборе соответствующего участка для строительства. Следовательно, эти вопросы должны быть решены уже в процессе инженерно-геологических съемок среднего масштаба с использованием методов, которые характеризуются большой производительностью, значительной глубинностью и обеспечивают непрерывность наблюдений. Этим требованиям отвечают многие геофизические методы; для картирования кровли коренных пород наиболее часто используются гравиразведка, электроразведка и сейсмическое профилирование.

Применение гравиразведки при обычно наблюдаемых различиях в значениях плотности пород дает возможность фиксировать перепады в положении кровли пород порядка 20—25 м, что позволяет выделять крупные погребенные долины или дру-

гие депрессии, заполненные четвертичными отложениями. С помощью электроразведки получают значительно более точные результаты (десятки сантиметров — первые метры при мощности рыхлых отложений до 30 м), но при условии значительного различия в значениях удельных сопротивлений рыхлого покрова и подстилающих коренных пород. Электроразведка дает возможность установить также мощность аллювия в погребенных речных долинах, если ширина их превышает глубину эрозионного вреза или соизмерима с ней. В противном случае удается наметить только конфигурацию долины в плане. Примером удачного применения электроразведки для этой цели могут служить изыскания, выполненные для обоснования проекта Павловской ГЭС на р. Уфе, где с помощью этого метода была выявлена погребенная долина реки, смешенная относительно современного эрозионного вреза и выполненная песчано-глинистыми отложениями плиоценом (см. рис. 4.3).

Хорошие результаты дает также применение сейсморазведки, позволяющее установить положение кровли коренных пород, сложенных скальными или полускальными породами, с высокой точностью (в десятки сантиметров).

К числу задач, где применение геофизических методов оказывается особенно эффективным, относится выявление, прослеживание и изучение строения зон тектонических нарушений. Для этой цели используются методы грави-, электро- и сейсморазведки. Методы гравиразведки дают положительные результаты при выявлении крупных тектонических нарушений в пределах древних щитов и кристаллических массивов, где к нарушениям приурочены линейные коры выветривания большой мощности, представленные по преимуществу глинистыми образованиями. Над такими зонами образуются четкие аномалии силы тяжести. Линейная форма этих аномалий позволяет достаточно уверенно интерпретировать их как зоны крупных тектонических нарушений. При использовании электроразведки признаком для выделения тектонических зон, обычно заполненных глинистым материалом (глинкой трения, выветрелыми катаклазитами и милонитами) и в той или иной степени обводненных, является наличие линейно-вытянутых участков с минимумами удельного сопротивления. Различия в значениях удельных сопротивлений изменяются в широких пределах. Так, на Украинском кристаллическом массиве удельное электрическое сопротивление пород зон тектонических разломов составляет порядка 300 Ом·м, ненарушенных пород 3—12 тыс. Ом·м, в доломитизированных известняках Казахстана соответственно 150—230 и 1600—4000 Ом·м [Методы..., 1972].

При использовании сейсморазведки тектонические нарушения выделяются по значительному уменьшению скорости упругих волн и по резкому усложнению волновой картины [Сейсмические методы..., 1969].

Для выявления разломов под небольшой по мощности толщей четвертичных отложений последние годы успешно применяется радиометрическая съемка, основанная на том, что тектонические зоны в большинстве случаев обводнены, а воды, поступающие в зону дробления из мелких трещин, характеризуются повышенным содержанием радона.

Одна из важных задач, результаты решения которой во многом определяют выбор места строительства сооружений, их типов, конструкций, методов производства работ и пр., заключается в определении мощности и строения кор выветривания. Для ее решения применяются методы электро- и сейсморазведки, позволяющие определять мощность коры выветривания и расчленять ее на зоны, различающиеся по величине удельного сопротивления или скорости упругих волн, а следовательно, и по степени измененности пород процессами выветривания. Поскольку геологическая интерпретация геофизических разрезов связана с определенными трудностями, необходима проходка некоторого числа опорных скважин или горных выработок.

Геофизические методы применяются также для изучения различных геологических процессов: оползней, карста и др.

В тесной увязке с геофизическими и другими методами наземных исследований выполняются горно-буровые работы, которые, с одной стороны, создают опорную сеть для интерпретации данных геофизических наблюдений, а с другой — дают значительный объем дополнительной информации по широкому кругу вопросов: а) строению толщ горных пород на глубину; б) мощности и строению кор выветривания и разуплотнения горных пород; в) строению зон тектонических нарушений; г) характеру трещиноватости; д) положению уровня грунтовых вод, характеру и степени обводненности толщ горных пород; е) развитию различных геологических процессов (карст, ополни и др.). Скважины используются также для отбора образцов пород и проб воды для лабораторных исследований.

Для перечисленных целей бурятся в основном скважины небольшого диаметра глубиной до 20—30 м, дополняемые некоторым числом глубоких опорных скважин, позволяющих получать более полное представление о геоструктурных и гидрогеологических особенностях территории, характере и состоянии пород на глубине, развитии процессов карста, разуплотнения и др. Горные работы заключаются в проходке неглубоких шурфов, расчисток и в некоторых случаях канав, закладываемых вкрест простирации крутопадающих толщ.

Сведения о применяемых способах бурения, технических средствах, технологии буровых работ, способах отбора образцов, оборудования скважин для гидрогеологических наблюдений, постановке опытных работ и пр. можно найти в руководствах и справочниках [Ребрик, 1979; «Справочник...», 1979].

### 6.3. Детальные инженерно-геологические исследования

Детальные инженерно-геологические исследования выполняются непосредственно на участке размещения сооружений проектируемого гидроузла: плотины, здания ГЭС, различных подземных сооружений. Объектом исследований на этом этапе является массив пород в том его значении, которое было рассмотрено в гл. 2, а задача исследований заключается в установлении всех основных характеристик массива, перечисленных в этой главе, с полнотой, детальностью и точностью, которые необходимы для проектирования сооружений и составления различных инженерно-геологических прогнозов. Для решения этой задачи применяется широкий комплекс методов, включающий инженерно-геологические съемки крупных масштабов, геофизические, буровые и горные работы, а также различные лабораторные и опытные исследования. Все это должно обеспечить изучение массива на полную глубину зоны его взаимодействия с гидротехническими сооружениями (см. гл. 3).

Инженерно-геологические съемки выполняются в зависимости от стадии работ и назначения в широком диапазоне масштабов: от 1:25 000 для всего участка размещения гидроузла до 1:2 000, а иногда и крупнее, в местах расположения основных сооружений. От съемок среднего масштаба, которые мы рассмотрели в предыдущем разделе, они отличаются большей детальностью и повышенными требованиями в отношении получения количественной информации о картируемых объектах.

При детальных исследованиях широко применяются геофизические методы, которые дают возможность не только получить данные о структуре массива, но и оценить степень сохранности пород, а также в первом приближении и их физико-механические свойства. В большинстве случаев геофизические исследования выполняются в тесной увязке с горно-буровыми и опытными работами, что позволяет распространить результаты точечных исследований на весь массив пород или отдельные его части, взаимодействующие с сооружениями.

Наиболее важным источником информации при детальных исследованиях являются горно-буровые работы, позволяющие уточнить геологическое строение массива, определить положение и параметры основных тектонических нарушений, получить данные о мощности и строении кор выветривания, зоны разуплотнения, трещиноватости, степени сохранности пород, их водоносности и пр. Кроме того, скважины используются для гидрогеологических наблюдений и опытных работ (откачки, нагнетания, наливы), а также для отбора образцов пород и проб воды для лабораторных исследований. Для того чтобы обеспечить сохранность керна при инженерно-геологических исследованиях, применяется в основном колонковое бурение

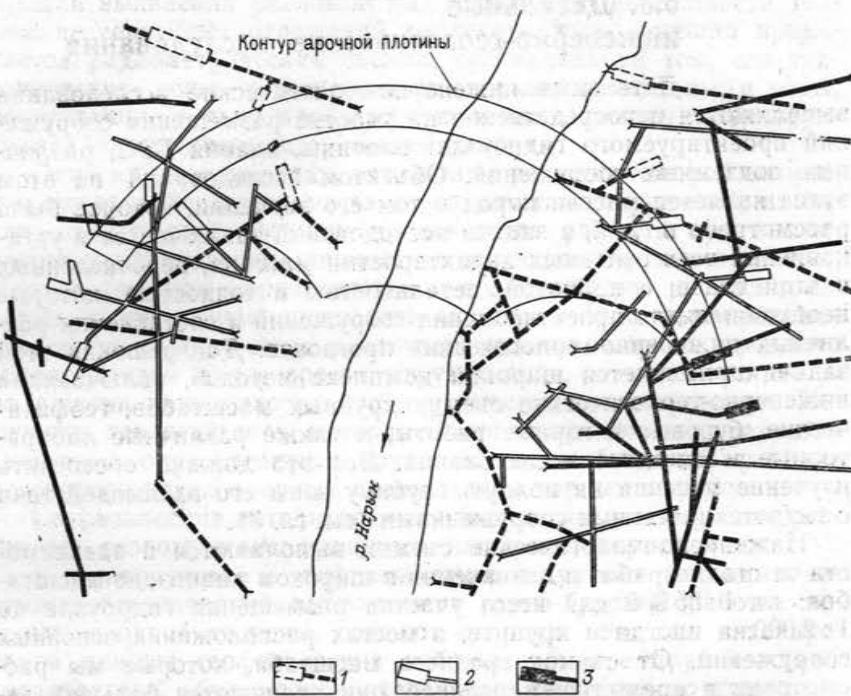


Рис. 6.7. Схема расположения разведочных штолен и камер для опытных работ на участке строительства Токтогульской ГЭС.

1—3 — выработки соответственно нижнего, среднего и верхнего ярусов

с обязательным выполнением ряда ограничений в отношении режима бурения, длины рейса и пр. При горизонтальном или слабо наклонном залегании толщ скважины бурятся в основном вертикально. При крутом падении слоёв — наклонно, с таким расчетом, чтобы пересечь толщу пород нормально к плоскостям напластования. Скважины бурятся в основном с поверхности земли, но в последние годы все более широкое применение находит бурение из подземных выработок, в том числе с веерным расположением скважин, что позволяет сократить объем буровых работ. В некоторых случаях бурение скважин малого диаметра дополняется бурением смотровых скважин диаметром 850—1300 мм. Большой диаметр скважин нередко позволяет сохранить в керне ослабленные прослои и зоны, которые в скважинах малого диаметра полностью разрушаются. Кроме того, смотровые скважины доступны для детального обследования, что существенно увеличивает объем получаемой информации.

Из горных выработок в практике инженерно-геологических исследований применяются шурфы, шахты, штолни. Особенное большое значение имеют последние. Они дают возможность с наибольшей полнотой и детальностью изучить строение мас-

сива пород, разрывные нарушения, трещиноватость, установить степень сохранности пород и пр. Из штолен проходят также специальные камеры для опытного определения механических свойств пород. Штолни закладываются в бортах речной долины в два-три яруса, как показано на рис. 6.7. Протяженность разведочных штолен обычно не превышает 200—300 м, но известны случаи, когда она достигала 500 м.

Важным разделом работ являются гидрогеологические исследования, которые должны обеспечить не только получение достаточно полной картины гидрогеологических условий на момент начала строительных работ, но и надежный прогноз их изменения в процессе строительства и эксплуатации сооружений. Большое внимание уделяется также изучению физических полей, сформировавшихся в массиве горных пород, и различных геологических процессов, для чего используется широкий комплекс методов. Ниже мы рассмотрим более подробно отдельные направления инженерно-геологических исследований, придерживааясь в основном схемы, приведенной на рис. 5.1, а также некоторые специфические задачи, возникающие при обосновании проектов крупных гидротехнических сооружений.

### 6.3.1. Изучение структуры и вещественного состава массивов горных пород

#### 6.3.1.1. Общие положения

Изучение структуры и вещественного состава массива пород — одно из важнейших направлений инженерно-геологических исследований, создающее основу для всех дальнейших работ. Поскольку в термин «структуре», как отмечено в гл. 2, мы вкладываем несколько иное содержание, чем принято в геотектонике и других родственных геологических дисциплинах, рассматриваемые ниже исследования не следует отождествлять с геолого-структурными в их обычном понимании, хотя они имеют с ними много общего. При изучении структуры массивов пород в инженерно-геологических целях в задачу исследований входит: а) расчленение массивов пород на отдельные структурные элементы — геологические тела и нарушающие их неоднородности со всесторонней их характеристикой; б) установление пространственного положения и соотношения выделенных элементов. Конечная цель исследований заключается в построении геолого-структурной модели массива пород, которая в дальнейшем трансформируется в инженерно-геологические и гидрогеологические модели разного назначения.

Одновременно с выделением структурных элементов исследуется их вещественный состав, т. е. слагающие эти элементы горные породы со всеми присущими им характеристиками. Такие работы выполняются по широкой программе и включают

минералогические, петрографические и различные специализированные исследования, направленные в основном на оценку инженерно-геологических свойств пород. При этом последние изучаются в монолите, а не в массиве, т. е. без учета влияния крупных структурных неоднородностей. Исследования вещественного состава выполняются в основном лабораторными методами, которые подробно изложены в специальных руководствах и здесь не рассматриваются. К вещественному составу массивов пород относятся также подземные воды, изучение которых описано в разделе 6.3.2.

Геолого-структурные исследования частично выполняются еще в процессе площадных исследований при инженерно-геологических съемках среднего масштаба, о которых мы писали выше, но последние дают надежную информацию только о строении приповерхностных частей массивов пород, а глубинное их строение остается по существу неисследованным. Для оценки условий строительства гидроузлов, в состав которых входят высокие плотины и различные подземные сооружения, необходимы данные о структуре массивов пород на полную глубину техногенной области взаимодействия, т. е. на 50—100 м, а при глубоком заложении подземных машинных залов или туннелей — до 400—500 м, а иногда и более. В связи с этим геолого-съемочные работы дополняются большим объемом глубинных работ — геофизических, горных, буровых, сопровождающихся различными видами гидрогеологического и инженерно-геологического опробования. Некоторый объем таких глубинных работ выполняется при составлении ТЭО, но основная часть приходится на стадию составления технического проекта.

#### 6.3.1.2. Выделение геологических тел

Одна из основных задач геолого-структурного анализа при инженерно-геологических исследованиях заключается в расчленении массивов пород на отдельные структурные элементы — геологические тела разных типов, обладающие квазиоднородностью по выбранному свойству или комплексу свойств. В платформенных условиях с горизонтальным или слабо наклонным залеганием пластов и почти полным отсутствием разрывных нарушений (за исключением кристаллического фундамента) эта задача решается наиболее просто. На начальном этапе расчленение толщ осуществляют традиционными геологолитологическими методами с использованием различных макроскопических признаков, а выделяемые тела характеризуются однородностью по составу и различным структурным особенностям, включая слоистость, трещиноватость, кавернозность и другие мелкие структурные неоднородности. Существенное различие отдельных пластов по этим признакам обуславливает также существенное различие их по физическим, механическим

и фильтрационным свойствам, и построенная таким образом структурная модель легко может быть трансформирована в инженерно-геологические или гидрогеологические структурные модели специального назначения (для расчета на фильтрацию, по деформациям и др.). Основная задача в этом случае заключается в установлении достаточно надежных обобщенных или расчетных показателей соответствующих свойств и в некоторых случаях в объединении нескольких элементов в один, если различия в показателях свойств незначительны с практической точки зрения. В довольно редких случаях, когда изучаемая толща по макроскопическим характеристикам однородна, но отдельные ее части могут существенно различаться по физико-механическим свойствам, применяются статистические методы расчленения [Комаров, Хайме, Бабенышев, 1976].

В орогенных регионах с интенсивной складчатой и блоковой тектоникой задача усложняется, так как здесь приходится учитывать влияние различных факторов (разная литология отдельных пластов, наличие складчатых и разрывных нарушений). Обычно в этих условиях расчленение осуществляется путем последовательного использования признаков, а ранжирование их по степени важности зависит от особенностей местной геологической обстановки, типов и конструкций проектируемых сооружений и других факторов. Как показывает опыт строительства ряда крупных гидроузлов в пределах горных сооружений со складчато-блоковой тектоникой (Ингуринская ГЭС, Токтогульская ГЭС и др.) и незначительным различием в механических и фильтрационных свойствах пород, основное значение при построении структурных моделей общего и специального назначения имеет выделение структурных блоков и разделяющих их тектонических нарушений, которые резко отличаются по инженерно-геологическим характеристикам.

В этом случае решение такой задачи также может быть обеспечено методами геолого-структурного анализа и сопоставления обобщенных показателей свойств пород, вычисленных для отдельных структурных элементов; иногда целесообразно применение статистических методов (например, при выделении зон повышенной трещиноватости или водопроницаемости на основе обработки массовых определений значений удельного водопоглощения).

#### 6.3.1.3. Изучение разрывных нарушений

Выделение и картирование крупных разрывных нарушений осуществляется в процессе инженерно-геологической съемки среднего масштаба, что создает надежную основу для дальнейших более детальных исследований. В условиях речных долин, часто имеющих крутые, а иногда почти вертикальные склоны, большую помощь при картировании разломов может

оказать фототеодолитная съемка, более подробно рассмотренная в разделе 6.1.3.4. Большое внимание уделяется изучению разломов также при наземных исследованиях: в обнажениях, расчистках, шурфах, шахтах, штольнях. При наземных исследованиях детально изучается строение тектонической зоны, ее геометрические формы, элементы залегания, характер, состояние и свойства слагающих ее пород, степень обводненности и пр. Отмечается развитие стрессо-минералов и экзогенных изменений. Устанавливаются по мере возможности направление и амплитуда смещения крыльев нарушения по горизонтальной и вертикальной составляющим. Изучаются соотношение данного нарушения с другими структурными элементами, а также явления, сопровождающие тектоническое нарушение (трещины оперения, изгиб слоев у поверхности сместителя, приразрывная сланцеватость и др.). Особое внимание уделяется зеркалам скольжения, царапинам, бороздам, по которым можно определить кинематический тип смещения (брос, сбросо-сдвиг и др.) и его направление. Последнее можно установить также по складкам волочения.

Изучение блоковой тектоники позволяет выбрать место положения гидроузла и скомпоновать сооружения таким образом, чтобы избежать крупных и особенно активных тектонических нарушений.

#### 6.3.1.4. Изучение трещиноватости

Большое внимание при геоструктурных исследованиях уделяется изучению трещиноватости пород, поскольку она в большей степени, чем состав или другие литолого-петрографические особенности пород, определяет их прочностные, деформационные или фильтрационные свойства.

Задачи изучения трещиноватости многообразны и зависят в большой степени от этапа и детальности исследований. На ранних этапах (схема, ТЭО) основная задача выполняемых работ заключается в получении общего представления о степени и характере трещиноватости отдельных выделенных комплексов пород в пределах слагаемых ими геологических структур. В результате исследований должны быть выявлены основные генетические типы трещин и их системы и по каждому типу и системе получены достаточно надежные оценки основных параметров — элементов залегания трещин, их длины, ширины, расстояний между трещинами, показателей морфометрии поверхности трещин и др.

На последующих этапах (технический проект, рабочие чертежи) задача исследований существенно усложняется из-за необходимости получения достаточно полного представления о пространственной (объемной) структуре массива пород, для чего требуется не только определить основные параметры тре-

щин и трещиноватости в целом, но и проследить изменения этих параметров как по площади массива, так и на глубину. Кроме того, необходимо выявить и охарактеризовать крупные трещины, которые могут представлять опасность для устойчивости сооружений.

Для изучения трещиноватости применяются дешифрирование АФС, фототеодолитная съемка, геофизические методы исследований, описываются трещины в естественных обнажениях, горных выработках, керне буровых скважин.

Возможности дешифрирования трещин на АФС были кратко охарактеризованы выше. Большие возможности создает также применение фототеодолитной съемки (в комбинации с аэрофотосъемкой или без нее), позволяющей составить детальные карты и планы трещиноватости (в том числе фронтальные) и определить с помощью специальных измерительных операций элементы залегания трещин и основные их параметры (протяженность и ширину). Методика и техника этих работ подробно освещены в специальных руководствах. Приведем в качестве примера фототеодолитные работы, выполненные Гидропроектом для Еландинской ГЭС (технико-экономическое обоснование) и Днепрогэс-II (рабочие чертежи).

На Еландинской ГЭС фототеодолитная съемка выполнялась для составления топографической карты створа масштаба 1:2000 и геологической карты 1:5000. Для составления геологической карты было отдешифрировано 650 трещин (не считая других геолого-геоморфологических элементов) и нанесено на снимок 450 точек геологических наблюдений. Фрагмент фототеодолитного снимка приведен на рис. 6.8, фрагмент карты трещиноватости — на рис. 6.9. На карте трещиноватости показаны отдешифрированные в поле трещины, элементы рельефа и точки геологических наблюдений. На основании данных фототеодолитной съемки, дополненной другими исследованиями, были построены диаграммы трещиноватости, определена блочность пород, дана приближенная оценка коэффициента трещинной пустотности, выявлены потенциально неустойчивые блоки пород и подсчитаны их объемы.

В котловане Днепрогэс-II фототеодолитная съемка проводилась с целью составления топографического плана котлована масштаба 1:200 и детальной карты трещин масштаба 1:500. Предварительно было проведено кратковременное осушение котлована. В процессе дешифрирования снимков выделено более 1200 трещин длиной 3—5 м и более. После обработки снимков на фотограмметрических приборах составлена карта трещиноватости массива гранитов с определением элементов залегания отдельных трещин, построены круговые диаграммы трещин, выделены отдельные системы трещин и вычислены средние значения основных параметров (элементов залегания, длины и



Рис. 6.8. Фототеодолитный снимок склона долины в створе Еландинской ГЭС. По В. Н. Андрееву

плоскости обнажения, ширины, расстояния между трещинами и др.), определены блочность пород, вычислены коэффициенты трещинной пустотности для отдельных участков котлована. На основании всех этих материалов была составлена модель трещиноватости основания здания гидростанции, используемая в дальнейшем при различных расчетах. Последующая документация котлована, проводившаяся в процессе строительства

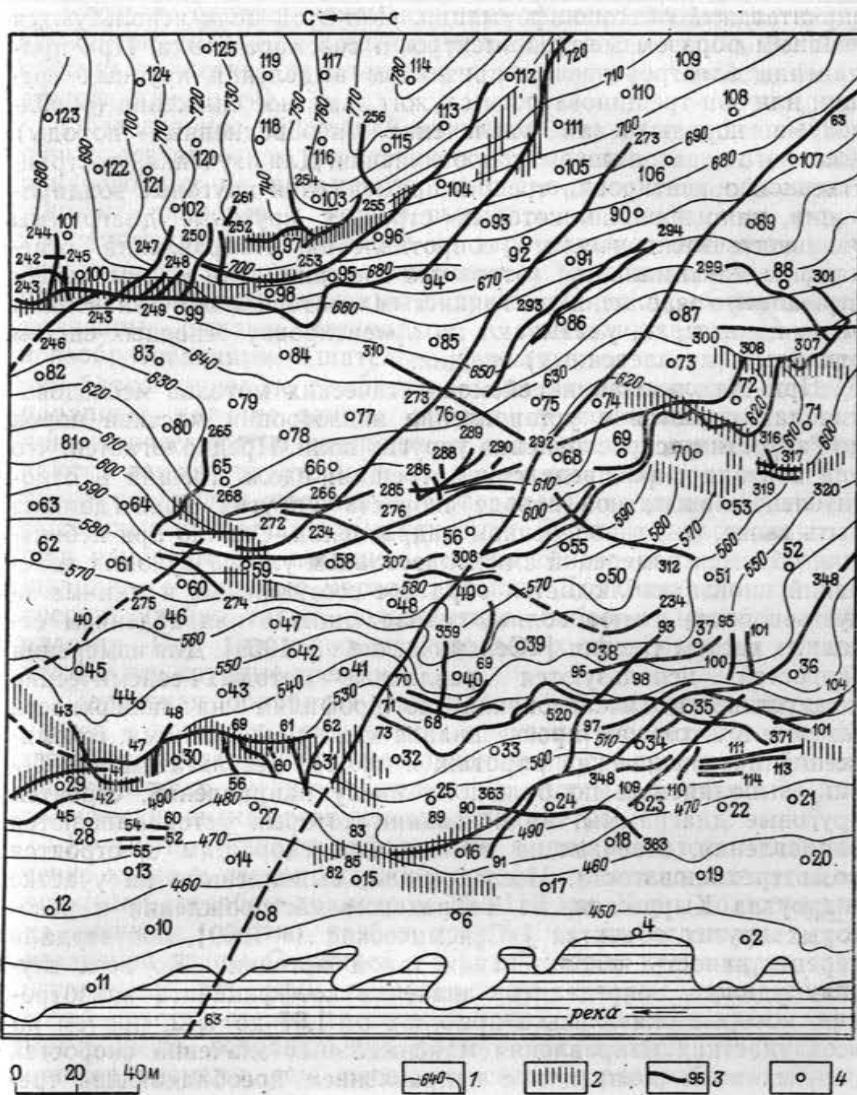


Рис. 6.9. Фрагмент карты трещиноватости склона долины в створе Еландинской ГЭС, составленной на основании дешифрирования АФС.

1 — горизонтали, 2 — уступы в рельефе, 3 — трещины и их номера, 4 — точки геологических наблюдений (по В. Н. Андрееву)

сооружения, подтвердила высокую точность карты трещиноватости, составленной на основании фототеодолитной съемки.

Изучение трещиноватости пород относится к числу задач, при решении которых применение геофизических методов дает

значительный объем информации. Для этой цели используются главным образом методы электро- и сейсморазведки. При применении электроразведки признаком выделения крупных трещин или зон трещиноватости служит заметное снижение (обводненные породы) или увеличение (необводненные породы) удельного электрического сопротивления. Для изучения пространственной ориентировки трещин применяются круговые зондирования, на основании которых строятся круговые диаграммы удельного электрического сопротивления. Направления, отвечающие максимальным (открытые трещины) или минимальным (трещины, заполненные глинистым материалом) значениям этого показателя, указывают на ориентировку основных систем открытых (незалеченных) трещин.

При использовании сейсмоакустических методов исследования заключаются в установлении анизотропии массива пород по скорости распространения упругих волн. Предполагается, что она связана с распределением трещин: вдоль трещин в относительно монолитной породе скорость упругих волн должна быть выше, чем в поперечном направлении. Однако при небольших объемах измерений с использованием ультразвуковых колебаний иногда наблюдается обратное соотношение, и минимальную скорость имеют волны, совпадающие с направлением основных систем трещин [«Сейсмические...» 1969]. Для измерения скоростей используются различные методы: сейсмические и акустические исследования по профилям на поверхности земли и в штолнях, просвечивание между скважинами, сейсмический и акустический каротаж и др. По результатам измерений, выполняемых по большому числу направлений, строятся круговые диаграммы, на основании которых устанавливаются направления, отвечающие пониженным скоростям, и строятся розы трещиноватости. Исследования, выполненные на участке гидроузла Кырджали, на Талнахском месторождении и некоторых других объектах [«Сейсмические...» 1969], подтвердили перспективность использования такой методики. Во всех случаях удалось определить значения коэффициента анизотропии, которые оказались в пределах от 1,07 до 1,42, причем на всех участках направления максимальных значений скоростей упругих волн совпадали с направлением преобладающей трещиноватости, определенным другими методами.

Для оценки степени трещиноватости пород используются также результаты нагнетания в скважины воды или воздуха. В зависимости от величины водопоглощения все породы принято подразделять по степени трещиноватости (в л/мин) на следующие группы:

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| очень слаботрещиноватые . . . . . | 0,01     |
| слаботрещиноватые . . . . .       | 0,01—0,1 |
| среднетрещиноватые . . . . .      | 0,1—1    |
| сильнотрещиноватые . . . . .      | 1        |

Следует, однако, учитывать, что водопроницаемость пород зависит не только от степени трещиноватости, но и в большой степени от состава заполнителя, а также от его свойств (в частности, плотности).

Обследование обнажений включает детальное описание трещин с составлением зарисовок и проведением массовых замеров основных их параметров: длины в плоскости обнажения, ширины, размеров и формы выступов на поверхности стенок трещин и др. В описаниях и на зарисовках указывается генетический тип трещин в соответствии с принятыми классификациями. Кроме того, трещины подразделяются на открытые, заполненные рыхлым материалом, и залеченные минеральными новообразованиями. Тщательно фиксируются следы перемещений блоков пород по трещинам — зеркала скольжения, борозды, царапины, наличие глинки трения, позволяющие установить кинематический тип смещения и направление движения. Изучаются также гидротермальные изменения стенок трещин (наличие различных вторичных минералов), а также изменения, вызванные процессами выветривания. Элементы залегания трещин измеряются с помощью геологического компаса, длина и ширина — с помощью мерной линейки. Для измерения ширины трещин удобно также пользоваться набором калиброванных пластин. При детальных исследованиях фиксируются и изучаются все крупные трещины.

Первичная обработка результатов наблюдений осуществляется с помощью графических и статистических методов, позволяющих установить общие закономерности пространственного распределения трещин, выделить их системы и вычислить статистические оценки всех основных параметров.

Большую и ценную информацию о трещиноватости дает изучение керна и стенок скважин, которые обычно проходятся колонковым способом диаметром 75—150 мм. Керн, поднимаемый из скважин, обычно разбит трещинами на отдельные куски различной длины. С нижней и верхней сторон куски керна часто ограничены плоскими поверхностями, которые представляют собой участки стенок трещин. В зонах дробления куски керна могут иметь неправильную форму; чем больше их число и меньше размеры, тем, очевидно, сильнее раздроблена порода. Для количественной оценки степени раздробленности породы используются различные критерии. Так, за рубежом для этой цели часто применяют показатель нарушенности керна (*RQD*), вычисляемый как отношение суммарной длины кусков керна размером более 10 см к общей длине рейса. Этот показатель имеет невысокую информативность и в практике исследований в СССР широко не применяется. Используются также такие показатели, как процент выхода керна, средний размер обломков керна в пределах выделенного интервала и др. Все эти характеристики не лишены недостатков, так как в большой

степени зависят не только от трещиноватости пород, но и от степени их сохранности (выветрелости). Однако, несмотря на недостатки, они все же позволяют разделить интервал разреза, вскрытый скважиной, на отдельные зоны, различающиеся по степени трещиноватости, а при наличии большого числа скважин помогают проследить эти зоны по площади. В дальнейшем такие зоны могут быть связаны с результатами геофизических исследований, данными количественного изучения трещиноватости в горных выработках, фильтрационного опробования пород и пр., что может служить основой для составления объемной структурной модели массива пород.

По керну скважин можно определить также угол падения трещин, что представляет интерес для оценки условий строительства сооружений. Установить азимут падения и простирации трещин труднее, так как для этого необходима фиксация керна в его естественном положении. Получение такого ориентированного керна сложно и дорого; кроме того, в каждом рейсе можно фиксировать только один верхний кусок керна. По этим причинам метод получения ориентированного керна на практике применяется довольно редко. Иногда об элементах залегания трещин можно судить по косвенной информации, например по их соотношению с такими характерными текстурными признаками, как слоистость, сланцеватость и др., если их ориентировка в пространстве установлена и устойчива.

Изучение керна позволяет отличать открытые трещины и трещины, заполненные рыхлым материалом, от залеченных и получить информацию о морфологии поверхности трещин, что представляет большой интерес для экстраполяции результатов испытаний пород на сдвиг, выполняемых на небольших площадках, на некоторую часть массива пород.

Для изучения стенок скважин применяются специальные приборы. Простейшим из них является буроскоп — зеркальная система с источником освещения, позволяющая осмотреть стенки скважины с помощью бинокля. Полученная информация носит качественный характер, так как каких-либо измерений таким способом осуществить нельзя. Более совершенную конструкцию имеет прибор РПИ — радиальный внутренний перископ, позволяющий производить осмотр стенок скважин диаметром от 30 до 400 мм и глубиной до 30 м и осуществлять измерения наблюдаемых объектов, в частности ширины трещин.

Для фотографирования стенок скважин используются фотобуроскопы. В необводненных скважинах осмотр стенок скважин может осуществляться с помощью фототелевизионных установок.

Ценную информацию о степени и характере трещиноватости пород, вскрываемых скважиной, дают методы электрического и радиоактивного каротажа и некоторых видов гидравлического опробования скважин (резистивиметрия, расходометрия).

Методы электрического каротажа основаны на том, что в трещиноватых насыщенных водой скальных породах удельное электрическое сопротивление (УЭС) заметно снижается по сравнению с монолитными разностями. Установлено, например, что в сильнотрещиноватых известняках, насыщенных пресными водами, УЭС составляет 40—50 Ом·м, в водонасыщенных, но слаботрещиноватых — 75—250 Ом·м, а в монолитных — 500 Ом·м и более.

Методы радиоактивного каротажа также позволяют установить степень трещиноватости пород (по естественной гаммаактивности или рассеянному гамма-излучению) и выделить крупные тектонические трещины, выполненные глинистым материалом.

Метод резистивиметрии основан на фиксации рассоления воды в скважине, в которую предварительно погружают электролит, при поступлении в нее пресной воды и постепенном оттоке засоленной, что позволяет выделить зоны повышенной водопроницаемости и оценить их количество. Полезные результаты дает также метод расходометрии (см. раздел 6.3.2.2).

Для изучения трещиноватости массива пород используются также шахты и штольни. Как и при изучении обнажений, исследования включают детальное описание трещин и замеры всех их параметров. Учитывая большую ценность получаемой информации, трещины документируют особенно тщательно, со сплошной зарисовкой стенок, забоев, а в штолнях — и свода выработок. Применяется также масштабное фотографирование на черно-белую или специальные виды пленок.

Изучение трещин в горных выработках позволяет установить закономерности изменения трещиноватости по глубине и в направлении от склона долины к водоразделу. Эти данные, дополняемые материалами других видов исследований, дают общее представление о трещиноватости изучаемого массива.

Обработка результатов изучения трещиноватости осуществляется в два этапа. На первом этапе (предварительная обработка) обобщаются результаты наблюдений по отдельным изучавшимся объектам (обнажениям, горным выработкам), для чего используются простейшие графические и статистические методы, на втором этапе (окончательная обработка) — обобщенные данные распространяются на отдельные комплексы пород, тектонические блоки, для чего составляются различные карты, планы, разрезы или блок-диаграммы.

Наиболее наглядными способами предварительной обработки результатов замеров элементов трещин является составление «роз трещиноватости» и круговых диаграмм. Для составления диаграмм применяются различные стереографические сетки: полярные с центром, расположенным на полюсе, экваториальные с центром на пересечении экватора с нулевым меридианом. В Советском Союзе для этой цели используются главным обра-

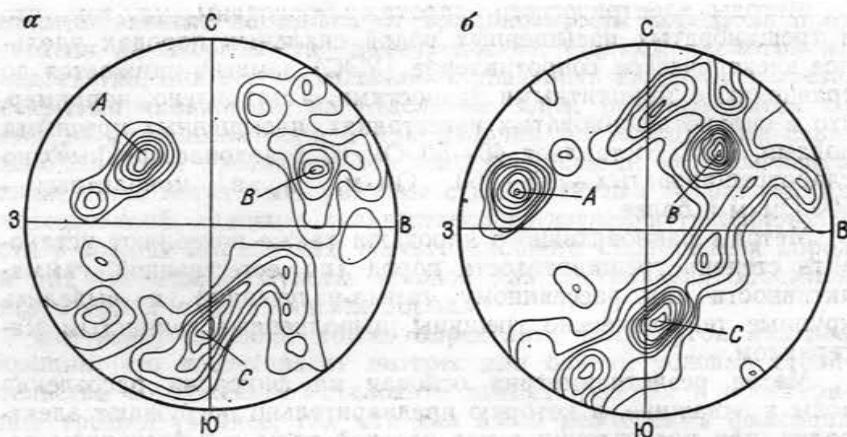


Рис. 6.10. Сводные круговые диаграммы мелкой трещиноватости на участке строительства арочной плотины Кассеб. По А. А. Варге и А. В. Ростиславлеву.

*a* — левобережный участок — западное крыло антиклинали третьего порядка; *b* — правобережный участок — восточное крыло той же антиклинали. Отчетливо выражены три системы трещин, сохраняющие устойчивость в пределах всей геологической структуры

зом полярные сетки равноплощадной проекции Вальтера — Шмидта и Ковринского. На диаграмму наносятся точки пересечения перпендикуляров, восстановленных к поверхности трещины, с верхней сферой, поэтому каждая трещина изображается на диаграмме в виде точки. Подсчет точек может осуществляться с помощью трафарета Брайча, на котором поле диаграммы разбито на 200 частей, отвечающих равновеликим участкам на поверхности сферы. Подсчет точек ведется без перекрытия участков, что создает необходимую основу для применения статистических методов. Полученные значения выражаются в процентах от общего числа точек, нанесенных на диаграмму. После этого на диаграмме проводятся изолинии методом интерполяции (рис. 6.10). В настоящее время составлены программы для ЭВМ, позволяющие автоматизировать весь процесс составления диаграмм и значительно снизить затраты времени [Иванова, Чернышев, 1974].

С помощью круговых диаграмм можно установить относительную частоту трещин, имеющих различную пространственную ориентировку, выделить отдельные системы трещин и определить для каждой из них средние значения элементов залегания (углов и азимутов падения). По распределению плотности точек на диаграмме можно также судить о четкости дифференциации трещин на отдельные системы, а это в свою очередь помогает при оценке степени анизотропности массива пород по механическим и фильтрационным свойствам и определении положения осей анизотропии. Средние значения углов и азимутов падения трещин устанавливаются на диаграмме по цент-

рам максимумов плотности точек, а среднее значение их простирания определяется путем расчета.

Круговые диаграммы на сетках равноплощадных проекций можно использовать также для решения различных структурно-геологических задач: определения углов пересечения различных систем трещин, пересечения систем трещин со слоистостью, осями складок, тектоническими нарушениями и пр.

В предварительную обработку результатов изучения трещин входит также определение статистических параметров распределения основных характеристик трещин (длины, ширины) и вычисление некоторых обобщенных показателей: модуля трещиноватости, коэффициента трещинной пустотности. При вычислениях используется простейшая статистическая модель случайной величины, которая основана на предположении независимости результатов измерений от координат пространства. Для того чтобы использовать эту модель, массив пород предварительно (на основе качественного анализа результатов наблюдений) подразделяют на отдельные условно однородные участки (в плане) или блоки (по объему), в пределах которых пространственные изменения трещиноватости не выражены или проявлены настолько слабо, что ими можно пренебречь. После этого устанавливают аппроксимирующий закон распределения соответствующей величины и вычисляют основные статистические параметры: оценки математического ожидания и дисперсии. Как показали многочисленные исследования [Рац, 1962; Чернышев, 1965; Погребисский, 1969 и др.], распределение основных параметров трещин может быть с достаточным приближением аппроксимировано либо нормальным законом (чаще ширина трещин), либо логнормальным законом (длина трещин, расстояние между трещинами), поэтому вычисление статистических параметров выполняется общепринятыми методами и трудностей не представляет.

При окончательной обработке результатов большое внимание уделяется количественной оценке трещиноватости, для чего в современной практике используется большое число показателей, характеристику которых можно найти в книге Л. И. Нейштадт и И. А. Пирогова [1969]. Все показатели можно подразделить на три группы: линейные, площадные и объемные.

Из линейных показателей наиболее простым и удобным является модуль трещиноватости  $M_t$ , равный среднему числу трещин, приходящихся на единицу длины прямой, нормальной к простиранию измеряемой системы трещин. По величине  $M_t$  можно оценить частоту трещин в каждой из систем, пользуясь следующей шкалой:

|                                       |                   |
|---------------------------------------|-------------------|
| частота трещин очень редкая . . . . . | $M_t < 2$         |
| " " " редкая . . . . .                | $2 \leq M_t < 5$  |
| " " " густая . . . . .                | $5 \leq M_t < 20$ |
| " " " очень густая . . . . .          | $M_t > 20$        |

Из площадных показателей можно использовать показатель, получивший название **плотности трещиноватости**, определяемый средней протяженностью трещин, приходящихся на единицу площади обнажения (обычно 1 м<sup>2</sup>).

Широко применяется также показатель трещинной пустотности  $K_{\text{пп}}$ , предложенный Л. И. Нейштадт [1957]. Различают площадной  $K_{\text{пп}}$ , численно равный суммарной ширине трещин, приходящихся на единицу площади обнажения, и объемный  $K_{\text{пп}}$ , соответственно равный суммарному объему трещин, приходящихся на единицу объема породы. Для последнего случая вычисления выполняются по формуле [Рекомендации по изучению..., 1974]

$$K_{\text{пп}} = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i + b_i} 100 \%,$$

где  $a_i$  — расстояние между трещинами в отдельной системе;  $b_i$  — ширина трещин в данной системе;  $n$  — количество систем трещин.

Л. И. Нейштадт предлагает подразделять породы по этому показателю на четыре группы:

|                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| слаботрещиноватые . . . . .        | $K_{\text{пп}} < 2 \%$      |
| среднетрещиноватые . . . . .       | $2 < K_{\text{пп}} < 5 \%$  |
| сильнотрещиноватые . . . . .       | $5 < K_{\text{пп}} < 10 \%$ |
| очень сильнотрещиноватые . . . . . | $K_{\text{пп}} > 10 \%$     |

Трещины разбивают массив пород на блоки, которые в зависимости от числа, направления систем трещин, густоты трещин в отдельных системах могут иметь различную форму и размеры. Для количественной характеристики предложен показатель — **блочность**, характеризующий средний поперечный размер блока.

При окончательной обработке результатов изучения составляют модели трещиноватости массива пород в форме различных карт, схем, планов, блок-диаграмм и пр., дополняемых таблицами и текстовыми материалами. Карты трещиноватости обычно составляют на геолого-структурной основе, где показывают границы геологических структур, структурных зон или блоков, оси складок, линии тектонических нарушений, границы литолого-стратиграфических комплексов отложений и пр. Трещиноватость отображается в виде розы трещиноватости, круговых диаграмм или условными знаками с различными количественными характеристиками.

Построение карт трещиноватости позволяет получить представление о характере и степени неоднородности массива пород по трещиноватости, выявить основные закономерности изменения трещиноватости в пространстве, установить положение и оконтурить зоны повышенной трещиноватости и пр. На крупно-

масштабных планах дополнительно показывается положение всех наиболее крупных выявленных трещин с указанием их элементов залегания и других характеристик.

Для расчетов устойчивости упорных массивов и примыканий арочных плотин составляются карты-резы трещиноватости, на которых также указываются все крупные трещины с соответствующими характеристиками и, кроме того, преобладающие направления мелкой трещиноватости, выявленные с помощью построения круговых диаграмм [«Инженерно-геологические...», 1972].

Резы составляются по оси основных сооружений и другим важным в практическом отношении направлениям. Характеристика отдельных трещин, показанных на картах и разрезах, приводится в прилагаемых к ним таблицах.

#### 6.3.1.5. Изучение кор выветривания

Для изучения кор выветривания применяются различные методы: петрографические, геофизические, специальные инженерно-геологические и др.

Петрографические методы позволяют выявить изменения в породах под воздействием процессов выветривания и проследить эти изменения по разрезу. Анализ таких изменений дает возможность оценить в первом приближении возможное их влияние на механические и фильтрационные свойства пород. Несмотря на значительную трудоемкость петрографических исследований, выполнение их является обязательным, в частности для составления опорных разрезов коры выветривания — основы для надежной геологической интерпретации результатов геофизических и других методов исследований, а также для распространения результатов точечных испытаний на большие объемы породы (зоны, выделяемые в строении коры выветривания).

Применение геофизических методов (главным образом сейсморазведки и в меньшей степени электроразведки) основано на том, что выветривание пород проявляется в изменении таких характеристик, как скорость распространения упругих волн, удельное электрическое сопротивление и др. Благодаря непрерывности и высокой производительности геофизические методы позволяют не только определить мощность коры выветривания и расчленить ее на отдельные зоны, но и проследить за изменениями разреза на всей площади исследований.

Построение корреляционных зависимостей позволяет использовать геофизические методы для приближенной оценки механических и фильтрационных свойств пород коры выветривания в массиве со всеми присущими им формами неоднородности (разломами, трещинами, пустотами и др.), что имеет большое практическое значение.

Специальные инженерно-геологические исследования коры выветривания основаны на непосредственном изучении изменений физических, механических и фильтрационных свойств под влиянием процессов выветривания. Для этой цели используются в первую очередь такие показатели, которые, с одной стороны, чутко реагируют на степень выветрелости пород, а с другой — просты в определении и могут быть увязаны с прочностными и деформационными характеристиками пород, используемыми в расчетных формулах. К их числу относится в первую очередь объемная масса ( $\gamma$ ). Отношение объемной массы образца выветрелого грунта к объемной массе невыветрелого образца получило название коэффициента выветрелости породы  $K_{\text{вс}}$ . По величине этого коэффициента все породы, согласно СНиП II-15—74, делятся на следующие группы:

|                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| невыветрелые . . . . .     | $K_{\text{вс}} = 1$         |
| слабовыветрелые . . . . .  | $1 > K_{\text{вс}} > 0,9$   |
| выветрелые . . . . .       | $0,9 > K_{\text{вс}} > 0,8$ |
| сильновыветрелые . . . . . | $K_{\text{вс}} < 0,8$       |

Широко используется для этой цели также показатель временного сопротивления сжатию  $R_c$ . В проектно-изыскательских организациях Урала этот показатель служит в качестве основного критерия для разделения выветрелых пород на классы: разборная скала —  $R_c > 5$  МПа, рухляк —  $R_c$  от 1 до 5 МПа и сапролит —  $R_c < 1$  МПа. Для выветрелых пород этот показатель зависит от их водонасыщенности. Это дает возможность использовать для оценки выветрелости пород соотношение между значениями  $R_c$ , полученными для выветрелой и невыветрелой пород. Для свежих невыветрелых пород эта величина близка к единице, для выветрелых отличается от единицы, и тем больше, чем сильнее выветрена порода. В уральских проектно-изыскательских организациях этот показатель, носящий название коэффициента размягчаемости  $K_{\text{разм}}$ , используется наравне с  $R_c$  для выделения основных классов выветрелых пород: разборная скала —  $K_{\text{разм}} > 0,75$ , рухляк —  $K_{\text{разм}} < 0,75$ .

### 6.3.2. Гидрогеологические исследования

#### 6.3.2.1. Общие положения

Большое значение в комплексе инженерных измерений, выполняемых для обоснования гидротехнического строительства, имеют гидрогеологические исследования. Они должны дать исходный материал, необходимый для общей характеристики гидрогеологических условий строительства сооружений и обоснованного прогноза ряда процессов и явлений, которые нередко играют определяющую роль при выборе типов, конструкций и компоновке сооружений, определении состава защитных мероприятий, выборе методов производства строительных

работ и пр. К числу важнейших из них относятся: а) потери воды на фильтрацию из водохранилищ на участках расположения напорных сооружений и в соседние дрены; б) притоки воды в строительные котлованы, выемки и подземные сооружения; в) развитие фильтрационных деформаций в массивах пород; г) выщелачивание водорастворимых соединений и влияние этого процесса на устойчивость оснований сооружений; д) агрессивное воздействие подземных вод на металл и бетон.

Решение этих задач сопряжено с определенными трудностями, поскольку строительство сооружений и создание водохранилищ коренным образом изменяют всю гидрогеологическую обстановку на участке возведения сооружений. По этой причине для решения перечисленных выше задач требуется не только достаточно полная и всесторонняя оценка гидрогеологических условий участка строительства гидроузла в их ненарушенном (естественном) состоянии, но и надежный прогноз изменения всех гидрогеологических параметров на период строительства и эксплуатации сооружений.

#### 6.3.2.2. Изучение водопроницаемости массивов горных пород

Опытно-фильтрационные исследования, которые рассматриваются в этом разделе, направлены, строго говоря, на изучение не подземных вод, а одного из важнейших свойств массива пород — его водопроницаемости, и в этом смысле их следовало бы рассматривать в разделе, посвященном исследованию свойств массива пород. Однако, придерживаясь сложившейся традиции, а также учитывая, что в некоторых случаях (например, при использовании индикаторов) разделение исследований на изучение водопроницаемости и изучение подземных вод оказывается довольно искусственным, мы рассмотрим оба этих вопроса совместно.

Основным показателем водопроницаемости пород как пористых, так и трещиноватых, служит, как известно, коэффициент фильтрации  $K_f$ , используемый в различных фильтрационных расчетах. Кроме того, для приближенных оценок и исследования поля фильтрации используется удельное водопоглощение  $q$ .

Коэффициент фильтрации водонасыщенных пород определяется с помощью опытных откачек, нагнетаний и наливов, коэффициент фильтрации пород зоны аэрации — с помощью двух последних методов. В последние годы разработаны также методы опробования неводонасыщенных пород нагнетанием воздуха в скважины.

При рассмотрении методов определения коэффициента фильтрации следует прежде всего отметить, что в трещиноватых скальных породах корректное определение этой величины сопряжено с определенными трудностями, имеющими принципиальный характер. Они связаны с физической сущностью этой

характеристики, введенной в линейное уравнение фильтрации Дарси в предположении параллельно-струйчатого движения жидкости в однородной пористой среде, где размер элементарной ячейки (поры) во много раз меньше области эксперимента. Скальный массив можно уподобить такой модели только в том случае, если участвующий в эксперименте объем породы на несколько порядков превышает размер отдельных структурных элементов — трещин и разделяющих их блоков. В этом случае можно отказаться от рассмотрения движения жидкости в отдельных трещинах и считать процесс фильтрации единым целым, характеризуя его осредненным показателем.

Опытные работы в скважинах малого диаметра такому требованию удовлетворяют лишь частично, поэтому получаемую в этом случае характеристику водопроницаемости можно рассматривать как коэффициент фильтрации только условно, а использование его в расчетах, основанных на законе фильтрации Дарси, может привести к значительным погрешностям. Осреднение результатов испытаний с помощью вероятностно-статистических методов может снять эту погрешность только частично. Чтобы преодолеть отмеченные трудности, А. Г. Лыкошин [1959] предложил применять для определения коэффициента фильтрации трещиноватых скальных пород откачки с большим радиусом влияния, вовлекающие в эксперимент значительную часть исследуемого массива пород. При проведении такой крупномасштабной откачки в качестве центральной выработки используется шахта диаметром 800—1300 мм или две-три скважины диаметром 250—300 мм, расположенные в непосредственной близости друг от друга. Наблюдательные скважины закладываются на нескольких лучах за пределами зоны турбулентного движения воды, образующейся вблизи центральной выработки. Для наблюдения используются также все ранее пройденные скважины. Откачка выполняется не менее чем с двумя понижениями продолжительностью 8—10 сут. При достаточно большой величине понижения таким образом можно получить надежные значения коэффициента фильтрации, которые можно распространить на значительную часть массива и использовать для определения притока воды в строительные котлованы, выемки и вертикальные дренажи. Для расчета линейных дренажей они менее пригодны, так как в этом случае имеет место плоское движение потока, для чего нужно знать векторное значение коэффициента фильтрации, отвечающее направлению движения воды к дренажу. Имеется также интересный опыт применения откачек с большим радиусом влияния для изучения зон кольматации и расколматации трещиноватых скальных пород в руслах рек [Лыкошин, 1959]. К сожалению, выполнение откачек с большим радиусом влияния сопряжено с техническими трудностями и значительными затратами, что ограничивает их практическое применение.

В тех случаях, когда крупномасштабные откачки по тем или иным причинам выполнить не удается, применяют откачки из скважин малого диаметра: одиночные (в том числе поинтервальные) и кустовые. Несмотря на отмеченный выше недостаток, откачки из скважин малого диаметра являются основным методом гидрогеологического опробования массивов трещиноватых скальных пород; они имеют массовое применение при строительстве всех крупных плотин, возведенных на скальных основаниях. Так, для обоснования проекта Братской ГЭС на разных стадиях изысканий было выполнено в общей сложности 370 кустовых и одиночных откачек, для обоснования проекта Усть-Илимской ГЭС, возведенной в сходных инженерно-геологических условиях, — 350, для Саратовской ГЭС — 160, и т. д.

Широко применяются также опытные нагнетания. По результатам опытных нагнетаний определяется удельное водопоглощение  $q$ , численно равное величине поглощения воды в литрах за 1 мин на 1 м длины опробуемого интервала скважины при напоре 1 м. Единицей удельного водопоглощения является л/мин/м, но на практике обычно применяется неполное обозначение — л/мин. Однако помимо отмеченного выше несоответствия области эксперимента размерам структурных элементов нагнетания обладают и некоторыми другими недостатками. К ним относится в первую очередь несовершенство методики определения коэффициента фильтрации по этим опытам, которая имеет обоснованную гидравлическую схему только для случая нагнетания воды в водонасыщенные породы, когда действующий напор определяется высотой столба воды над статическим уровнем в скважине. При нагнетании в неводонасыщенные породы величина напора становится неопределенной, что вносит неопределенность и в полученную таким образом характеристику. Принято считать, что в схемах движения воды при откачках и наливах различие заключается только в направлении движения воды (к скважине или от нее), что дает основание использовать в расчетах одни и те же формулы. Опыт показывает, однако, что результаты откачек и нагнетаний могут отличаться в несколько раз. Расхождения объясняются не только кольматажем или расширением трещин, но и различиями в гидравлической схеме опыта при подтоке воды в скважины и при ее радиальном растекании.

К недостаткам нагнетаний следует также отнести: а) возможную кольматацию трещин и пустот буровым шламом, что может заметно занизить величину фильтрационных характеристик (по некоторым данным, в несколько раз или даже на порядок); б) возможное расширение трещин давлением воды (особенно при большой величине напоров), что может существенно завысить величину фильтрационных характеристик и в) использование при нагнетаниях поверхностных вод, существенно отличающихся от подземных по температуре и вязкости, что также

может внести в результаты испытаний весьма существенные погрешности (особенно в жарком климате). При опытных работах влияние всех этих факторов может быть учтено только весьма приближенно.

Таким образом, результаты нагнетаний нельзя непосредственно использовать для определения значений коэффициентов фильтрации. Для того чтобы преодолеть эту трудность, предварительно исследуют зависимость между значениями коэффициентов фильтрации и удельного водопоглощения, полученными по опытам в одних и тех же скважинах, для чего используют методы регрессионного анализа. Поскольку распределение обеих величин ( $K_f$  и  $q$ ) хорошо описывается логнормальным законом, графики зависимости строятся на двойной логарифмической основе, как показано на рис. 6.11 на примере обработки данных, полученных при изучении водопроницаемости известняков Токтогульской и Чарвакской ГЭС и терригенных пород Нурекской и Курпайской ГЭС. Пользуясь такими графиками, можно в дальнейшем устанавливать приближенные значения коэффициентов фильтрации по величине удельных водопоглощений.

Главное достоинство нагнетаний заключается в относительной простоте выполнения опытов, что позволяет проводить их в больших количествах и использовать полученные результаты для детального изучения структуры поля фильтрации (в том числе и в зоне аэрации), выявления опасных зон и пр. Поэтому, несмотря на все отмеченные выше недостатки, метод нагнетаний остается до настоящего времени самым массовым видом определения водопроницаемости скальных пород. Так, для обоснования проекта Братской ГЭС было выполнено примерно 2250 позонных нагнетаний, что обеспечило опробование около 20 % суммарной длины буровых скважин в скальных породах, для Усть-Илимской ГЭС эти величины составили соответственно 1400 и 25 %, для ГЭС Наглу — 100 и 25 %, для Сарсангской плотины — 250 м и 30 %.

Однако для получения сопоставимых результатов необходима строгая стандартизация испытаний. С этой целью все испытания проводятся при одинаковых напорах и постоянной длине интервала опробования, который принят в 5 м. Отклонение допускается только в очень слабопроницаемых породах или, наоборот, в породах с очень высокой водопроницаемостью.

В последние годы в методику нагнетаний внесены некоторые изменения, и она дифференцирована по этапам исследований. На ранних этапах, когда необходимо получить общее представление о водопроницаемости пород в естественной обстановке, применяются нагнетания при одной ступени напора 10 м с продолжительностью опыта (при установившемся расходе) 20—30 мин. Если расход не устанавливается, время опыта увеличивается. При исследованиях на выбранном створе, когда

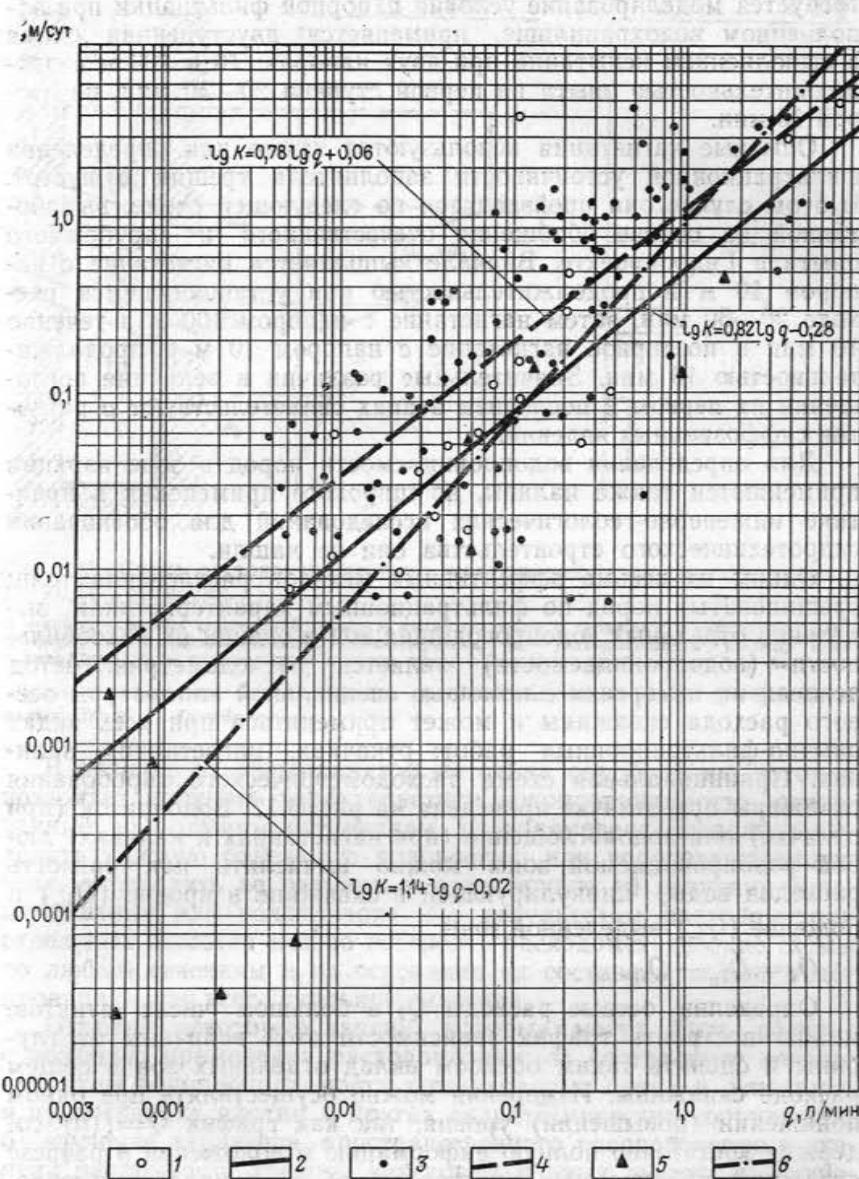


Рис. 6.11. Регрессионные зависимости между  $\lg K_f$  и  $\lg q$ .

1, 2 — для известняков Токтогульской ГЭС; 3, 4 — для Чарвакской ГЭС; 5, 6 — для терригенных пород Курпайской и Нурекской ГЭС

требуется моделирование условия напорной фильтрации при заполненном водохранилище, применяется двуступенчатая схема с выполнением испытаний при двух напорах: 10 и 100 м с продолжительностью опыта на первой ступени 20–30 мин, на второй 10 мин.

Опытные нагнетания используются также для определения фильтрационной устойчивости заполнителя трещин и пустот. В этом случае они производятся по следующей схеме, выработанной на основе обобщения отечественного и зарубежного опыта в Гидропроекте. Вначале выполняется нагнетание с напором 10 м и продолжительностью при установившемся расходе 20–30 мин, затем нагнетание с напором 100 м в течение 10 мин и повторное нагнетание с напором 10 м и продолжительностью 10 мин. Значительные различия в величине поглощения на первом и последнем этапах свидетельствуют о развитии суффозионных явлений.

Для определения водопроницаемости пород в зоне аэрации применяются также наливы, но широкого применения в практике инженерно-геологических исследований для обоснования гидротехнического строительства они не нашли.

Одним из весьма эффективных методов расчленения толщ трещиноватых пород по фильтрационным характеристикам, выделения отдельных водопроводящих зон и оценки их водообильности (водопроницаемости) является расходометрия. Метод основан на измерении с помощью специальной аппаратуры осевого расхода скважины и может применяться при всех видах опытно-фильтрационных работ: откачках, нагнетаниях, наливах. Принципиальная схема расходометрического опробования скважины при откачке приведена на рис. 6.12. Водоприток (при откачке) или водопоглощение (при нагнетаниях и наливах) любой водопроницаемой зоны можно вычислить как разность расходов воды, циркулирующей в скважине в кровле ( $Q_{ik}$ ) и подошве ( $Q_{in}$ ) выделенной зоны:

$$Q_i = Q_{ik} - Q_{in}.$$

Определив осевые расходы  $Q_i$  в большом числе пунктов, можно построить график зависимости этой величины от глубины и оценить таким образом вклад отдельных зон в общем расходе скважины. Измерения можно осуществлять при одном понижении (повышении) уровня, так как график  $Q=f(h)$  содержит достаточно полную информацию о положении в разрезе скважины проницаемых интервалов, об их мощности и водообильности (водопоглощении). Водообильность может быть охарактеризована такими параметрами, как удельный дебит, удельный водоприток (удельное водопоглощение) и коэффициент водопроводимости, численно равный расходу фильтрационного потока шириной 1 м и мощностью, равной мощности водопроницаемой зоны, при единичном гидравлическом градиенте.

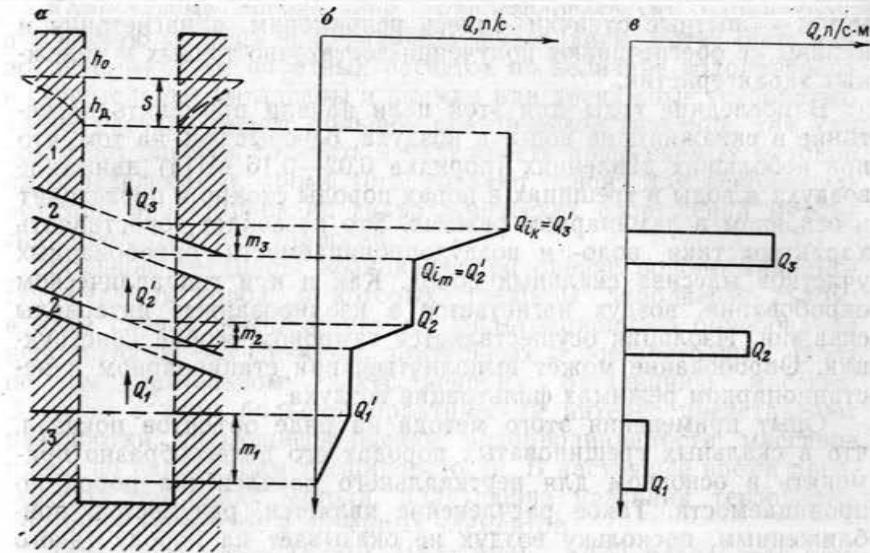


Рис. 6.12. Схема расходометрического исследования скважины при откачке. По И. И. Гринбауму.

*а* — схема строения водоносной толщи и движения воды к скважине; *б* — расходограмма  $Q=f(h)$ ; *в* — дифференциальная расходограмма.  $h_0$  — установившийся уровень воды в скважине;  $h_d$  — динамический уровень воды в скважине при откачке;  $m_1, m_2, m_3$  — мощности водоносных зон;  $Q_i$  — расход отдельной водоносной зоны;  $Q$  — суммарный расход. По И. И. Гринбауму

В отличие от общепринятой методики опробования, которая позволяет получить характеристики водопроницаемости, осредненные по большим интервалам, расходометрия позволяет выделить каждую отдельную водоносную или водопоглощающую зону, определить ее размеры и отвечающую ей величину водопоглощения или водопритока. По результатам расходометрии отдельных скважин можно построить расходометрические схемы по любым сечениям и на основании их составить модель водопроницаемости всего скального массива.

Отметим некоторые задачи, которые могут быть решены с помощью применения расходометрии: а) составление детальных схем водопроницаемости трещиноватых пород в основании и примыканиях плотин и других гидротехнических сооружений; б) изучение характера, пространственного распределения и степени раскрытия трещин, карстовых и иных пустот; в) изучение строения зон тектонических нарушений.

В глубоких горных долинах значительная часть массива пород до начала строительства находится в зоне аэрации, а после возведения плотины и заполнения водохранилища оказывается в зоне насыщения. Оценка водопроницаемости этой части массива особенно сложна, так как наиболее надежный

метод — опытные откачки — здесь неприменим, а нагнетания и наливы не обеспечивают получения достаточно точных и надежных характеристик.

В последние годы для этой цели начали применять нагнетание в скважины не воды, а воздуха, основываясь на том, что при небольших давлениях (порядка 0,02—0,16 МПа) движение воздуха и воды в трещинах и порах породы сходно и происходит в основном в ламинарном режиме. Это позволяет сопоставлять характеристики водо- и воздухопроницаемости опробованных участков массива скальных пород. Как и при гидравлическом опробовании, воздух нагнетается в изолированные интервалы скважин. Изоляция осуществляется тампоном особой конструкции. Опробование может выполняться при стационарном и нестационарном режимах фильтрации воздуха.

Опыт применения этого метода на ряде объектов показал, что в скальных трещиноватых породах его целесообразно применять в основном для вертикального расчленения пород по проницаемости. Такое расчленение является, разумеется, приближенным, поскольку воздух не оказывает на породу такого же воздействия, как нагнетаемая вода (в частности, не происходит промывки трещин от шлама). Тем не менее благодаря сравнительно простому и портативному оборудованию с помощью этого метода можно быстро и с достаточной точностью расчленять массивы горных пород на зоны с различной воздухопроницаемостью, которую можно рассматривать и как водопроницаемость. Существенное значение имеет и то обстоятельство, что для опытов не требуется вода, подвод которой к опробуемым скважинам в условиях горного, сильно рассеченного рельефа часто сопряжен с большими трудностями. Водопроницаемость массивов трещиноватых скальных пород может быть оценена также на основании изучения закономерностей распространения подпора грунтовых вод в толще пород в период паводков на водотоках. Особенно большая информация может быть получена этим методом на поздних этапах проектно-изыскательских работ (технический проект, рабочие чертежи), когда имеется большое число скважин, расположенных по всей площади массива на различных расстояниях от русла реки. По наблюдениям за изменениями уровней воды в скважинах вычисляется коэффициент уровнепроводности, который связан в свою очередь с коэффициентом фильтрации.

Важное достоинство метода заключается в том, что он позволяет получить гидрогеологические параметры для больших объемов породы и в этом отношении обладает определенным преимуществом перед откачками из скважин малого диаметра. По результатам наблюдений за распространением подпора можно исследовать также неоднородность поля водопроницаемости, выделить зоны повышенной трещиноватости, водопроводящие тектонические нарушения и пр.

Контрольные определения гидрогеологических параметров, и в первую очередь коэффициента фильтрации, могут быть выполнены методом обратных расчетов по величине водопритоков в строительные котлованы и выемки или дренажные устройства. Такие расчеты имеют большое практическое значение, так как помогают оценить точность и надежность применяемых методов их определения и, кроме того, создают основу для использования при проектировании гидротехнических сооружений метода гидрогеологических аналогий.

Большие трудности возникают при оценке водопроницаемости мерзлых пород, в которых трещины заполнены льдом; в этом случае обычные методы фильтрационного опробования неприменимы без сложных, длительных и дорогостоящих работ по предварительному искусственному оттаиванию массива. В связи с этим большой практический интерес представляют разработки, касающиеся оценки водопроницаемости массивов пород по параметрам трещиноватости. В настоящее время предложены три таких метода, получившие названия тензорного, конечных элементов и линейных элементов.

Тензорный метод [Ромм, 1966; Show, 1965] разработан применительно к модели непрерывных систем трещин, причем предполагается, что все параметры трещин по каждой из систем постоянны по всему изучаемому объему. Эти предпосылки довольно далеки от реальной структуры скальных массивов. Кроме того, большие трудности встречаются при установлении надежных параметров трещиноватости. Результаты измерения трещин в естественных обнажениях, где на них воздействуют процессы разуплотнения и выветривания, не могут быть распространены на весь массив пород; измерения в штольнях, шахтах и других горных выработках, где они более надежны, дают недостаточно представительные выборки, так как они относятся только к средней и верхней частям бортовых примыканий. Дно же речной долины, где возможности проходки горных выработок очень ограничены, остается в этом отношении практически не изученным. Ошибки в определении параметров трещин, в особенности их ширины, которая входит в расчетные формулы в третьей степени, может привести к очень большим погрешностям. Так, согласно Г. М. Ломизе [1951], увеличение ширины трещин с 0,005 до 1 см меняет величину коэффициента проницаемости в 40 000 раз. Необходимо учесть, что наличие в массиве хотя бы одного открытого разлома или, наоборот, разлома, заполненного глинистым милюнитом или глинкой трения и играющего роль барраж, не выявленного в процессе изысканий, может коренным образом изменить всю фильтрационную структуру массива пород. Опыт изысканий показывает, что избежать таких пропусков практически невозможно. Так, например, на Красноярской ГЭС, где был выполнен по современным масштабам очень большой объем горно-буровых работ, только

в основании плотины было выявлено 14 разломов и крупных тектонических трещин, не вскрытых в процессе изысканий.

Методы конечных элементов [Wittke, 1970] и линейных элементов [Louis, 1967; Wittke, Louis, 1968] основаны на более адекватных предпосылках, но требуют, во-первых, получения достаточно полной картины строения сети трещин и, во-вторых, определения параметров каждой трещины в отдельности, что, очевидно, возможно только для небольших по объему блоков породы, непосредственно примыкающих к горным выработкам. Проблема обобщения результатов расчетов на весь скальный массив остается и в этом случае нерешенной. Следовательно, самостоятельное применение этих методов не имеет особых перспектив, но в комплексе с геофизическими методами и массовым гидравлическим опробованием они могут дать полезные результаты.

#### 6.3.2.3. Индикаторные методы изучения подземных вод в массивах скальных пород

Большие возможности для изучения закономерностей и получения количественных оценок движения подземных вод в массивах трещиноватых скальных пород дает применение индикаторов. В качестве таковых используются различные красители, электролиты, а также радиоактивные индикаторы. Последние делятся на естественные и искусственные. Из естественных индикаторов наибольшее значение имеет тритий ( $^{3}\text{H}$ , Т), который входит в состав молекулы воды и поэтому наименее подвержен воздействию каких-либо посторонних факторов. К искусственным индикаторам относятся соединения, содержащие  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{51}\text{Cr}$  и некоторые другие радиоактивные изотопы.

По сравнению с красителями и электролитами радиоактивные индикаторы обладают рядом существенных преимуществ. Используемые при опытах исчезающие малые концентрации радиоактивных индикаторов (до  $10^{-12} \%$ ) неказываются сколько-нибудь заметно на свойствах исследуемых подземных вод и, кроме того, меньше сорбируются породами и заполнителем трещин, чем красители или электролиты.

Радиоактивные индикаторы могут быть подразделены в свою очередь на  $\gamma$ -излучающие ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{198}\text{Au}$  и др.) и  $\beta$ -излучающие ( $^{3}\text{H}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{45}\text{Ca}$  и др.). Первые обладают более высокой энергией излучения, что позволяет вести измерения непосредственно в скважинах с помощью специальных зондов, но создают определенные трудности при обеспечении радиоактивной защиты; вторые требуют применения специально оборудованных полевых лабораторий, но более простых мер радиационной защиты, что особенно важно в экспедиционных условиях. Поэтому в современной практике используются обе группы индикаторов.

С помощью радиоактивных индикаторов можно решить ряд задач, имеющих большое практическое значение, в том числе: а) установить направление и истинную скорость движения подземных вод; б) определить связь между поверхностными водотоками, разделенными водоразделом, сложенным водопроницаемыми породами; в) изучить связь между поверхностными и подземными водами и между отдельными водоносными горизонтами; г) исследовать карст в массивах карбонатных пород и д) установить генезис и возраст подземных вод.

Установление направления и скорости движения подземных вод позволяет детально исследовать структуру поля фильтрации как в его естественном состоянии, так и после осуществления различных противофильтрационных и дренажных мероприятий.

Исследование естественного поля дает возможность выявить пути сосредоточенной фильтрации (зоны повышенной трещиноватости, водопроводящие тектонические нарушения, карстовые полости), требующие местного усиления противофильтрационных завес или применения индивидуальных защитных мероприятий (заделки трещин и др.). Получаемый материал представляет интерес также для анализа структуры скального массива с целью изучения ее влияния на работу плотины или других строящихся сооружений.

Исследование нарушенного поля фильтрации дает возможность контролировать надежность противофильтрационных завес и эффективность работы дренажных устройств и в случае необходимости своевременно проводить дополнительные защитные мероприятия.

Определение истинной скорости движения подземных вод позволяет также более полно исследовать явления суффозии и подземной эрозии, установить величину размывающих скоростей, а в дальнейшем на основании анализа структуры поля фильтрации выявить участки, опасные в отношении развития этих явлений, и своевременно осуществить защитные мероприятия.

Довольно часто возникает важная задача установления гидравлической связи между двумя водотоками, на одном из которых намечается создать водохранилище. В современной практике для ее решения обычно проводится разбуривание междуручного пространства по одному или нескольким поперечникам с фиксацией положения уровня подземных вод в скважинах и выявлением положения «подземного водораздела», что требует больших затрат времени и средств. Применение радиоактивных индикаторов позволяет решить этот вопрос значительно проще и вполне однозначно. Для этого индикатор загружается в реку-источник, а появление его на наблюдательных станциях, расположенных на второй реке-приемнике, вполне надежно указывает на наличие гидравлической связи между реками.

В качестве примера можно привести исследования, выполненные в районе Быстровской ГЭС (Киргизская ССР) с целью установления перетекания воды из р. Чу в р. Красную [Чураев, Ильин, 1973]. В качестве индикатора был применен  $^{131}\text{I}$ . Исследования показали, что связь между реками осуществляется через толщу галечников, принимающих участие в строении водоиздела, и по рассекающему его разлому. Были установлены также очень большие скорости движения воды (до 500 м/сут), указывающие на то, что перетекание происходит в весьма значительных масштабах.

Необходимость изучения генезиса и возраста подземных вод возникает при решении многих задач, например при изучении источников, выходящих на дневную поверхность, когда необходимо установить, связаны они с поверхностными водами и атмосферным питанием или с разгрузкой глубинных вод по тектоническим разломам. В принципе эта задача может быть решена и другими способами, но использование радиоактивных индикаторов наиболее просто и надежно. В качестве критерия используется концентрация природного трития, который может попасть в подземные воды только с атмосферными осадками. Поскольку период полураспада трития равен 12,26 года, содержание его в воде быстро уменьшается, и в водах, циркулирующих длительное время в толще земной коры, приближается к нулю. Поэтому высокая концентрация трития указывает на связь источника с водами, образовавшимися в недавнем прошлом за счет атмосферных осадков, а низкая его концентрация — с водами глубинного происхождения. Эта особенность трития может использоваться также для установления положения области питания подземных вод, выявления зон интенсивного и замедленного водообмена в толще пород и пр.

Индикаторные методы можно использовать также для изучения карста, при этом они позволяют не только установить положение заполненных водой карстовых полостей, но и оценить в первом приближении их размеры.

#### 6.3.2.4. Режимные наблюдения

Наблюдения за основными компонентами режима подземных вод (уровнями, расходами, температурой, химическим составом) выполняются при инженерно-геологических исследованиях под строительство гидротехнических сооружений на всех стадиях проектно-изыскательских работ, а также в период строительства и эксплуатации сооружений. Наблюдения дают ценную информацию об условиях питания подземных вод, их циркуляции и разгрузке, о связи с поверхностными водотоками, структуре поля фильтрации, а также позволяют определить значения коэффициента фильтрации для больших объемов породы.

Режимные наблюдения делятся на кратковременные и длительные. Кратковременные наблюдения выполняются в процессе инженерно-геологических и гидрогеологических съемок, а также после проходки разведочных скважин с целью получения характеристик вскрытых водоносных горизонтов: статических уровней, химического состава и пр. Длительные наблюдения осуществляются по специально оборудованной для этой цели наблюдательной сети.

Структура режимной сети, периодичность и характер наблюдений зависят от этапа и стадии проектно-изыскательских работ. При исследованиях, выполняемых для обоснования схемы комплексного использования реки, режимные наблюдения проводятся в отдельных характерных точках. При изысканиях для составления ТЭО задаются поперечники из скважин по оси плотин на конкурирующих вариантах, а также на других ответственных участках (например, через водораздел, отделяющий долину реки, на которой создается водохранилище, от соседнего эрозионного вреза). Так, при выборе места для строительства Каховской ГЭС в низовьях Днепра возник вопрос о возможности фильтрации воды через водораздел Днепр — Черное море, сложенный кавернозными известняками. Несмотря на большую ширину водораздела (около 40 км), возникла опасность значительных потерь на фильтрацию вследствие значительной водопроницаемости известняков и низкого положения уровня грунтовых вод. Для решения этого вопроса была создана наблюдательная сеть, состоящая из нескольких десятков скважин. Наблюдения велись также по многочисленным колодцам.

Полученные данные позволили осуществить моделирование этого процесса методом ЭГДА. Полученный суммарный расход на фильтрацию через водораздел ( $7,4 \text{ м}^3/\text{с}$ ) оказался намного меньше допустимого, что позволило создать в долине Днепра большое водохранилище.

На стадии технического проекта режимная сеть должна охватывать весь район размещения гидроузла и достаточно детально освещать участки примыканий и основания плотины, места расположения глубоких котлованов и др. Схема стационарной режимной сети намечается в зависимости от расположения и характера проектируемых сооружений, особенностей геологического строения и гидрогеологических условий территории. Она включает скважины, колодцы, источники и водомерные посты, устанавливаемые на реках и водоемах.

В период строительства режимная сеть дополняется скважинами, в которых ведутся наблюдения за развитием депрессионных воронок, образующихся в результате откачки воды из водопонижающих установок, выемок и котлованов. После окончания строительства оборудуется сеть наблюдательных

скважин, которые должны фиксировать изменения гидрогеологических условий в основании и примыканиях плотины, по берегам каналов, водохранилищ и пр.

#### 6.3.2.5. Гидрохимические исследования

Изучение химического состава подземных вод имеет следующие основные задачи: а) выявление связи между отдельными горизонтами подземных вод; б) установление очагов разгрузки глубинных подземных вод; в) оценка агрессивности подземных вод по отношению к металлу и бетону; г) изучение процессов выщелачивания водорастворимых пород, залегающих в основании сооружений. Материалы гидрохимических исследований позволяют также судить об условиях питания водоносных горизонтов, фильтрационных свойствах пород, характере разрывных нарушений и пр.

Гидрохимические исследования проводятся путем массового опробования поверхностных водотоков и водоемов, различных водопоявлений (источники, мочажины и др.) и отбора проб из буровых скважин и горных выработок. Результаты исследований оформляются в виде гидрохимических карт и разрезов, дополняемых различными таблицами, графиками, текстовыми материалами.

Интересным примером проведения гидрохимических исследований с целью изучения процесса выщелачивания гипса из под основания гравитационной плотины и здания ГЭС могут служить работы, выполненные при изысканиях, строительстве и эксплуатации сооружений Камского гидроузла. Описание инженерно-геологических условий гидроузла приведено в разделе 4.2.1.2, поэтому здесь напомним только, что сооружения были выстроены на толще песчано-глинистых и карбонатных пород, подстилаемых на глубине 55–60 м мощной толщей гипсов и ангидритов, что создавало опасность их выщелачивания и деформаций сооружений. Для предотвращения этого явления был осуществлен комплекс противофильтрационных мероприятий (понур, цементационная завеса, дренажные устройства). Гидрохимические исследования, проводимые на участке гидроузла с начала его сооружения по настоящее время, показали, что под плотиной медленно развивается процесс рассоления подземных вод, локализующийся в основном в пределах понура и не представляющий опасности для нормальной эксплуатации сооружения. Бурение контрольных скважин подтвердило, что в основании сооружений гипс практически не выщелачивается.

#### 6.3.2.6. Изучение супфазионных явлений в трещинах скальных пород

Изучение фильтрационной устойчивости заполнителя в трещинах скальных пород мы отнесли к разделу гидро-геологических исследований, так как основным вопросом яв-

ляется определение критических скоростей движения грунтовых вод или градиентов, при которых начинается вымывание заполнителя разного состава. Работы в этом направлении были начаты в СССР в начале 50-х годов на Каховской ГЭС, где в бортах долины были встречены известняки с кавернами, заполненными глинистыми продуктами выветривания [Молоков, 1959а]. Исследования выполнялись по следующей схеме. В забое шахты проходились две камеры, разделенные целиком известняков шириной 1 м. Нижняя камера служила для приема воды, которая фильтровалась через целик из верхней камеры. Исследования продолжались 7–10 сут при градиентах до 2. Наблюдения показали, что при принятой величине напора заполнитель не вымывается. Близкие по схеме исследования (шурф—шельня, скважина — шельня, скважина — скважина и др.) были выполнены на Плявинской, Иркутской, Чиркейской, Чарвакской и некоторых других ГЭС.

На Иркутской ГЭС проводились опыты по исследованию супфазионной устойчивости рыхлого песчано-глинистого заполнителя в трещинах юрских песчаников и алевролитов, используемых как основание бетонных сооружений [Емельянов, 1962]. Методика работ заключалась в нагнетании воды в одну скважину с одновременной откачкой ее из другой скважины, расположенной на некотором расстоянии от первой. При этом создавалась усиленная циркуляция воды по трещинам при фильтрационных градиентах, достигавших 16–17. Исследования показали, что вынос заполнителя начинается только при очень больших значениях градиентов (порядка 14–17), которые в основании сооружений не наблюдаются.

Значительная фильтрационная устойчивость заполнителя трещин подтверждена лабораторными исследованиями, поставленными В. Н. Жиленковым [1970], который разработал для этой цели специальную аппаратуру и методику. Для определения «поперечной внутренней супфазии» (рис. 6.13) образец заполнителя загружался в специальный прибор и через него пропускался нисходящий поток воды с постоянно нарастающим напором. Образец был представлен песчано-щебенисто-глинистым материалом, характеризующимся коэффициентом фильтрации от 0,4 до 2,3 м/сут. Выполненные опыты позволили установить, что заполнитель остается супфазионноустойчивым при градиентах напора, достигавших 15. В. Н. Жиленков считает, что эту величину градиента можно принять в качестве критической для данного типа заполнителя. Были смоделированы также условия «контактной супфазии». В качестве образца использовалась плотная глина трения, образовавшаяся в результате перетирания алевролитов. Наблюдения показали, что при ширине оперяющей трещины от 0,5 до 1 мм размывания заполнителя не наблюдалось при градиентах напора более 10 и скорости потока до 0,8 м/с. Размывание наступило при

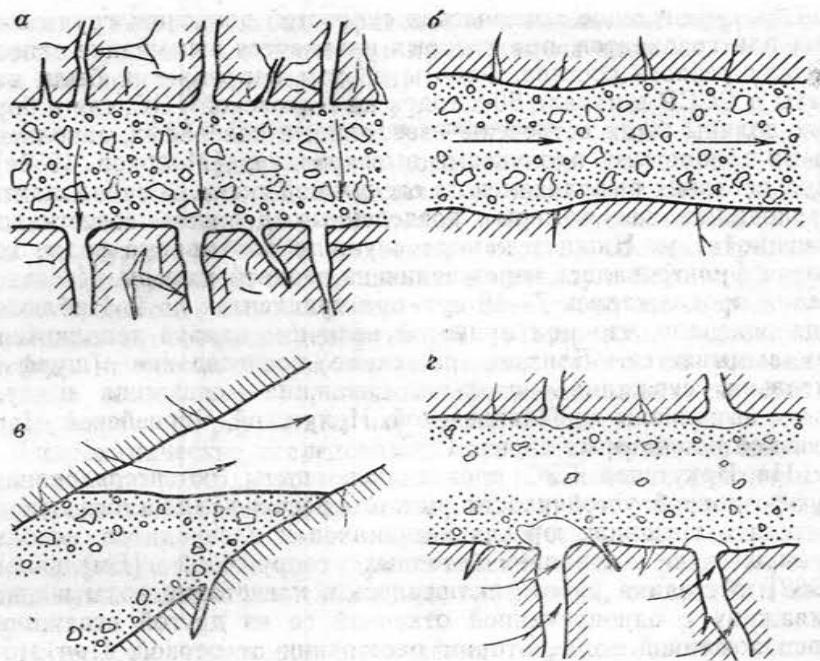


Рис. 6.13. Основные виды супфозии:

а — внутренняя поперечная, б — внутренняя продольная, в — поверхностная (подземная эрозия) и г — контактная

раскрытии трещины до 2 мм (при скорости потока более 0,2 м/с) и продолжалось до тех пор, пока ширина трещины не увеличилась до 3 мм. Затем оно прекратилось, по-видимому, в связи с образованием в устье трещины естественного обратного фильтра.

О значительной устойчивости глинистого заполнителя в трещинах скальных пород свидетельствуют также опыты Н. И. Кирченко [1970], показавшие, что вымывание и выдавливание мелкозема из трещин происходит под давлением  $(6-13) \cdot 10^5$  Па.

В настоящее время разработаны критерии и методы исследования для определения фильтрационной устойчивости заполнителя в трещинах, имеющего чисто песчаный состав [Праведный, 1970]. Для заполнителя, содержащего значительное количество глинистого материала (от супесей до глин), такие определения выполнить труднее, так как в этом случае большое значение имеют степень связности заполнителя, его плотность, содержание в нем грубого песчано-щебенистого материала и пр. Поэтому ведущая роль при исследовании таких заполнителей должна отводиться эксперименту, выполняемому в лабораторной или по возможности в полевой обстановке.

### 6.3.2.7. Построение фильтрационных моделей массивов скальных пород

Основной принцип схематизации фильтрационной неоднородности массивов скальных пород заключается в разделении их на такие структурные элементы (блоки пород), которые характеризуются квазиоднородностью по фильтрационным характеристикам. При спокойной тектонике, горизонтальном или моноклинальном залегании толщ осадочных пород, характерном, например, для платформенных регионов, основными структурными элементами массивов горных пород являются слои, линзы или геологические тела иной формы, различающиеся по составу, структурно-текстурным особенностям и характеру трещиноватости. Соответственно они обладают различными фильтрационными характеристиками, оставаясь одновременно внутренне однородными по этому признаку. В некоторых случаях строение таких массивов осложняется наличием магматических тел (например, покровов или силлов траппов на Сибирской платформе) или отдельных тектонических нарушений, но и в этом случае сохраняется принятый принцип расчленения.

В горных районах со сложной складчато-блочной или блоковой тектоникой, сложенных прочными скальными породами осадочного, метаморфического или магматического генезиса, влияние состава пород на их водопроницаемость оказывается слабо, и основными структурными элементами здесь являются структурно-тектонические блоки и разделяющие их тектонические нарушения. На них накладываются в свою очередь зоны разуплотнения пород и коры выветривания, часто неоднородные по фильтрационным характеристикам и требующие дополнительного более дробного расчленения.

Структурно-тектонические блоки характеризуются обычно сравнительно низкой водопроницаемостью, обусловленной наличием трещин первичной отдельности и сравнительно редкой сетью тектонических трещин. Тектонические нарушения в этом отношении более разнообразны и могут быть подразделены по степени водопроницаемости на три типа: а) со сместителем в виде открытой, зияющей трещины и сильно раздробленной периферийной зоной. Такие тектонические нарушения характеризуются высокой водопроницаемостью как в продольном, так и в поперечном направлениях; б) со сместителем в виде одной или серии трещин, заполненных милонитом или катаклазитом, часто сильно выветрелым и превращенным в плотную глинистую массу. Периферийная часть разломов обычно сильно раздроблена. Такие тектонические нарушения характеризуются значительной водопроницаемостью в продольном направлении, но весьма низкой в поперечном; в) со сместителем в виде одной или нескольких трещин, заполненных различными минеральными выделениями (кварцем, кальцитом, гидроокисями железа

и др.). Периферийная трещиноватая зона также в основном залечена минеральными новообразованиями. Такие тектонические нарушения характеризуются пониженной водопроницаемостью как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Охарактеризованные типы разломов связаны между собой промежуточными формами. Кроме того, они существенно различаются по протяженности, ширине, степени дробления пород и другим характеристикам. Нередко в пределах одного массива могут быть встречены тектонические нарушения, относящиеся к разным выделенным выше типам.

Существенное влияние на водопроницаемость пород оказывает их разуплотнение, которое распространяется на глубину от нескольких десятков до нескольких сотен метров и проявляется как в раскрытии существующих, так и в образовании новых трещин. Среди последних особенно большую роль играют трещины донного и бортового отпора. Степень разуплотнения пород и раскрытия трещин обычно закономерно изменяется с глубиной, и выделение этой зоны как единой или подразделение ее дополнительно на подзоны зависит от масштабов наблюдаемых изменений и соображений практического характера.

В верхней части разреза водопроницаемость пород зависит также от степени их выветрелости. Выетривание проявляется, с одной стороны, в расширении существующих и возникновении новых трещин (трещины выетривания), а с другой — в образовании вторичных, преимущественно глинистых продуктов выетривания, заполняющих трещины. В связи с этим профиль коры выетривания по степени водопроницаемости может быть различным: 1) с монотонным убыванием водопроницаемости пород по глубине; 2) с наличием зон, существенно различающихся по водопроницаемости — верхней, с трещинами, заполненными глинистыми продуктами выетривания, и пониженней водопроницаемостью (зона сапролитов) и нижней, с открытыми трещинами и повышенной водопроницаемостью (зона рухляка и разборной скалы). Мощность и строение коры выетривания зависят в большой степени от истории формирования долины и возраста отдельных ее частей. Если долина формировалась в несколько этапов, разделенных периодами относительного тектонического покоя, мощность коры выетривания в нижней (наиболее молодой) части эрозионного вреза может быть в несколько раз меньше, чем в верхней.

При построении фильтрационной модели массива пород необходимо выделить все перечисленные выше элементы его структуры; пересечение их даст те элементарные блоки, которые можно рассматривать как квазиоднородные части фильтрационной модели. Для проверки используются данные, полученные при опытном определении водопроницаемости с помощью откачек, нагнетания воды или воздуха. Сопоставимость результа-

тов, полученных разными методами, обеспечивается применением методов регрессионного анализа, позволяющих вычислить необходимые поправочные коэффициенты. За наиболее достоверные принимаются данные, полученные с помощью опытных откачек. При анализе однородности могут использоваться статистические методы, но следует учитывать, что любые статистические критерии подтверждают не однородность исследуемого объекта по выбранному признаку, а только непротиворечивость имеющегося фактического материала этой гипотезе. Нередко вывод об однородности объясняется только недостатком фактического материала. Поэтому формальные статистические приемы всегда следует дополнять содержательным анализом, основанным на учете практических требований.

Рассмотрим один из опытов построения такой фильтрационной модели для массива пород на участке проектируемой Папанской плотины на р. Акбура в Киргизии [Каякин, Каякина, 1978].

Папанская плотина высотой 100 м возводится в узком ущелье, имеющем ширину от 12—20 м в нижней части до 90—110 м по гребню плотины. Борта ущелья сложены прочными известняками, моноклинально падающими по течению реки. Тектонические разрывы, разбивающие массив на отдельные блоки, сопровождаются зонами повышенной трещиноватости мощностью 5—10 м. В известняках широко развиты тектонические и экзогенные трещины. Среди последних особое значение имеют трещины разгрузки (бортового отпора). В бортах и дне ущелья выделяется зона разгрузки и выетривания пород, изменяющаяся по мощности от 10—15 м в дне долины (наиболее молодая ее часть) до 25—60 м на уровне гребня плотины (часть долины, сформировавшаяся в среднечетвертичное время). Несмотря на карбонатный состав пород, карстовые процессы выражены слабо и проявляются только в некотором расширении тектонических и экзогенных трещин. Опробование показало, что водопроницаемость пород в структурно-тектонических блоках намного ниже, чем в зонах тектонических нарушений. В пределах тех и других элементов она закономерно уменьшается от поверхности земли до некоторой глубины, ниже которой остается практически постоянной. Зона закономерного уменьшения водопроницаемости отвечает области разуплотнения пород, зона постоянной проницаемости — неизмененным породам. Зона закономерного изменения водопроницаемости была дополнительно разделена на две подзоны: с повышенной и со средней водопроницаемостью.

Пересечения этих зон с тектоническими блоками и разделяющими их разломами образовали квазиоднородные блоки — элементы фильтрационной модели. После статистической проверки различий в средних значениях показателей водопроницаемости некоторые из них были объединены. При проверке

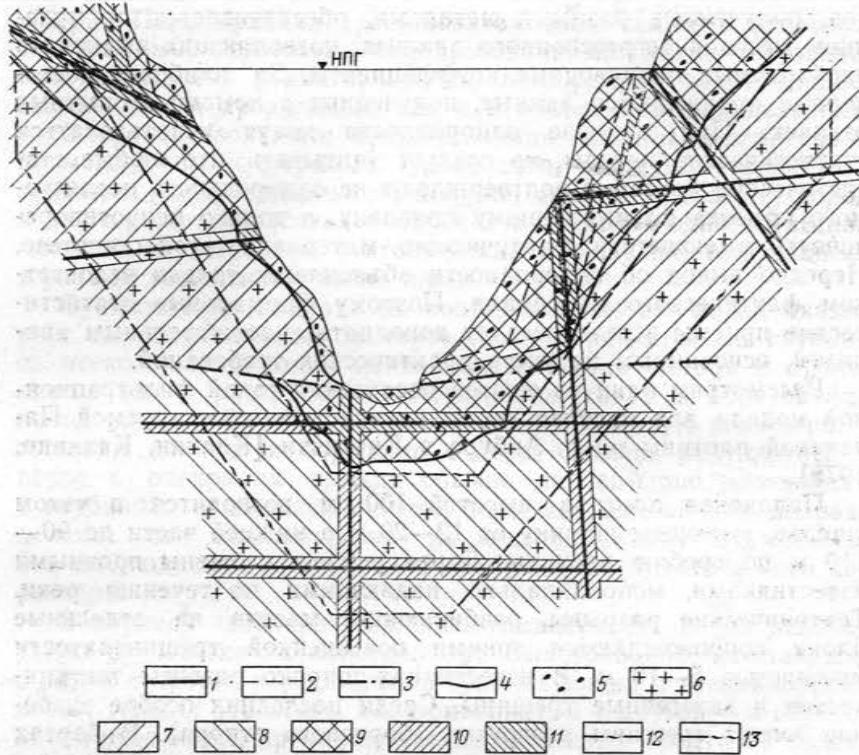


Рис. 6.14. Фильтрационная модель массива горных пород на участке строительства Папанской ГЭС. По В. В. и А. И. Каякиным.

1 — разрывные тектонические нарушения; 2 — крупные трещины разгрузки, которые могут служить путями сосредоточенной фильтрации; 3 — уровень подземных вод; 4 — границы квазиоднородных участков (во водопроницаемости); 5 — зона закономерно уменьшающейся водопроницаемости; 6 — зоны квазистабильной водопроницаемости. Блоки с гарантированными значениями  $q$  (в л/мин — числитель) и  $K_F$  (в м/сут — знаменатель) при доверительной вероятности 0,95: 7 —  $\frac{0,02}{0,003}$ ; 8 —  $\frac{0,01}{0,01}$ ; 9 —  $\frac{0,04}{0,04}$ ; 10 —  $\frac{0,15}{0,10}$ ; 11 —  $\frac{0,3}{0,2}$ ; 12 — запроектированный контур противофильтрационной завесы; 13 — рекомендуемый контур противофильтрационной завесы

использовались значения коэффициентов фильтрации, полученные как прямыми опытами, так и путем расчета по удельным водопоглощениям с помощью регрессионного уравнения, выведенного для аналогичных условий на участке Токтогульской ГЭС. Для каждого из выделенных блоков были вычислены средние максимальные значения коэффициентов фильтрации, которые использовались в дальнейшем в различных расчетах. Составленная графическая фильтрационная модель приведена на рис. 6.14.

На основании этой схемы были выполнены расчеты фильтрации в основании в обход плотины и рекомендован контур противофильтрационной завесы, который по предварительным

проработкам был развит на излишнюю глубину. При дальнейшем построении моделей такого типа следует уточнять значения коэффициента фильтрации по данным режимных наблюдений за уровнем грунтовых вод в период паводков, а также путем его корректировки по данным исследования трещиноватости. Необходимо при этом учитывать, что при расчетах на фильтрацию необходимо располагать векторным значением коэффициента фильтрации, отвечающим направлению движения потока грунтовых вод.

#### 6.3.2.8. Применение методов лабораторного гидрогеологического моделирования

Сложные природные условия строительства плотин на скальных основаниях, особенно в пределах горно-складчатых сооружений (каньонообразная форма речных долин, фильтрационная неоднородность массива горных пород, наличие разломов разного типа и пр.), а также влияние комплекса инженерных мероприятий (несовершенной цементационной завесы, многоярусного дренажа и пр.) обуславливают сложную пространственную конфигурацию фильтрационного потока и не менее сложную его внутреннюю структуру. Даже при введении тех или иных упрощенных предпосылок аналитические расчеты оказываются в этих условиях очень сложными и малонадежными. В таких случаях широко используется метод ЭГДА, позволяющий при условии достаточно удачной схематизации гидрогеологических параметров отдельных структурных элементов получить результаты с точностью, отвечающей требованиям практики. В связи с большой сложностью пространственного моделирования для всех предварительных расчетов, связанных с определением параметров завесы или дренажных устройств, применяются в основном плоские модели.

Л. Н. Павловская и др. [«Расчет...», 1970] и В. Ф. Кондратьев [1970] на основе обобщения опыта исследований для Нурекской, Чиркейской и Ингурской плотин рекомендуют придерживаться следующего порядка моделирования фильтрационных потоков методом ЭГДА.

На первом этапе исследования проводятся на плановых моделях из электропроводной бумаги с использованием широко известного метода фильтрационных сопротивлений. Многослойная водосодержащая толща грунта на плановой модели приводится к квазиоднородной с усредненным значением коэффициента фильтрации. Характеристика фильтрационного потока определяется методом последовательных приближений с корректурой модели по проводимости и учетом по методу фильтрационных сопротивлений несовершенства завесы и дренажей. Сначала оценивается влияние только цементационной завесы, затем накладывается действие дренажных систем. Результаты исследований выдаются в виде карты гидроизогипс и исполь-

зуются для расчета общей величины фильтрационного расхода и его распределения между отдельными элементами стока, статических расчетов и пр.

На втором этапе на карту гидроизогипс наносятся характерные ленты тока и для них изготавливаются плоские вертикальные модели. Такие модели позволяют учесть сжатие потока в плане, неоднородность водопроницаемой толщи, наличие несовершенных завес и дренажей, изменение напора по глубине и участки высачивания. По плоским моделям определяют положение кривой депрессии, величины фильтрационного расхода, градиенты напора на цементационной завесе и при выходе в дренажи, что необходимо для оценки фильтрационной устойчивости заливника в трещинах.

На третьем этапе исследований для выбранного варианта делаются уточнения на пространственной модели.

Расчеты методом ЭГДА были выполнены при фильтрационных расчетах всех крупных ГЭС, построенных в СССР в последнее десятилетие: Чиркейской, Нурекской, Ингурской и др.

### 6.3.3. Изучение физических полей в массивах горных пород

Как мы отметили в гл. 2, физическое состояние массивов горных пород определяется физическими полями, которые формируются в них под воздействием различных геологических процессов и взаимодействия с окружающей средой. В практическом отношении наибольшее значение имеют два физических поля: тепловое и напряжений; но поскольку первое из них изучается главным образом при строительстве сооружений в зоне многолетнемерзлых пород, мы отнесли рассмотрение этого вопроса в раздел 6.3.5.3, где он может быть связан с другими аспектами изучения мерзлых оснований, здесь же остановимся на изучении поля напряжений.

До сравнительно недавнего прошлого вопросу изучения напряженного состояния массивов пород при гидротехническом строительстве большого внимания не уделялось, но в последние годы положение существенно изменилось, с одной стороны, в связи с увеличением глубины заложения тоннелей и подземных машинных залов, с другой — в связи с разработкой и внедрением в практику метода конечных элементов, позволяющего учитывать естественные напряжения в различных геотехнических расчетах. В настоящее время подобного рода исследования проводятся на всех крупных объектах, находящихся в стадии изысканий.

В Советском Союзе для измерения напряженного состояния скальных массивов применяются две группы методов: статические (тензометрические), основанные на измерении деформаций горных пород с последующим переходом к напряжениям, и динамические (геофизические), основанные на установлении

корреляции между скоростью распространения упругих волн в массиве пород и его напряженным состоянием.

Из первой группы методов наибольшее распространение в практике исследований нашел метод разгрузки. Он применялся при изучении напряженного состояния скальных массивов на участках строительства Токтогульской, Ингурской и Рогунской ГЭС. В основу метода положены измерения деформации скальной породы при ее разгрузке от действующих напряжений. Разгрузка осуществляется путем обуривания керна в скважинах. При этом применяются два основных способа обуривания и измерения деформаций разгрузки: метод торцевых измерений и метод соосных скважин. В СССР и других странах СЭВ применяется главным образом метод торцевых измерений.

Для измерения напряжений этим методом в массиве пород бурится скважина, на забой которой после предварительной его шлифовки наклеивается розетка из 3—4 электротензометров. Затем производится обуривание торца скважины с измерением деформаций в различных направлениях, фиксируемых тензодатчиками. Зная упругие характеристики породы, которые определяются испытанием керна, по измеренным деформациям рассчитывают напряжения по формулам теории упругости [Турчанинов, Иофис, Карапарян, 1977]. По длине скважины может быть выполнено значительное число таких измерений, что позволяет проследить за изменением напряжений по глубине.

В СССР и других странах СЭВ для исследования напряженного состояния торцевым методом используется унифицированный комплект измерительной аппаратуры УКР-72, в состав которого входит пневматическая машина для шлифовки забоя с алмазной зачистной головкой, ориентирующее и прижимное устройство, тензометрический патрон с кабелем и тензометрическая регистрирующая станция. Комплект предназначен для измерения напряжений в скважинах диаметром 76—80 мм.

В методе соосных скважин бурятся две скважины: центральная малого диаметра и оконтуривающая большого диаметра. Перед бурением оконтуривающей скважины в центральной скважине устанавливают деформометры или наклеивают на стенки датчики, по которым фиксируют деформации разгрузки.

Основным недостатком обоих рассмотренных методов исследования напряженного состояния пород в скважинах является малая база измерения, что, естественно, существенно сказывается на точности получаемых результатов. Кроме того, диаметр скважин оказывается соизмеримым с размером мелких блоков, ограниченных трещинами первичной отдельности в осадочных или контракционных в магматических горных породах. Исследование же блочных моделей, составленных из фотоупругих элементов, показало, что в каждом из блоков возникает весьма сложная картина распределения напряжений,

вследствие чего результаты измерений зависят в большой степени от места заложения скважины. Этим во многом объясняется тот факт, что измерения в натуре дают значительный разброс величины напряжений. Так, например, при исследовании напряженного состояния массива Рогунской ГЭС значения горизонтальных напряжений колебались от 7 до 26 МПа при среднем значении 16,5 МПа. Для того чтобы устранить этот недостаток, был разработан метод измерения напряжений на большой базе, получивший в соответствии с его физической основой название метода компенсации, или метода восстановления деформаций (см. разд. 6.3.4.1).

Кроме абсолютных величин напряжений, большой практический интерес представляют данные об изменении напряженного состояния массива во времени, особенно в процессе ведения строительных работ: проходки подземных выработок, вскрытии котлованов и т. д. Для этой цели при изысканиях под гидротехническое строительство применяется метод фотоупругости. Он основан на фиксации формы и числа полос в оптически чувствительном датчике, помещаемом в скважину и прочно скрепленном с ее стенками kleem или цементным раствором. Регистрация интерферционной картины осуществляется с помощью переносной измерительной аппаратуры — полярископа, устанавливаемого в устье изучаемой скважины. Этот метод был применен при изучении основания Ингуринской ГЭС.

#### 6.3.4. Изучение механических свойств скальных массивов (геомеханические исследования)\*

Механические свойства горных пород исследуются как полевыми, так и лабораторными методами, но существенный недостаток последних заключается в том, что они характеризуют породу в монолите, а не в массиве, т. е. без учета различных структурных неоднородностей, и в первую очередь трещиноватости, которая оказывает на механические свойства пород существенное, а в некоторых случаях определяющее влияние. В связи с этим в СССР в настоящее время при изучении механических свойств скальных массивов упор делается на полевые опыты, а лабораторные испытания используются как вспомогательные (при предварительных оценках, расчленении массива на геологические тела и пр.).

Вопросы лабораторного изучения механических свойств пород изложены с необходимой полнотой и на достаточно современном уровне в многочисленных руководствах [Барон, Логунцов, Позин, 1962; «Свойства горных пород...», 1969, и др.], поэтому мы ограничимся здесь характеристикой полевых методов, которые описаны в литературе значительно слабее.

\* Раздел написан Ю. А. Фишманом.

В отличие от лабораторных испытаний, при полевых экспериментах в работу вовлекается значительно больший объем породы, что позволяет учесть влияние некоторой части структурных неоднородностей; но все же они несоизмеримы с основанием сооружений, и проблема распространения полученных результатов полевых испытаний на весь массив пород или некоторую его часть, взаимодействующую с сооружением, остается задачей сложной и не вполне решенной. Известную помощь здесь приносит применение сейсмоакустических методов, выполняемых одновременно на тех же площадках, которые используются для опытных работ. Такие совместные эксперименты позволяют установить зависимости между результатами определения механических (главным образом деформационных) свойств пород и скоростями распространения упругих волн и распространить результаты «точечных» исследований на объемы породы, изученные сейсмоакустическими методами.

Следует отметить, что в настоящее время накоплен большой материал совместных исследований, что позволило построить корреляционные зависимости для многих типов скальных пород и использовать геофизические методы для предварительной приближенной оценки деформационных свойств пород на ранних стадиях проектирования или в простых геологических условиях без проведения полевых опытов.

##### 6.3.4.1. Исследование деформационных свойств

Деформационные характеристики скального массива — модуль общей деформации  $E_0$ , коэффициент удельного упругого отпора  $k_0$ , коэффициент Пуассона  $\mu$  — широко используются как для расчетов осадок и перемещений подпорных сооружений, так и для обделок тоннелей и других подземных сооружений. В настоящее время в связи с применением численных методов решения задач теории упругости и пластичности и, в частности, метода конечных элементов модуль деформации является одним из основных параметров для расчетов напряженного состояния систем «сооружение — основание». Модуль деформации служит также важной характеристикой для геомеханических моделей оснований плотин и других гидротехнических сооружений. В силу изложенных причин на долю деформационных исследований приходится в настоящее время наибольшее количество полевых экспериментов. Так, например, из 1380 полевых опытов, проведенных в Советском Союзе на 32 объектах на 1/1 1973 г., деформационные свойства исследовались в 940 случаях.

**Исследование модуля деформации.** Наиболее распространенным способом определения модуля деформации является метод плоских штампов. Применяются как жесткие, так и гибкие штампы. В первом случае нагрузка на основание передается через бетонные (реже металлические) штампы при помощи

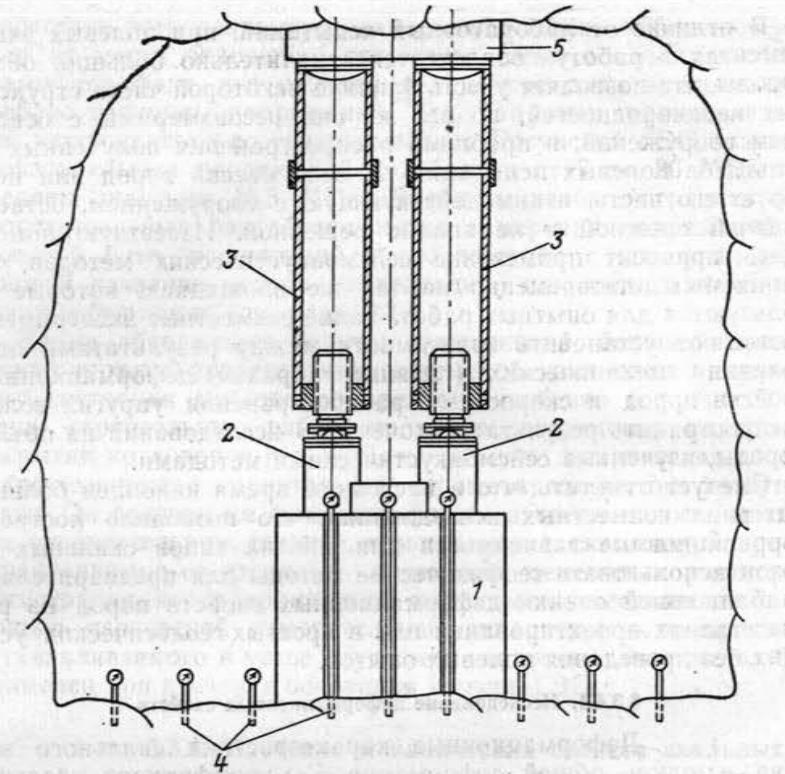


Рис. 6.15. Жесткий штамп с поршневыми домкратами для определения модуля деформации скальных пород.

1 — бетонный штамп; 2 — поршневые домкраты; 3 — распорные жесткие трубы; 4 — реперы с измерительными приборами; 5 — бетонный упор

гидравлических поршневых домкратов или плоских металлических подушек типа домкратов «Фрейсине» (рис. 6.15). Во втором случае нагрузка к основанию прикладывается через металлическую плиту и слой резины, укладываемый на выровненную цементом поверхность скалы и заключенный, во избежание его выпирания, в металлическое кольцо — бандаж (рис. 6.16). Опыты методом жестких штампов выполнялись при исследовании модуля деформации скальных оснований Красноярской, Саяно-Шушенской, Зейской, Ингурской и других плотин, опыты методом гибких штампов — на Братской, Усть-Илимской, Токтогульской ГЭС и др.

Для вычисления модуля деформации  $E$  по измеренной осадке поверхности основания  $S$  используется известная зависимость Буссинеска—Шлейхера:

$$E_0 = \frac{\omega q (1 - \mu^2) b}{S}, \quad (6.1)$$

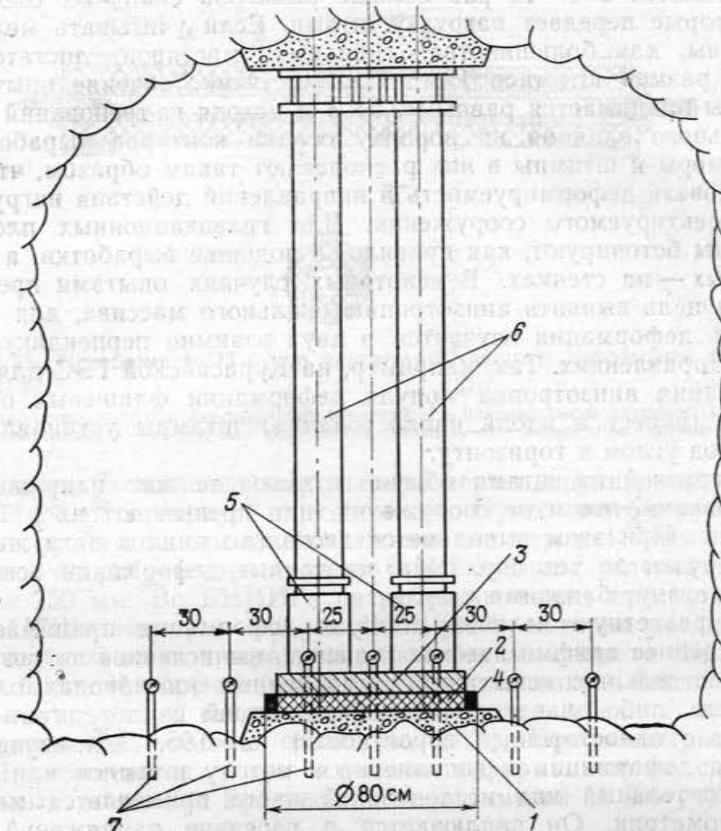


Рис. 6.16. Гибкий штамп для определения модуля деформации скальных пород.

1 — бетонная выравнивающая подготовка; 2 — слой резины; 3 — металлическая распределительная плита; 4 — кольцо-бандаж; 5 — поршневые домкраты; 6 — трубчатые распорки; 7 — реперы с измерительными приборами

где  $q$  — интенсивность нормальной нагрузки на основание,  $b$  — диаметр или длина стороны квадратного штампа,  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $\omega$  — коэффициент, зависящий от формы, жесткости штампа и положения точки, в которой измеряется осадка [Щитович, 1973].

Модуль деформации, как правило, вычисляют по показаниям реперов, установленных на скале в пределах штампа. При этом в расчет берут их среднюю осадку либо осадку каждого репера в отдельности, усредняя полученные частные значения модулей.

Опыты методом штампов ведутся в специальных подземных камерах или на открытой поверхности. Однако последние ввиду сложности создания упора для домкратов применяются гораздо реже. Размеры штампов из условий учета масштабного фактора

принимаются в 5—10 раз больше размеров скальных блоков, на которые передает нагрузку штамп. Если учитывать мелкие трещины, для большинства скальных массивов достаточно иметь размер штампов 1 м<sup>2</sup>. Соответственно сечение опытной камеры принимается равным 2,5×3 м, исходя из требований минимального влияния на воронку осадки контуров выработки.

Камеры и штампы в них располагают таким образом, чтобы исследовать деформируемость в направлении действия нагрузки от проектируемого сооружения. Для гравитационных плотин штампы бетонируют, как правило, в подошве выработки, а для арочных — на стенках. В некоторых случаях опытами преследуется цель выявить анизотропию скального массива, для чего модуль деформации изучается в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Так, например, на Курской ГЭС для исследования анизотропии модуля деформации флишевых отложений (вкrest и вдоль напластования) штампы устанавливались под углом к горизонту.

Нагрузкой на штамп обычно создают те же напряжения в основании, что и от сооружения, или превышают их в 1,5—2,0 раза. При этом выполняется несколько циклов нагружения и разгрузки до тех пор, пока остаточные деформации основания не станут близкими к нулю.

За расчетную величину модуля деформации принимается либо среднее арифметическое значение, вычисленное по результатам отдельных испытаний, выполненных на породах одной разности, либо значение, отвечающее одной из доверительных границ с односторонней вероятностью  $\alpha=0,95$ . Для изучения модуля деформации в дополнение к методу штампов или как самостоятельный вид исследований часто применяется метод прессиометрии. Он заключается в передаче напряжений на стенки буровых скважин с помощью гидравлических камер различной конструкции и измерении деформаций стенок в радиальном направлении. В СССР разработаны и используются прессиометры различных типов и диаметра (от 48 до 910 мм).

В прессиометрах конструкции Гидроспецпроекта перемещения стенок скважины устанавливаются по удлинению токопроводящей резины, завулканизированной в резиновую оболочку прессиометра (рис. 6.17). Приборы выпускаются трех диаметров: 48, 76 и 105 мм при длине нагружаемого участка соответственно 300, 480 и 600 мм. Прессиометры конструкции Гидроспецпроекта рассчитаны на рабочее давление до 5 МПа и предназначены для измерения модуля деформации величиной от 1000 до 60 000 МПа [Шатирян, 1977]. С помощью прессиометрического комплекса ПТ-1 производились опыты по исследованию модуля деформации на Нурекской, Ингурской, Капчагайской и Рогунской ГЭС.

В прессиометрах конструкции ВНИИГ (ЦГШ-130) измерение перемещений стенок скважин производится индуктивными

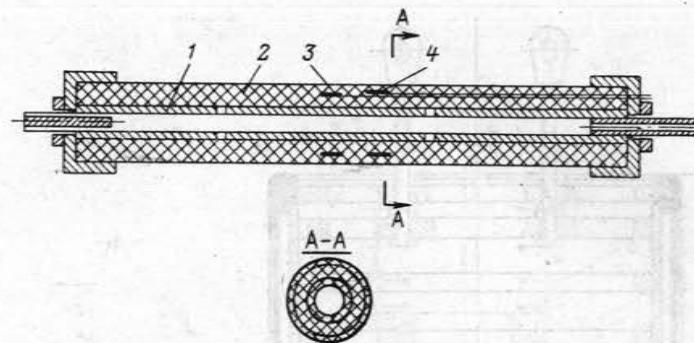


Рис. 6.17. Прессиометр ПТ-1 для определения модуля деформаций в скважинах.

1 — металлическая труба; 2 — резиновая оболочка; 3 — измерительные элементы для анизотропной среды; 4 — то же, для изотропной среды; А-А — поперечное сечение

датчиками, расположенными взаимно перпендикулярно во внутренней полости корпуса прессиометра. Прессиометры предназначены для установки их в скважины диаметром 130 мм и рассчитаны на рабочее давление до 6 МПа. Длина участка нагружения 750 мм. Во ВНИИГе разработаны также прессиометры типа ЦГШ диаметром 910 мм (ЦГШ-900), которые предназначены для установки в скважины, пробуренные станком «Каликс» (рис. 6.18). Измерение деформаций производится как по торцам камер, так и встроенными датчиками в среднем сечении нагружаемого участка [Сапегин, 1973]. Прессиометры типа ЦГШ применялись при изучении деформационных свойств скальных массивов Братской, Усть-Илимской и Богучанской ГЭС.

Модуль деформации при испытании пород прессиометрами вычисляют по зависимости:

$$E_0 = \psi \frac{\Delta q (1 + \mu) r}{\Delta u_r}, \quad (6.2)$$

где  $\Delta q$  — приращение давления на стенки скважины,  $r$  — радиус скважины,  $\mu$  — коэффициент Пуассона, принимаемый обычно равным 0,2—0,3,  $\Delta u_r$  — приращение радиуса скважины,  $\psi$  — коэффициент, зависящий от длины загружаемого участка, радиуса скважины и места измерения деформации скважины; он может быть определен аналитически или графически по формуле М. Ивковича [Роза, Зеленский, 1967].

Следует отметить, что при исследовании скальных пород прессиометрия в Советском Союзе не получила пока широкого распространения. Это объясняется тем, что размеры прессиометров малого диаметра (48—130 мм) соизмеримы с размерами блоков скального массива, и поэтому результаты, полученные в прессиометрических опытах, характеризуют дефор-

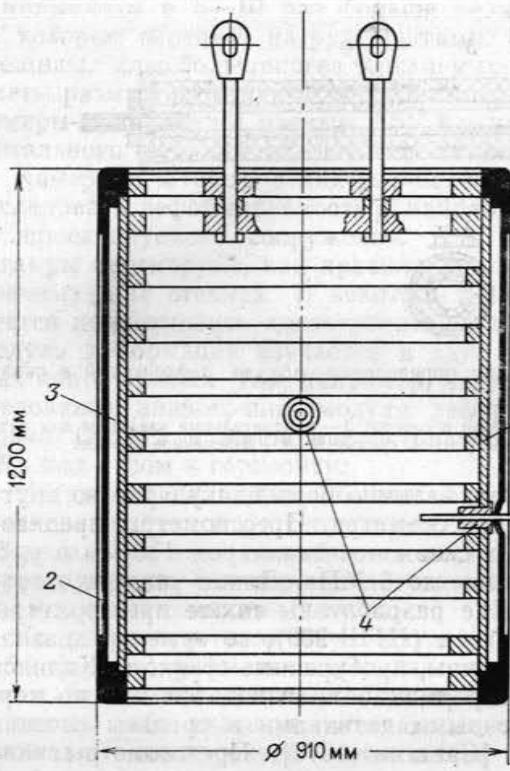


Рис. 6.18. Прессиометр ЦГШ-900 для определения модуля деформации в скважинах большого диаметра.  
 1 — кожух; 2 — двухслойная резинотканевая оболочка;  
 3 — напорная полость; 4 — сальниковые устройства измерительных приборов

мируемость не трещиноватого массива, а только сравнительно монолитной породы, что обычно дает завышенное значение модуля деформации. Прессиометры же большого диаметра, достаточно удовлетворительно учитывающие масштабный фактор, связаны с бурением скважины большого диаметра, что не всегда и не на всех гидроузлах возможно.

Новый способ исследований модуля деформации в скважинах, так называемый метод касательных нагрузок, разработан во ВНИИГе. В этом методе нагрузка к стенкам скважины прикладывается параллельно ее оси. На рис. 6.19 представлены две установки, испытанные на Усть-Илимской ГЭС.

Первая установка (КН-900) предназначена для проведения опытов в скважинах большого диаметра. Она состоит из двух бетонных колец, имеющих сцепление со стенками скважины, между которыми устанавливаются распорные колонны и домкраты, создающие продольные усилия. Измерение смещений производится дистанционно с помощью датчиков, укрепленных на относительно неподвижной раме.

Вторая установка (КН-180) состоит из двух прессиометров, между которыми устанавливается поршневой домкрат. Вначале

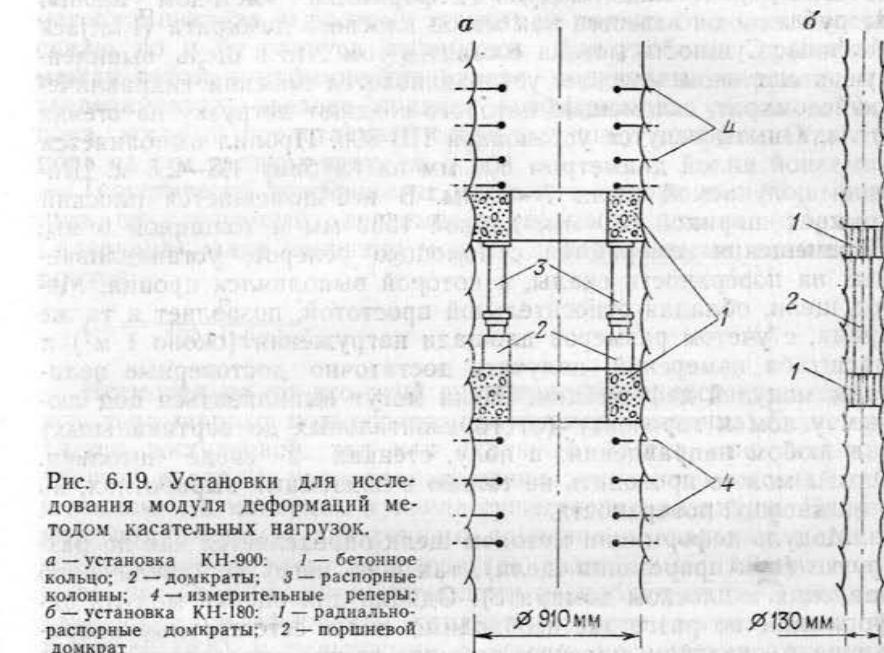


Рис. 6.19. Установки для исследования модуля деформаций методом касательных нагрузок.  
 а — установка КН-900: 1 — бетонное кольцо; 2 — домкраты; 3 — распорные колонны; 4 — измерительные реперы;  
 б — установка КН-180: 1 — радиально-распорные домкраты; 2 — поршневой домкрат

создается давление в прессиометрах и регистрируются радиальные смещения, затем, не сбрасывая давления в прессиометрах, включают поршневой домкрат, который развивает предельное усилие, передаваемое за счет сил трения на стенки скважины. Возникающие при этом смещения в направлении оси скважины регистрируются измерителями продольных смещений, устанавливаемыми вне пределов зоны нагружения (в зоне сжатия). Таким образом, в этой установке удается измерить деформацию и модули во всех трех направлениях.

Для определения модуля деформации при передаче на стенки скважин касательных нагрузок используется следующая приближенная зависимость:

$$E_0 = \phi_0 \frac{\tau (1.05 + 0.45\mu) r}{u_0}, \quad (6.3)$$

где  $\tau$  — среднее значение интенсивности касательной нагрузки,  $r$  — радиус скважин,  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $u_0$  — перемещение вдоль оси скважины точки, лежащей на поверхности скважин или в глубине скального массива,  $\phi_0$  — коэффициент, зависящий от конструкции установки.

сящий от длины участка нагружения  $l$ , радиуса скважины  $r$  и координат рассматриваемой точки.

В последнее время в Советском Союзе начал развиваться способ определения модуля деформации «методом щели». За рубежом он известен как метод плоского домкрата (Flatjack Method). Сущность метода состоит в том, что в щель, выпиленную в скальном массиве, устанавливается плоский гидравлический домкрат, с помощью которого создают нагрузку на стенки щели. Опыты ведутся установкой ПВ-800. Пропил выполняется алмазной пилой диаметром 800 мм на глубину 1,5—2,5 м. Ширина получаемой щели 7—8 мм. В нее помещается плоский домкрат шириной 800 мм, длиной 1500 мм и толщиной 6 мм. Перемещения измеряются с помощью реперов, устанавливаемых на поверхности скалы, в которой выполнялся пропил. Метод щели, обладая относительной простотой, позволяет в то же время, с учетом размеров площади нагружения (около 1 м<sup>2</sup>) и масштаба измерений, получать достаточно достоверные величины модулей деформации. Щели могут выпиливаться под любым углом к горизонту (от горизонтальных до вертикальных) и в любом направлении: в полу, стенах и своде штолни. Опыты можно проводить не только в подземных выработках, но и на дневной поверхности.

Модуль деформации методом щели определяется как по разгрузке (при прорезании щели), так и по нагрузке (увеличению давления в плоском домкрате). Однако для оценки модуля деформации по разгрузке необходимо знать естественные напряжения в скальном массиве, поэтому проще определять его по стадии нагрузки, зная давление в домкрате  $q$  и перемещения реперов  $u$ :

$$E_0 = k_1 \frac{q}{u}, \quad (6.4)$$

где  $k_1$  — коэффициент, зависящий от расстояния  $y$  между репером и щелью и от ширины домкрата  $2d$ :

$$k_1 = d [(1 - \mu)(\sqrt{1 + y^2/d^2} - y/d) + (1 + \mu)/\sqrt{1 + y^2/d^2}]. \quad (6.5)$$

Зависимость (6.5) справедлива для точек, лежащих на оси, проходящей через середину длины щели и перпендикулярной к ее плоскости.

Применение метода щели позволяет существенно упростить полевые опыты по определению модуля деформации. Кроме того, с помощью установки ПВ-800 можно получить не только модуль деформации, но и напряженное состояние скального массива.

**Исследование коэффициента отпора.** Коэффициент отпора массива скальных пород — характеристика, используемая для расчетов облицовок подземных сооружений. В последние годы в связи с интенсивным строительством земляных плотин и свя-

занных с ними туннелей потребность в изучении коэффициента отпора существенно возросла.

Коэффициент отпора — величина, аналогичная коэффициенту постели, которым пользуются при расчетах плит и балок по методу Винклера, и поэтому зависит не только от податливости скалы, но и от радиуса выработки. Для удобства сравнения между собой коэффициентов отпора, полученных в различных экспериментах, введено понятие коэффициента удельного отпора, который представляет собой величину коэффициента отпора на 1 м радиуса туннеля.

Теоретически коэффициент удельного отпора можно вычислить по следующей зависимости теории упругости (формуле Галеркина), зная величину модуля деформации из штамповых опытов:

$$K_0 = \frac{E_0}{100(1 + \mu)}. \quad (6.6)$$

Несмотря на то что этой зависимостью в настоящее время довольно широко пользуются, получаемая величина  $K_0$  не является достоверной, так как скальный массив — не идеально упругая среда, а условия нагружения скального массива под штампом и в напорном туннеле существенно различны. Например, под влиянием внутреннего давления в скальном массиве вокруг туннеля могут образоваться радиальные трещины разрыва, чего под плоскими штампами не наблюдается. В результате этого коэффициенты удельного отпора, вычисленные по формуле (6.6) и полученные в опытах нагружения круглоцилиндрической выработки, могут отличаться в 1,5—2,0 раза.

Существуют две группы методов определения коэффициента удельного отпора: в напорных камерах и с помощью инвентарных установок.

В методе напорных камер исследуемый участок выработки достаточно большого диаметра (его стараются делать близким к диаметру проектируемого туннеля) ограждают с двух сторон бетонными пробками, а стены его гидроизолируют. Внутрь камеры подают под давлением воду и измеряют радиальные деформации с помощью дистанционных измерительных приборов, которые изготавливаются герметическими. Этот метод позволяет получить данные по коэффициенту удельного отпора в условиях, наиболее приближенных к натурным. Однако, несмотря на указанные преимущества, метод напорных камер не получил широкого распространения из-за большой трудоемкости испытаний.

Исследования коэффициента отпора с помощью инвентарных установок (за рубежом они называются «радиальными штампами») ведутся в настоящее время гораздо чаще, чем в напорных камерах. В СССР применяются конструкции двух типов. К первому типу относятся установки, внутренний каркас кото-

рых состоит из одного цилиндра, по внешнему контуру которого натянуты резиновые камеры. Этим они похожи на прессиометры и обычно применяются при исследованиях в вертикальных скважинах или шахтах. Ко второму типу относятся установки со сборным металлическим каркасом, который собирается непосредственно на месте проведения опытов. Давление на породу создается в них секционными резиновыми или металлическими подушками, устанавливаемыми по контуру выработки. Конструкции такого типа могут применяться как в горизонтальных, так и в вертикальных выработках. В настоящее время в СССР используется установка УЦН конструкции Гидропроекта. Она состоит из металлического каркаса, собираемого из 30 колец и 8 резиновых подушек, укладывающихся между каркасом и бетонной выравнивающей обделкой, разрезанной швами на 8 сегментов. Диаметр установки 2,0 м, длина участка нагружения 1,4 м. Измерения перемещений стенок выработки производятся по радиусам относительно неподвижной центральной оси (трубы) с помощью мессур или индуктивных датчиков.

Использование инвентарных установок объединяет преимущества прессиометров и напорных камер, так как при большом диаметре выработки (до 2 м) и возможности непосредственного наблюдения за деформациями породы существенно облегчаются по сравнению с напорными камерами подготовительные работы. В СССР коэффициент удельного отпора с помощью инвентарных установок цилиндрической формы испытывался на многих гидроузлах: Чиркайском, Чарвакском, Нуракском, Хантайском, Байпазинском, Рогунском и др.

Коэффициент удельного отпора при использовании кругло-цилиндрических выработок вычисляется по формуле

$$K_0 = \psi \frac{qr}{100u_r}, \quad (6.7)$$

где  $q$  — интенсивность равномерно распределенной нагрузки на поверхность выработки,  $r$  — радиус выработки,  $u_r$  — радиальные перемещения стенок выработки,  $\psi$  — коэффициент, учитывающий положение створа, в котором производили измерения, и длину участка нагружения; он может быть определен по данным Роза и Зеленского [1967].

#### 6.3.4.2. Прочностные исследования

Из всех характеристик прочности скального массива в настоящее время исследуются в основном характеристики сопротивления сдвигу, поскольку на них базируются расчеты устойчивости оснований гидротехнических сооружений и подземных выработок. В последние годы были начаты исследования сопротивления скального основания раздавливанию, отрыву и прочности в условиях трехосного напряженного состояния. Исследование этих характеристик представляет интерес

при создании геомеханических моделей скальных оснований, а также в расчетах местной прочности оснований. Однако объем таких исследований пока еще невелик.

**Исследования параметров сопротивления сдвигу.** В расчетах устойчивости бетонных подпорных сооружений, скальных откосов и подземных выработок используются следующие характеристики сопротивления сдвигу: по контакту бетон — скала; по трещинам в скальном массиве; по скальному массиву в целом.

Соответственно опыты в полевых условиях проводятся методом сдвига бетонных штампов или скальных целиков, заключенных в бетонную обойму.

Участки для опытов выбирают в наиболее характерных для данного сооружения зонах скального массива. При этом направление сдвига штампов или целиков принимают таким, чтобы оно совпадало с направлением действия сдвигающих усилий на сооружение или откос. Размеры штампов или целиков зависят от степени трещиноватости скального массива. В практике исследований принято задавать их размеры в плане порядка  $1 \times 1$  м или  $1,5 \times 1,5$  м, чем обеспечивается учет масштабного фактора при размере блоков скальной породы в 5—10 раз меньше размера штампа. Имелись случаи сдвига штампов (целиков) большей площади. Например, на Токтогульской ГЭС сдвигался целик площадью 7 м<sup>2</sup>, на Братской ГЭС — 50 м<sup>2</sup> и на Красноярской ГЭС — 100 м<sup>2</sup> [Фишман, 1974]. Однако такие исследования проводятся редко и в небольшом числе опытов (1—2) в связи с трудоемкостью подготовки и проведения экспериментов. Высота штампа (целика) обычно принимается равной не менее половины его короткой стороны, расстояние в свету между штампами примерно равным их ширине. Перед бетонированием штампа его основание защищают от расшатанных взрывом отдельностей и продуктов выветривания. Шероховатость сохраняется естественной, но с высотой выступов не более 10—15 см. Марка бетона опытных штампов обычно соответствует марке бетона сооружения.

Наибольшую трудность при исследованиях сопротивления сдвигу представляют работы по подготовке скальных целиков, особенно для сдвига их по поверхности ослабления (трещинам и прослойям) скального массива. Для предохранения скального целика от разрушения в процессе его изготовления применяют обуривание с ручной разборкой скалы. В некоторых случаях применялось взрывание по контуру целика детонирующего шнуря. По боковым граням целик облицовывается армированным бетоном, предохраняющим его от разрушения в процессе опыта. Особенno сложно изготавливать целики на наклонных трещинах, которые представляют наибольший интерес для оценки устойчивости скальных откосов и крупных подземных выработок. По указанным причинам сдвиги скальных целиков

проводятся значительно реже, чем сдвиги штампов, хотя параметры сопротивления сдвига по поверхностям ослабления скального массива имеют не меньшее значение, чем по контакту бетон — скала. Так, из 500 сдвиговых опытов, проведенных в Советском Союзе на 1/1 1973 г., было сдвинуто только около 60 целиков на 8 объектах (Саянская, Ингурская, Намахвани ГЭС и др.).

Нормальные напряжения, создаваемые в подошве штампа (целика), по величине соответствуют напряжениям в основании сооружения или в расчетной плоскости сдвига в скальном массиве. Опыты проводят при 4—5 различных значениях  $\sigma$ . Общее количество опытных штампов или сдвигов целиков стараются принимать не менее 6. Сдвиг проводят при постоянной нормальной и нарастающей ступенями сдвигающих нагрузках вплоть до наступления предельного состояния, которое характеризует предельное сопротивление сдвига скального массива. Момент предельного сопротивления сдвига определяют по прекращению подъема давления в домкратах, создающих сдвигающее усилие при непрерывной работе насоса, и непрерывному перемещению штампа (целика). Затем обычно выполняются повторные сдвиги по образованной зоне разрушения, после чего штампы опрокидываются, а целики разбираются для анализа характера разрушения.

Параллельно с проведением сдвиговых опытов в практике различных организаций принято изучать на тех же штампах деформационные свойства скальных пород. Передача на штамп нормальной нагрузки производится до начала приложения сдвигающих усилий. Обычно выполняются 3 цикла нагрузки — разгрузки с доведением до заданной интенсивности загружения, которая может превышать величину нормальных напряжений, обеспечивающих сдвиг.

Результаты испытаний сопротивления сдвига обобщают в виде графической зависимости предельных касательных напряжений  $\tau$  от нормальных напряжений  $\sigma$ . При этом нормативные значения характеристик сопротивления сдвига  $\operatorname{tg} \varphi_p$  и  $c_p$  определяют как параметры линейной зависимости  $\tau_{\text{пр}} = \sigma \operatorname{tg} \varphi_p + c_p$ , построенной методом наименьших квадратов по совокупности опытных точек. Значения характеристик сопротивления сдвига  $\operatorname{tg} \varphi_p$  и  $c_p$  для расчетов на устойчивость гидroteхнических сооружений I и II класса либо находят как параметры линейной зависимости, которая аппроксимирует нижнюю доверительную границу зависимости  $\tau_{\text{пр}} = f(\sigma)$  с односторонней доверительной вероятностью  $a = 0,99$ , либо получают делением нормативных характеристик на коэффициенты безопасности по грунту:

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \operatorname{tg} \varphi_n / k_{\varphi} \quad \text{и} \quad c_p = c_n / k_{c},$$

где  $k_{\varphi} = 1,15$  и  $k_{c} = 1,8$ .

Из двух значений характеристик сопротивления сдвига, полученных статистическим методом и введением коэффициентов безопасности по грунту, нормами рекомендуется принимать наибольшее. В последние годы в Советском Союзе проведены специальные исследования для изучения механизма разрушения скальных оснований бетонных плотин, которые позволили установить ряд неизвестных ранее закономерностей [Фишман, 1976]. Установлено, в частности, что бетонные сооружения образуют достаточно прочный контакт с основанием, и когда под подошвой нет крупных субгоризонтальных трещин, разрушение происходит не путем сдвига, а путем отрыва плотины или штампа (с образованием наклонных трещин растяжения в основании) со стороны напорной грани и смятия (дробления) скального массива под низовой гранью. Момент раздробления скального массива соответствует величине  $\tau_{\text{пр}}$ . При этом разрушение сопровождается поворотом сооружения вокруг горизонтальной оси вращения с подъемом напорной и опусканием низовой грани. Установлено также, что существенное влияние на величину  $\tau_{\text{пр}}$ , а следовательно, и на параметры  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$  оказывает схема нагружения штампа, от которой зависит распределение напряжений под подошвой, что объясняется описанным выше механизмом. Но поскольку в опытах (под штампом) и в натуре (под плотиной) обычно имеет место разное распределение напряжений, так как опыты проводятся, как правило, по безмоментной схеме, а плотина всегда нагружена опрокидывающим моментом, то полученные параметры сопротивления сдвига не пригодны для расчета устойчивости плотины без соответствующей их корректировки. На практике получаемые в опытах параметры  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$  приходится существенно снижать, что делается иногда достаточно произвольно.

Исходя из описанных выше закономерностей разрушения в настоящее время проводится усовершенствование методики полевых опытов по сдвигу бетонных штампов [Фишман, 1976]. В основе новой методики лежит требование о соблюдении подобия напряженного состояния в основании штампа и плотины, что достигается соответствующей схемой приложения нагрузок к штампу, моделирующих эксцентрикитеты  $e$  и  $h$  сил, действующих на плотину (рис. 6.20). Кроме того, учитывая явление поворота штампа в вертикальной плоскости, предусмотрена установка дополнительных шарниров 8 на горизонтальных и вертикальных домкратах, что исключает возможность их заклинивания при нагружении штампа, которое приводит, как показали специальные исследования [Фишман, 1976], к искажению получаемых характеристик прочности (обычно к их завышению). Введен и ряд других изменений, направленных на устранение недостатков существующей методики испытаний, таких как проведение опытов в условиях плоской задачи, соответствующей схеме работы основания бетонной плотины, исключение

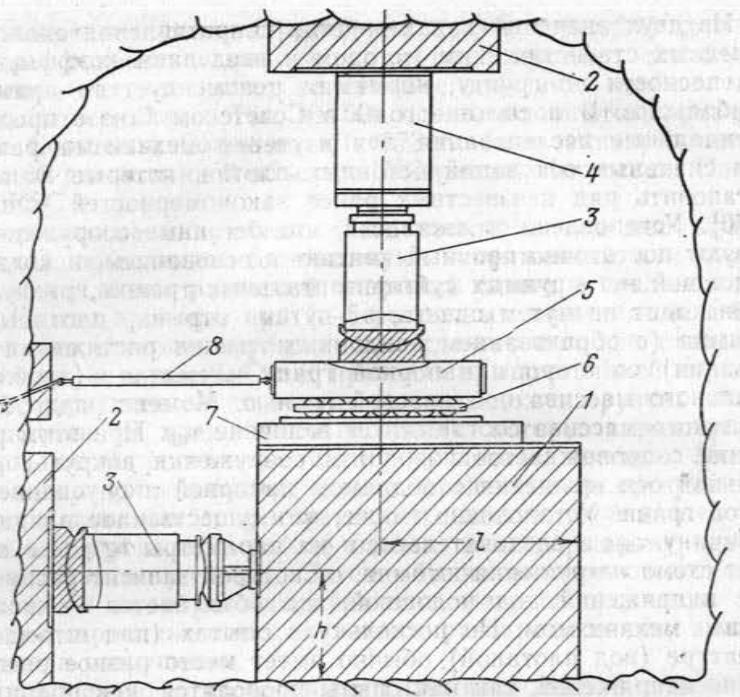


Рис. 6.20. Схема опытов по сдвигу бетонных штампов с учетом эксцентрикитета.

1 — бетонный штамп; 2 — бетонные упоры; 3 — поршневые домкраты; 4 — распорная труба; 5 — балка; 6 — катки; 7 — металлическая плита; 8 — измерительная тяга

сосредоточенного приложения сдвигающей нагрузки, которое вызывает преждевременное разрушение и раскалывание бетона, и др. Начато применение новой методики полевых исследований сопротивления сдвигу бетонных штампов на некоторых гидроузлах в опытном порядке.

**Исследование прочности основания на раздавливание.** Необходимость исследования прочности основания на раздавливание возникла в связи со строительством арочных плотин. Под прочностью на раздавливание понимается в этом случае предельное сопротивление основания нагрузкам, приложенным нормально к его поверхности. Эти исследования начались с 1970 г. и проведены пока только на трех объектах (на Ингурском и Токтогульском гидроузлах, а также на ГЭС Хадита в Ираке, где исследования проводились под руководством советских специалистов). Опыты выполняются, как правило, в почве выработки (но могут проводиться и на стенах штольни), аналогично опытам по определению модуля деформации. Разница состоит только в том, что нагрузки доводят до величины, вызывающей

разрушение породы. При этом попутно изучается и модуль деформации скального массива. Поскольку для изучения прочности пород раздавливанием нужен высокий уровень прилагаемых нормальных нагрузок (который превышает, как правило, прочность бетона), опыты проводятся с металлическими штампами диаметром 0,3—0,5 м.

Начало разрушения основания устанавливается по трем критериям:

- перегибу кривых зависимости осадки от нагрузки, что свидетельствует о начале нелинейных деформаций и образования локальных зон разрушения,

- моменту возникновения незатухающих деформаций ползучести, когда осадка на очередной ступени загружения происходит с постоянной или даже возрастающей скоростью.

- началу выпора пород вокруг штампа, что фиксируется по изменению знака перемещений реперов; этот момент обычно сопровождается появлением сети кольцевых и радиальных трещин вокруг штампа.

Предельное сопротивление скального основания сжимающим нагрузкам, соответствующее полному раздроблению скального массива, устанавливается по прекращению подъема давления в домкратах при непрерывной подаче в них масла. Однако следует отметить, что на прочных породах обычно не удается довести опыт до полного разрушения основания. Для суждения же о допускаемых величинах нагрузок на основание достаточно данных о начальном этапе разрушения.

### 6.3.5. Изучение современных геологических процессов

#### 6.3.5.1. Изучение карста

Как было отмечено в разделе 2.6.1, для строительства гидротехнических сооружений наибольшее значение имеет карбонатный карст, поскольку на относительно более легкорастворимых породах, таких как ангидрит, гипс или каменная соль, возведение напорных сооружений допускается только в исключительных случаях.

В районах, сложенных карбонатными породами и характеризующихся в целом благоприятными инженерно-геологическими условиями, карст является фактором не только существенно усложняющим гидротехническое строительство, но нередко ставящим под вопрос саму возможность строительства высоких плотин и создания достаточно емких водохранилищ. Можно привести немало примеров из практики гидротехнического строительства в СССР, когда интенсивное развитие карста заставляло либо отказаться совсем от строительства плотины, либо перенести строительство на другой, более благоприятный створ, либо ограничить проектируемый напор.

А. Г. Лыкошин, посвятивший ряд работ проблеме изучения карста при гидротехническом строительстве, предлагает разделить исследования карста на три этапа. Первый связан с составлением схемы комплексного использования реки и имеет своей целью дать общее представление о характере и интенсивности развития карста в долине реки с полнотой и детальностью, достаточной для обоснованного суждения о возможности возведения в ее пределах высоких плотин и создания водохранилищ. На втором этапе, когда осуществляется выбор створа плотины (ТЭО, технический проект), уточняются общие закономерности и зональность развития карста и, наконец, на третьем (технический проект, рабочие чертежи) производится детальная разведка карстопроявлений, определяется их влияние на водопроницаемость и прочность пород как в районе гидроузла, так и непосредственно на участке расположения силовых и напорных сооружений [Лыкошин, 1959].

Исследования карста на первом этапе входят в перечень задач, которые решаются при инженерно-геологических съемках мелкого и среднего масштаба. Весьма эффективными методами изучения карста на этом этапе являются космическая съемка и аэрофотосъемка. Как показывает опыт, применение этих методов позволяет: а) выявить и закартировать все (или большую часть) поверхностные проявления карста, б) оценить в первом приближении интенсивность развития карстового процесса на изучаемой территории, в) выявить некоторые закономерности пространственного развития карста.

Площади развития открытого карста уверенно опознаются на КФС и мелкомасштабных АФС, а отдельные формы — на АФС среднего и крупного масштаба. В обнаженных районах, где отсутствует лесной покров, дешифрирование аэроснимков позволяет не только выявить поверхностные карстовые формы, но и установить с помощью несложных измерительных операций все их основные параметры: размеры в плане, глубину, крутизну склонов и пр. По резкости форм можно также примерно оценить их возраст с выделением древних, старых и молодых его проявлений. По аэроснимкам можно также установить приуроченность карстовых форм к определенным формам рельефа (поймам, высоким речным террасам, днищам и склонам оврагов и балок, водоразделам и пр.), стратиграфическим комплексам и литологическим различиям отложений, элементам геологических структур и пр. (если предварительно было осуществлено геологическое дешифрирование снимков). В качестве примера на рис. 6.21 и 6.22 приведены перспективный и плановый АФС карстового плато, где развиты характерные поверхственные формы карста. Плато сложено полого залегающей толщей известняков, разбитой разломами и крупными тектоническими трещинами. Наиболее крупными карстовыми формами являются бессточные котловины овальной или окружной формы

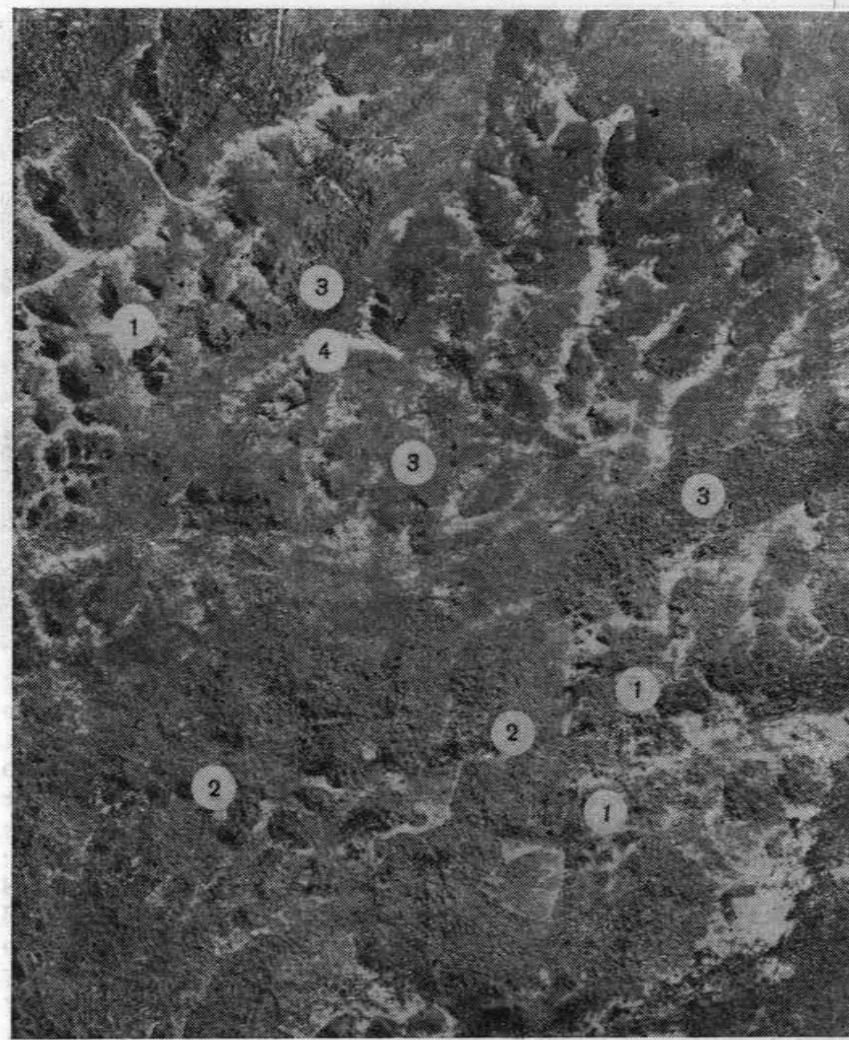


Рис. 6.21. Плановый аэроснимок поверхности плато с открытыми формами карста.

1 — единичные карстовые воронки; 2 — цепочка карстовых воронок вдоль линии разлома; 3 — участки карстового плато, покрытые травяной, кустарниковой и древесной растительностью; 4 — обнажения известняков на гребнях между воронками

шириной до 700 м и глубиной до 250 м (они хорошо различимы под стереоскопом). Дно и склоны котловин дополнительно обложены многочисленными карстовыми воронками, которые хорошо различимы на АФС невооруженным глазом благодаря резкой форме и падающим теням. Местами воронки расположены цепочками вдоль разломов и тектонических трещин.

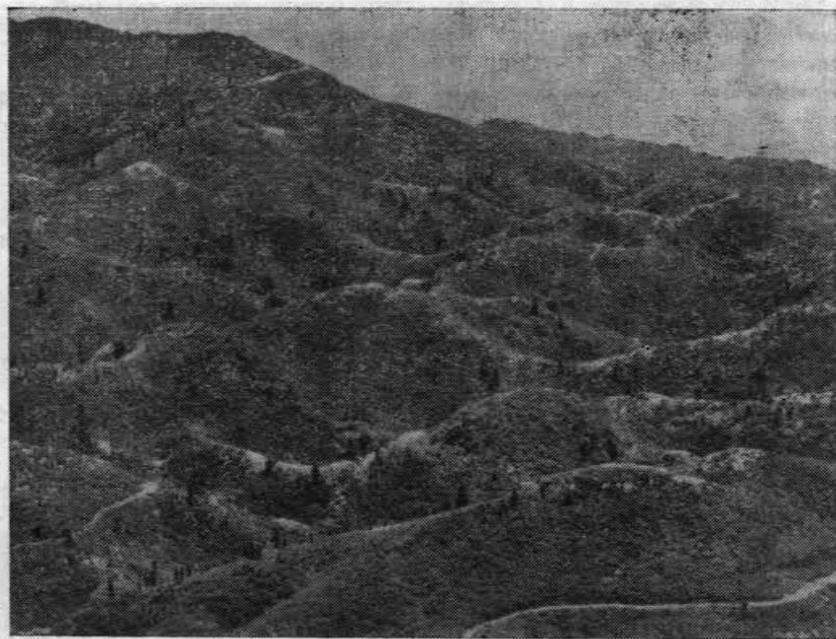


Рис. 6.22. Перспективный снимок к рис. 6.21

В залесенных районах задача изучения карстовых форм по АФС усложняется, так как на АФС различимы в этом случае только крупные карстовые формы (долины, котловины, крупные воронки), мелкие же часто бывают полностью скрыты пологом леса. Аэроснимки можно использовать также для оценки интенсивности карстового процесса, например для вычисления коэффициента закарстованности, выражаемого числом воронок, приходящихся на единицу площади. Можно проследить за изменением величины этого показателя в зависимости от близости к реке, форм рельефа и пр.

Хорошим дополнением к аэрокосмическим методам при изучении карста может служить фототеодолитная съемка, позволяющая закартировать все внешние проявления карста на склонах речной долины: воронки, устья пещер, раскарстованные трещины и др.

Задача дальнейших исследований заключается в выявлении подземных карстовых форм: их положения в плане и в разрезе, величины, формы, наличия и состава заполнителя, обводненности и пр., связи с элементами геологических структур (разломами, трещинами, контактами с вмещающими геологическими телами и пр.). Как справедливо отмечает А. Г. Лыкошин [1978б], нельзя ставить перед изысканиями задачу выявления

всех карстовых форм, так как эта задача, во-первых, выходит за рамки возможностей современных методов инженерно-геологической разведки и, во-вторых, не вызывается необходимостью, поскольку обоснованные проектные решения могут быть приняты на основе выявления общих закономерностей развития карста. В соответствии с этим основное внимание должно быть уделено [Лыкошин, 1978б]: а) выявлению зональности в развитии карста относительно эрозионных форм рельефа местности и элементов структурно-тектонического плана; при этом важно установить приуроченность различных карстовых форм (горизонтальных, вертикальных, провальных и др.) к различным глубинам, а также выявить участки сосредоточения тех или иных карстопроявлений относительно склонов речных долин, террас, тальвегов оврагов и т. п.; б) изучению истории формирования древнего и современного рельефа местности, гидрографической сети с анализом этапов и особенностей ее развития; должны быть выявлены, в частности, условия формирования поверхностного и подземного стока, питания и дренирования подземных вод в зависимости от накопления рыхлых четвертичных отложений и других факторов; в) изучению карстовых форм в зависимости от литологического состава вмещающих пород, их трещиноватости, условий залегания и пр.

Несмотря на существенное совершенствование методов инженерно-геологической разведки и применяемых технических средств, задача выявления подземных карстовых форм остается до настоящего времени весьма сложной. В современной практике для этой цели используется широкий комплекс геофизических методов и горно-буровые работы. Из геофизических методов наиболее надежные результаты дают различные модификации электропрофилирования (двустороннее дипольное, комбинированное и др.). Поскольку карстовые формы обычно заполнены водой или глинистыми продуктами выветривания, они в большинстве случаев выделяются на профилях как участки пониженного сопротивления. Однако может иметь место и обратное соотношение (например, при наличии открытых, не обводненных полостей). Как показывает опыт, надежное определение положения карстовой депрессии может быть сделано с помощью электроразведки только при условии, что размер ее превышает мощность перекрывающих отложений. Положительные результаты дает также применение сейсморазведки, главным образом сейсмического просвечивания. В этом случае признаками карстовых полостей являются: а) аномально низкая интенсивность записи канала, на пути которого расположена карстовая полость; б) характер индикатора скоростей и динамические особенности записи [Воронков, Акатор, 1967]. Иногда для поисков погребенных форм удается использовать магниторазведку и гравиразведку. Выполненные глинистым материалом полости

выделяются слабоповышенным (20—150 гамм) магнитным полем и относительным понижением (до 0,3—15 мгл) гравитационного поля («Методы геофизики...», 1972). Делались также попытки использовать для поисков подземных карстовых форм методы постоянного и переменного электрических полей, терморазведку, эманационную съемку и др., но пока без значительных успехов. Следует отметить, что имеющийся опыт изучения карста геофизическими методами основан на применении недостаточно совершенной аппаратуры и малоэффективных методов обработки полученной информации. В настоящее время, когда возможность накопления сигналов значительно увеличила разрешающую способность геофизической аппаратуры, а автоматические методы обработки данных с использованием статистических моделей позволяют выделить гораздо более слабые аномалии, можно ожидать, что применение геофизики в этой области окажется в дальнейшем значительно более эффективным.

Полезные сведения о степени закарстованности массива карбонатных пород (если карстовые формы не заполнены продуктами выветривания) дают гидрогеологические наблюдения, в частности определение градиентов потока грунтовых вод в прибрежных частях речной долины, а также их изменений после длительных дождей и в особенности в период паводка на соответствующей реке. Так, например, при исследовании степени закарстованности бортов древней долины р. Уфы на участке строительства Павловской ГЭС было установлено, что в левом борту долины на расстоянии более 150 м градиенты имеют значительную величину порядка 0,05, а затем вблизи реки уменьшаются до 0,0004. В период весеннего паводка на участке с крутой депрессионной поверхностью уровень воды в наблюдательных скважинах повышался резко, а на пологом участке не превышал первых десятков сантиметров. Эти данные позволили сделать вывод, в дальнейшем подтвержденный другими исследованиями, что ширина зоны интенсивного развития открытых карстовых форм составляет около 150 м [Лыкшин, 1959]. Полезные результаты дает также исследование поля фильтрации с использованием метода индикаторов.

### 6.3.5.2. Изучение гравитационных процессов

Изучение гравитационных процессов осуществляется в несколько этапов. На первом этапе (схема использования реки, ТЭО) осуществляется общее обследование склонов долины и устанавливаются места, опасные в отношении развития гравитационных процессов, в первую очередь оползней и обвалов. Если имеются следы проявления процессов, определяется тип последних, параметры, формы проявления, стадия развития, устанавливается связь с морфологией и геологическим

строением склона, тектоническими нарушениями, трещиноватостью, гидрогеологическими условиями и другими природными факторами или антропогенными воздействиями. Большое внимание уделяется восстановлению истории формирования склона, что позволяет установить стадию и направление его развития и определить общую тенденцию развития геологических процессов: активизация, стабилизация, затухание. Следует подчеркнуть, что для составления инженерно-геологических прогнозов такой историко-геологический анализ имеет не меньшее значение, чем расчеты устойчивости склонов, выполненные методами механики грунтов или механики горных пород. Полученная информация используется вместе с другими геологическими данными для выбора наиболее благоприятных створов строительства отдельных гидроузлов, установления возможных типов и конструкций сооружений, их параметров, необходимого состава укрепительных и защитных мероприятий. На втором этапе (ТЭО, технический проект, рабочие чертежи) осуществляется изучение отдельных оползней, обвалов или проявлений других процессов с полнотой и детальностью, необходимой для выполнения расчетов на устойчивость, проектирования укрепительных и защитных мероприятий, составления обоснованных прогнозов на период строительства и эксплуатации сооружений. Наконец, на третьем этапе (рабочие чертежи, период строительства и эксплуатации сооружений) осуществляются стационарные наблюдения за развитием деформаций склонов и гравитационных процессов. Такие наблюдения особенно необходимы для склонов, непосредственно примыкающих к наиболее ответственным сооружениям — плотинам, зданиям ГЭС и др., где оползание или обрушение больших масс породы может привести к катастрофическим последствиям.

На первом этапе изучение гравитационных процессов входит в состав работ, выполняемых в процессе инженерно-геологических съемок среднего и крупного масштаба. Съемка сопровождается дешифрированием АФС и применением наземной фотограмметрии (фотоэодолитной съемки). Опыт показывает, что дешифрирование снимков является весьма эффективным методом изучения гравитационных процессов, поскольку они проявляются в очень характерных формах и уверенно опознаются на снимках крупного, среднего, а иногда и мелкого масштаба (в том числе и на КФС). Кроме того, по снимкам можно установить стадию развития процесса, степень современной его активности, определить необходимые параметры и пр. Одновременно дешифрирование позволяет получить данные о морфологии склонов, их геологическом строении, положении и характере тектонических нарушений, водопроявлениях, характере растительного покрова и пр., что позволяет осуществить дешифрирование геологических процессов в тесной увязке с различными факторами, определяющими их развитие.

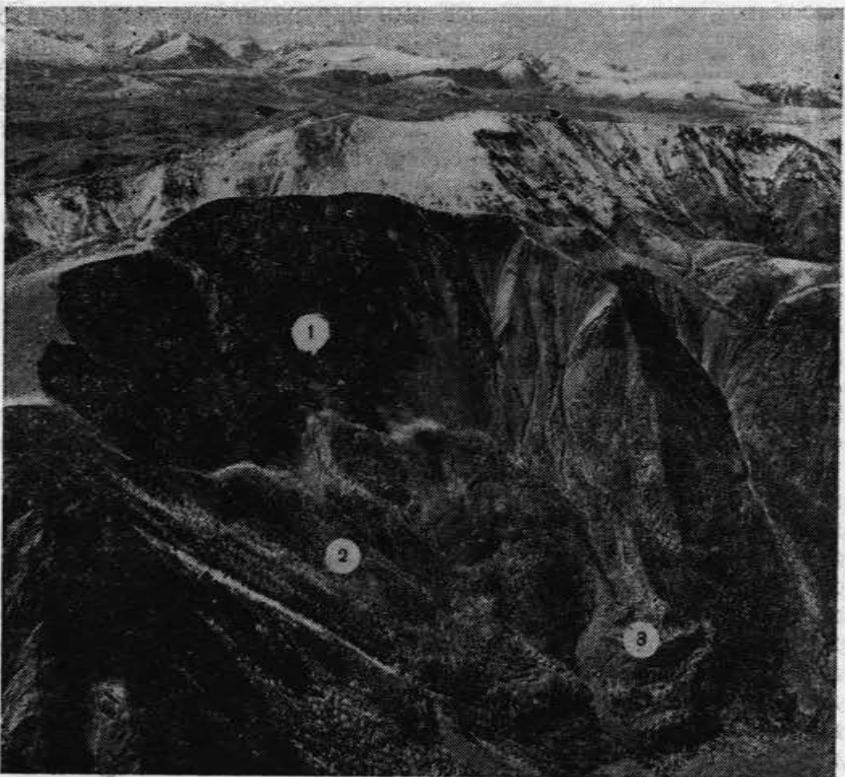


Рис. 6.23. Циркообразный блоковый оползень в метаморфических породах, осложненный вторичными оползнями глетчерного типа. Перспективный аэрофотоснимок.

1 — стена отрыва со скальными выступами, промоинами, лотками камнепадов и лавин, конусами осыпей; 2 — древнее оползневое тело, сильно деформированное и разбитое трещинами на отдельные блоки, поросшие лиственнично-кедровым лесом; 3 — тело вторичного оползня глетчерного типа

Оползни опознаются на АФС по характерным формам и другим особенностям изображения, позволяющим одновременно установить тип оползня согласно принятым в инженерной геологии классификациям. В качестве примера на рис. 6.23 приведен перспективный снимок блокового оползня в толще метаморфических пород, разбитых многочисленными разломами и трещинами, а на рис. 6.24 — плановый снимок оползня глетчерного типа, захватившего кору выветривания и покрывающие склоны щебенистые отложения. По аэроснимкам можно приблизенно установить возраст оползневых смещений. Свежие современные оползни выделяются на снимках по четким формам рельефа, светлому, нередко почти белому тону обнаженных поверхностей. С течением времени оползневые формы



Рис. 6.24. Большой оползень глетчерного типа, захвативший кору выветривания и склоновые отложения. Плановый аэроснимок.

А — область формирования; Б — область транзита; В — оползневое тело рельефа слаживаются, теряют резкость и оползень постепенно зарастает растительностью. Теряется и контрастность его изображения.

Известные трудности при дешифрировании оползней возникают в тех случаях, когда склоны сплошь залесены, а оползневые тела имеют небольшие размеры. В таких случаях признаком оползневых смещений может служить наличие «пьяного» леса, разреженный характер древостоя, но эти признаки хорошо видны только на снимках крупного масштаба. Оползни неуверенно дешифрируются также на крутых склонах, поскольку в этом случае они плохо выражены на плановых снимках. Здесь

большую помощь могут оказать аэровизуальные наблюдения, дополняемые выборочным перспективным фотографированием.

Для изучения динамики оползневого процесса можно использовать повторные съемки, выполненные с достаточно большим разрывом во времени и позволяющие установить все изменения, которые произошли на склоне за период между двумя съемками. Такие съемки могут дать полезную информацию для составления временных моделей прогнозов развития оползневых процессов.

Обвалы дешифрируются на АФС главным образом по прямым признакам — тону и структуре изображения. Свежие обвалы изображаются в виде светлых пятен с характерной зернистой структурой у подножья крутых обрывов. На снимках крупного масштаба различимы отдельные глыбы. С течением времени поверхность глыб выветривается, покрывается лишайниками, темнеет и контраст с окружающей местностью постепенно снижается. Появляется также кустарниковая и древесная растительность, и опознать обвал на АФС становится трудно. Скорость этого процесса зависит от климатических условий. В районах с гумидным климатом, судя по имеющимся данным, резкая контрастность изображения теряется уже через несколько лет, а полное его слияние с окружающим фоном происходит через 30—50 лет.

На аэроснимках хорошо дешифрируются также курумы, осыпи, солифлюкционные формы.

Дешифрирование аэроснимков дополняется применением фототеодолитной съемки, позволяющей осуществить картирование проявлений тех или иных геологических процессов с высокой степенью детальности. Одновременно на снимках определяется положение тектонических нарушений, крупных трещин, контактов между геологическими телами и других геологических явлений, могущих оказывать влияние на развитие этого процесса.

Большое значение имеет организация стационарных наблюдений за развитием геологических процессов, позволяющих, с одной стороны, проверить надежность сделанных прогнозов, а с другой — в случае наметившегося нарушения устойчивости склона своевременно принять меры по его закреплению. Виды наблюдений определяются характером, интенсивностью и масштабом проявления склоновых процессов, геологическим строением склонов, типом и расположением сооружения.

Основными задачами наблюдений за гравитационными склонами являются [«Инженерно-геологическое изучение...», 1969]: а) выявление изменений в морфологии и состоянии склона и потенциальных оползневых или обвальных массивов; б) изучение изменений напряженного состояния пород во времени в зонах возможных нарушений устойчивости склона; в) изучение микродеформаций склона, указывающих на возможность нарушения его устойчивости.

Первая из этих задач решается с помощью повторных обследований склона, выполняемых обычно с применением фототеодолитных съемок. Особое внимание уделяется выявлению новых трещин и измерению параметров существующих. Все отмеченные изменения наносятся на инженерно-геологическую карту склона и на дополняющие ее разрезы.

Наблюдения изменений напряженного состояния пород в зонах смещений или внутри оползневого обвально-оползневого блока можно проводить с помощью прижимных тензометров, устанавливаемых в забое и на стенках скважин, хотя этот метод дает только весьма приближенные данные. Датчики устанавливаются в 3—4 скважинах, равномерно распределенных по поверхности потенциально опасного блока.

Наблюдения за деформациями склонов и развитием оползневых или обвальных смещений осуществляются по повторным фототеодолитным снимкам, а также с помощью наблюдений за поверхностными и глубинными реперами. Последние обычно располагаются на нескольких поперечниках, пересекающих опасную часть склона. Большое значение имеют наблюдения за раскрытием трещин, для чего на них устанавливаются маяки из гипса, стекла и других хрупких материалов. Применяются также различные автоматические устройства, описание которых можно найти в специальной литературе [«Инженерно-геологическое изучение...», 1969 и др.].

Примером организации подобного рода наблюдений может служить Токтогульская ГЭС [Степанов и др., 1976], где они проводятся непрерывно с 1970 г. Для измерения горизонтальных деформаций используются штанговые деформографы с большой базой (до 25 м), с применением непрерывной фотопротической записи, для измерения вертикальных смещений — группы стационарно установленных гидростатических нивелиров с базой до 32 м и для фиксации наклонов — наклономеры конструкции В. Ф. Бончковского и А. Е. Островского. Все приборы обеспечивают высокую точность измерений. В результате наблюдений было установлено, что в скальных породах склонов развиваются пластические деформации, в результате которых происходит смещение пород в сторону открытой поверхности. Скорости смещения пород возрастают по мере приближения к дневной поверхности и на глубине 100—150 м практически затухают. Было изучено влияние на деформации слабых сейсмических воздействий, вызванных землетрясениями и взрывами.

#### 6.3.5.3. Изучение массивов мерзлых скальных пород

Основная трудность использования массивов мерзлых горных пород как основания сооружений связана с тем, что, будучи мерзлыми в процессе изысканий, строительства и эксплуатации сооружений, они оттаивают на ту или иную

глубину, что меняет их свойства и приводит к развитию ряда геологических процессов (тепловая усадка пород, нарушение устойчивости откосов и склонов), которые могут представлять опасность для этих сооружений. Поэтому от инженера-геолога, проводящего изыскания, требуется не только достаточно полное описание структуры, физического состояния и свойств массивов мерзлых скальных пород в естественном ненарушенном состоянии, но, что гораздо сложнее, составление достаточно надежного прогноза изменения всех этих характеристик в период строительства и эксплуатации сооружений.

Нарушение физического состояния и свойств массивов мерзлых скальных пород вызывается взаимодействием их не только со строящимися сооружениями, но и с многими природными факторами — солнечной радиацией, атмосферой, поверхностными водами и др. Вследствие этого здесь особенно отчетливо выступает необходимость изучения массивов пород в единой системе со всей окружающей средой. Решение задачи в такой широкой постановке требует привлечения к исследованиям методов многих научных дисциплин — геокриологии, метеорологии, теплофизики и др. От инженера-геолога требуется умение, не подменяя специалистов соответствующих отраслей знания, а в тесном контакте с ними, дать синтетическую оценку всего собранного материала под углом зрения прогноза изменения инженерно-геологических условий в процессе строительства и эксплуатации сооружений.

Физическое состояние массива мерзлых скальных пород определяется структурой, режимом и параметрами сформировавшихся в его пределах физических полей — напряжений и теплового. При изучении массивов мерзлых пород особенно большое значение имеет исследование теплового поля, режим которого характеризуется неустойчивостью, а влияние на свойства пород весьма велико. При решении практических задач тепловое поле может быть описано с достаточной полнотой таким параметром как температура. Поэтому температурные наблюдения составляют один из основных разделов изучения теплового режима мерзлых пород. Они выполняются как на поверхности земли, так и в специально оборудованных для этой цели скважинах с использованием различных термодатчиков — заленивленных термометров, термометров сопротивления, полупроводниковых и др. Для изучения пространственной структуры температурного поля точки наблюдения размещаются на площади с таким расчетом, чтобы были учтены все структурные особенности массива, различия в мощности и составе четвертичных отложений, характере почвенного и растительного покрова, экспозиции склонов и др. Поскольку надежные оценки температурного режима массива пород можно получить только в результате достаточно длительных наблюдений, организация режимной температурной сети начинается с момента выбора

створа, а сами наблюдения продолжаются в течение всего периода изысканий, строительства и эксплуатации сооружений (в последнем случае по специально разработанной для этой цели программе).

Как отмечалось в разделе 4.4, свойства мерзлых скальных пород зависят в большой степени от их трещиноватости и наличия в трещинах льда и льдонасыщенного заполнителя. В соответствии с этим при изучении массивов мерзлых скальных пород большое внимание уделяется изучению трещиноватости пород — степени раскрытия трещин, состава заполнителя, содержания в них льда и пр. Делаются необходимые измерения и вычисляются значения коэффициента трещинной пустотности. На основании анализа всех собранных материалов осуществляется структурная схематизация массива с выделением блоков пород, различающихся по степени трещиноватости и характеру заполнителя. Определение коэффициента трещинной пустотности и анализ других материалов позволяют дать также в первом приближении оценку «распущенности» массива в целом и отдельных его частей. Важное дополнение к этим исследованиям составляют методы полевой геофизики, и в первую очередь метод сейсмоакустики, позволяющий скорректировать составленную схему по такому важному показателю, как скорость распространения продольных и поперечных упругих волн [Воронков, Акатор, 1967; Горянин, Ляховицкий, 1979].

Самостоятельный раздел исследований составляет изучение свойств пород: физико-механических, теплофизических, фильтрационных. На ранних этапах исследований значения соответствующих показателей, необходимых для качественных оценок массива и выполнения предварительных расчетов, принимаются по аналогии с ранее изученными объектами, а также на основании общих теоретических соображений. При составлении ТЭО, технического проекта и рабочих чертежей осуществляются специальные полевые эксперименты. Большое внимание уделяется определению модуля деформации. Величина модуля общей деформации зависит в большой степени от того, определен ли он для мерзлых, оттаивающих в процессе эксперимента или талых пород; поэтому испытания выполняются по нескольким схемам, отвечающим различным условиям и стадиям работы основания под строящимся сооружением. Одновременно с полевыми опытами проводятся сейсмоакустические исследования, на основании которых вычисляются значения динамического модуля упругости, что дает возможность построить корреляционные зависимости между этими двумя характеристиками и в дальнейшем распространить данные штамповых испытаний на выделение в пределах массива структурных элементов (блоков пород).

Одной из наиболее сложных задач является оценка водопроницаемости пород при их оттаивании. Опыт показывает, что

в мерзлом состоянии трещиноватые скальные породы с трещинами, заполненными льдом, практически водонепроницаемы, но при оттаивании водопроницаемость их может быть весьма высокой, даже более высокой, чем у талых пород того же типа и состава. Для этой цели изучение водопроницаемости мерзлых пород осуществляется на отдельных типичных опытных участках после предварительного их оттаивания. Экстраполяция результатов измерений на массив осуществляется, как и в случае определения механических свойств талых пород, по данным сейсмоакустических исследований и детальных описаний трещиноватости.

### 6.3.6. Изучение неотектонических и сейсмических явлений. Оценка сейсмической опасности

#### 6.3.6.1. Общие положения

В Советском Союзе сейсмоопасные районы с сейсмичностью от 6 до 9 баллов по шкале MSK занимают площадь 6,4 млн. км<sup>2</sup>, что составляет 28,1 % территории страны. Из них 1,2 млн. км<sup>2</sup> (5,6 % площади) приходится на районы с сейсмичностью 8—9 баллов. Большинство из этих районов представляет собой горные сооружения с глубокими речными долинами, весьма благоприятными для строительства высоких плотин и крупных гидроузлов. Аварии таких сооружений недопустимы, так как прорывы водохранилищ могут вызвать многочисленные человеческие жертвы и громадный материальный ущерб; нежелательна, однако, и переоценка сейсмической опасности, поскольку она может повлечь за собой отказ от строительства важных в народнохозяйственном отношении объектов или перерасход средств на их возведение.

В Советском Союзе достигнуты в последние годы значительные успехи как в области оценки сейсмической опасности, так и в области разработки инженерных методов расчета сейсмостойких сооружений.

Оценка сейсмической опасности требует выполнения большого объема наблюдений и исследований в районе работ (изучение тектоники, геофизических полей, сейсмичности и пр.), а также учета большого числа топографических и геологических факторов на участке строительства, включая рельеф, структуру массивов горных пород, их обводненность, физико-механические свойства пород и др. Поэтому к решению этой задачи привлекаются наряду с сейсмологами также специалисты по многим другим отраслям геологической науки, в том числе по инженерной геологии, геофизике, геоморфологии, тектонике, гидрогеологии и др.

Землетрясения, происходящие ежегодно в различных районах СССР, связаны в основном с тектоническими процессами — смещениями блоков земной коры по существующим разломам, представляющим собой ослабленные поверхности. Смещения сопровождаются высвобождением больших количеств механической энергии, которая трансформируется в упругие волны, распространяющиеся во все стороны от очага землетрясения. Волны вызывают колебания дневной поверхности, являющиеся основной причиной деформаций и разрушений зданий и сооружений.

В применяемых моделях очаг землетрясения часто рассматривается как точечный, но фактически он представляет собой при сильных землетрясениях поверхность смещения значительных размеров (до многих километров, а иногда и десятков километров по простиранию и падению), осложненную шероховатостями разных размеров и системой оперяющих нарушений.

Землетрясения различаются по силе. Естественной и объективной мерой силы землетрясения могло бы служить количество высвобождаемой энергии, но она не поддается непосредственному измерению. По этой причине для оценки силы землетрясения используют специальную величину — магнитуду, которая соответствует логарифму максимальной амплитуды объемных или поверхностных волн и связана с количеством высвобождаемой энергии приближенным соотношением [Рихтер, 1963]:

$$\log_{10} E = 11,4 + 1,5M. \quad (6.8)$$

Другие исследователи принимают несколько иные значения входящих в уравнение коэффициентов, но все они находятся в пределах допустимой ошибки определения этой величины. В СССР используется также энергетическая шкала землетрясений. Под энергетическим классом землетрясения понимается десятичный логарифм энергии сейсмических волн, выраженный в джоулях.

К важным показателям силы землетрясения относится также сейсмический момент, вычисляемый по уравнению:

$$M_0 = L_1 L_2 G D, \quad (6.9)$$

где  $L_1$  — длина тектонического нарушения в пределах очага,  $L_2$  — его ширина,  $G$  — модуль сдвига,  $D$  — средняя величина смещения. Сейсмический момент может быть приближенно определен по величине магнитуды, с которой он связан корреляционной зависимостью, и дает возможность оценить при некоторых предпосылках размеры очага землетрясения и величину смещения по разлому.

Сильные землетрясения, как правило, сопровождаются последовательностью более слабых землетрясений — афтершоков, число и сила которых постепенно убывают со временем. В большинстве случаев они связаны со смещениями по дислокациям, оперяющим главный разлом.

Магнитуда или энергетический класс землетрясения являются характеристикой землетрясения «в очаге», для оценки же разрушительности землетрясения, т. е. его проявлений на поверхности земли, используется другой показатель — интенсивность, определяемая по личным впечатлениям наблюдателей и на основании анализа последствий землетрясения — деформаций зданий и сооружений, а также поверхности земли. Деформации земной поверхности учитываются в первую очередь в малообжитых районах, где число сооружений недостаточно для составления надежных статистических выводов.

Как видно из сказанного, интенсивность, строго говоря, не является параметром землетрясения, а представляет собой условную характеристику, отражающую степень воздействия землетрясения на инженерные сооружения и дневную поверхность в точке, отстоящей на некоторое расстояние от эпицентра землетрясения. Масштабы и характер наблюдающихся повреждений позволяют осуществить ранжирование землетрясений по степени интенсивности и построить на этой основе специальные (макросейсмические) шкалы.

В настоящее время за рубежом широко используется модифицированная 12-балльная шкала Меркали (MM), в СССР с 1964 г. — международная шкала MSK-164. Она обладает тем важным преимуществом, что в ней учитываются раздельно деформации зданий разных типов и одновременно относительное число поврежденных зданий, что позволяет повысить точность и надежность получаемых оценок. Тем не менее определение интенсивностей всегда до известной степени условно, так как содержит некоторый элемент субъективности. Кроме того, трудно учесть такие факторы, как качество применяемых строительных материалов или строительных работ, влияние применения различных конструктивных мероприятий, повышающих жесткость сооружений, и др. Это может привести к различиям в оценках интенсивности землетрясений, сделанных двумя в равной степени компетентными специалистами, до 1 балла. В малообжитых районах, а также там, где применяются здания и сооружения нестандартных типов, оценить интенсивность можно только весьма приближенно. При оценке сейсмической опасности интервал интенсивности от 1 до 5 баллов не учитывается. По мнению многих специалистов, принятый принцип построения шкалы интенсивности, основанный на макросейсмических наблюдениях, не отвечает в полной мере требованиям проектирования сооружений и современным техническим возможностям и должен в перспективе уступить место более надежному количественному подходу, основанному на использовании инструментальных записей землетрясений.

К числу количественных характеристик, получаемых путем обработки инструментальных записей землетрясений, относятся максимальные ускорения, скорости, амплитуды и др., измерение

которых стало возможно после внедрения в практику сейсмометрических наблюдений приборов, регистрирующих сильные землетрясения. Они конструируются в большинстве случаев как акселерометры, т. е. рассчитаны на регистрацию ускорений реакции прибора на упругие колебания; прочие характеристики (скорости, смещения) можно получить путем интегрирования. Для инженерных целей большое значение имеют спектр колебаний и их длительность, которые также можно установить по полученной записи. Количественные характеристики интенсивности используются при проектировании сооружений.

Максимальной величины интенсивность достигает в эпицентре землетрясения или вблизи от эпицентра, если в сильной степени оказывается влияние геологической обстановки. Величина максимальной интенсивности  $I_{\max}$  зависит от магнитуды или энергетического класса землетрясения, сейсмического момента, глубины очага, рельефа, грунтовых условий, геоструктурных особенностей территории и некоторых других факторов. При оценке сейсмичности в явном виде обычно учитываются только две первые характеристики в форме линейной функции следующего вида:

$$I_{\max} = c_1 M - c_2 \log h + c_3, \quad (6.10)$$

где  $M$  — магнитуда,  $h$  — глубина очага,  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  — региональные коэффициенты. Для территории СССР Н. В. Шебалин [1968] получил на основании обработки большого объема наблюдений следующие средние значения этих коэффициентов:  $c_1 = 1,5$ ;  $c_2 = 3,5$ ;  $c_3 = 3,0$ .

С удалением от эпицентра интенсивность землетрясения снижается, что зависит в большой степени от физических свойств волнопроводящих путей, т. е. от особенностей геологического строения территории, поэтому соответствующие закономерности обычно выражают в форме регрессионных уравнений, связывающих интенсивность с гипоцентрическим расстоянием  $R$  и содержащих некоторое число региональных параметров.

Пользуясь такими формулами, можно построить в изолиниях карту равных интенсивностей землетрясений для изучаемой территории. Поскольку очаги землетрясений имеют форму разломов различной протяженности и, кроме того, оказывается анизотропия затухания волн вкрест и по простианию геологических структур, изосейсты получают форму эллипсов различной степени вытянутости.

### 6.3.6.2. Установление сейсмической опасности

Термином сейсмическая опасность, или сейсмический риск (последний термин широко используется в зарубежной литературе), принято обозначать опасность повреждения

зданий и сооружений в результате воздействия на них землетрясений. Причиной повреждений могут явиться смещения поверхности земли по разломам, часто наблюдающиеся в плейстоценовой зоне, но главным образом колебания поверхности земли, которые могут представлять опасность для сооружений при сильных сейсмических толчках даже на значительном удалении от эпицентра землетрясений.

Установление сейсмической опасности представляет собой проблему оптимизации, которая решается с учетом технико-экономических, а также социальных факторов, поскольку разрушение сооружений может быть связано с человеческими жертвами. Последнее обстоятельство особенно важно при строительстве гидротехнических сооружений, так как разрушение плотин и прорыв водохранилищ могут иметь катастрофические последствия. Оценка сейсмической опасности территории осуществляется в несколько этапов, а получаемая информация оформляется в виде карт сейсмического районирования — простой и удобной в практическом применении сейсмической модели местности. Масштаб и содержание карты определяются задачами, на решение которых они рассчитаны. Обычно по степени детальности они подразделяются на три группы: обзорного районирования, детального и микрорайонирования.

Карты обзорного сейсмического районирования рассчитаны на все виды хозяйственного и инженерного освоения территорий. Набор таких карт для отдельных регионов СССР в масштабе 1:5 000 000 прилагается к действующим строительным нормам и правилам (СНиП II-A-12—69, часть II, глава 12). На картах выделены зоны, различающиеся по максимальной сейсмической интенсивности. В основу карт положены данные сейсмостатистики; это означает, что в зоны с равной сейсмичностью объединены площади, в пределах которых наблюдались землетрясения с одинаковой максимальной интенсивностью. Некоторые соображения об эффективности такого подхода к составлению карт и степени их достоверности высказаны ниже. Карты обзорного районирования используются для решения вопросов, связанных с общим планированием инженерных или хозяйственных мероприятий. Для проектирования сооружений они мало пригодны, так как выделяемые на них площади характеризуются значительной неоднородностью по геологическому строению и другим параметрам, которые определяют сейсмический эффект землетрясений. Поэтому при проектировании гидроузлов требуется существенное уточнение этих карт в процессе детального сейсмического районирования. Оно выполняется в масштабах 1:100 000—1:200 000 и охватывает территорию примерно в радиусе 100 км от проектируемого сооружения.

Детальное районирование позволяет выделить районы, отличающиеся по степени сейсмической опасности, и на этой

основе выбрать участок, благоприятный для строительства комплекса сооружений, определить рациональный тип сооружений, их параметры и решить другие вопросы, рассматриваемые на ранних стадиях проектирования (схема, ТЭО).

При составлении технического проекта необходимо располагать расчетными сейсмическими параметрами для проектирования отдельных сооружений. Для этого осуществляется сейсмическое микрорайонирование в масштабах 1:10 000—1:5 000, охватывающее площадь радиусом около 10 км.

В отличие от аналогичной задачи, решаемой при промышленном и гражданском строительстве, когда учитываются влияние на сейсмический эффект свойств рыхлых отложений и глубины залегания грунтовых вод, при гидротехническом строительстве приходится учитывать значительно более широкий спектр структурно-тектонических, инженерно-геологических, топографических и геофизических характеристик и, кроме того, такие факторы, как нагрузки от сооружений и водохранилища, которые сами по себе могут способствовать возникновению землетрясений. Сейсмическое микрорайонирование обычно выполняется в комплексе с инженерно-геологическими исследованиями, а соответствующие карты строятся на базе геоструктурных, геоморфологических, инженерно-геологических и гидрогеологических карт, составляемых в крупном масштабе для участка строительства.

**Выявление сейсмоопасных зон и структур, определение эпицентров ожидаемых землетрясений и их параметров.** В современной практике для решения перечисленных задач применяется широкий комплекс методов, включающий: а) данные инструментальных и макросейсмических наблюдений; б) использование исторических сведений; в) палеосейсмогеологические исследования; г) геолого-структурные, геоморфологические и другие виды исследований.

Инструментальные наблюдения за землетрясениями выполняются государственными сейсмостанциями. Результаты наблюдений сведены в каталоги. Они служат наиболее надежным материалом для составления сейсмологических прогнозов. Однако продолжительность наблюдений (десятки лет) пока гораздо меньше, чем повторяемость сильных землетрясений. Данные о землетрясениях в Китае, Турции и в СССР (по Кавказу) за 2—3 тыс. лет показывают, что повторяемость сильных землетрясений в пределах одной сейсмогенерирующей структуры варьирует от нескольких десятков до многих сотен лет, а иногда и более [«Seismic risk...», 1976]. Часто наблюдается смена периодов повышенной сейсмической активности длительными периодами покоя, продолжающимися столетиями. Это указывает на то, как осторожно следует относиться к экстраполяции сравнительно кратковременных наблюдений даже на довольно близкое будущее.

Данные инструментальных наблюдений дополняются макросейсмическими наблюдениями, которые отличаются тем же недостатком — малой продолжительностью. Поэтому карты сейсмического прогноза, составляемые только на основе инструментальных и макросейсмических наблюдений, обладают невысокой надежностью. Это выявилось, в частности, при анализе карт сейсмического районирования СССР, составленных по описанному принципу и прилагаемых к действующим СНиПам (см. выше): оказалось, что из 19 сильных землетрясений, произошедших в Советском Союзе с 1954 г., 17 были приурочены к местам, которые характеризовались на картах значительно более низкой балльностью [Губин, 1978]. К числу таких «неожиданных» землетрясений относится, например, 8-балльное землетрясение, произошедшее в 1973 г. близ стройплощадки Зейской ГЭС, тогда как на картах ранее эта местность была отнесена к 5-балльной зоне.

Чтобы расширить период наблюдений, используются сведения о землетрясениях в исторических документах (хрониках, летописях и пр.) и литературных произведениях. Однако, во-первых, сильные землетрясения могли произойти в малообжитых районах и не привлечь внимания современников, а во-вторых, не все исторические документы сохранились. Тем не менее, для некоторых районов СССР, где развитие цивилизации происходило в течение многих веков и даже тысячелетий (Кавказ, Средняя Азия), подобные сведения могут иметь большую ценность. Менее эффективно использование исторических данных для анализа сейсмичности Севера и Северо-Востока СССР, где исторические данные практически отсутствуют. Ценные данные могут быть получены и при археологических раскопках — известны случаи обнаружения городов, погибших от катастрофических землетрясений.

Еще больше расширяет рамки времени использование палеосейсмогеологического метода, развиваемого в СССР в трудах Н. А. Флоренсова, В. П. Солоненко и др. Метод основан на выявлении остаточных деформаций земной поверхности, генетически связанных с землетрясениями, по величине, типу и положению которых можно приближенно судить о месте, интенсивности и времени землетрясения в данном районе в сравнительно недавнем геологическом прошлом. Эффективность такого подхода подтверждена обследованием плейстоценовых зон многих сильных современных землетрясений в СССР, США, Турции, Японии и Китае, которое показало, что абсолютное большинство коровых землетрясений сопровождается смещениями земной поверхности по разломам.

Следует, однако, учитывать, что масштаб сейсмодислокаций зависит не только от магнитуды землетрясений, но и от глубины и механизма очага, геологического строения территории и других причин, вследствие чего он может быть различным

для землетрясений с одинаковой энергией, что надо учитывать при ретроспективных прогнозах силы землетрясений. В. П. Солоненко [1976] предложил подразделять палеодислокации на три группы: а) сейсмотектонические, представляющие собой смещения блоков горных пород по сейсмогенерирующими разломам; б) сейсмогравитационные — оползни и обвалы, вызванные или спровоцированные землетрясениями и в) гравитационно-сейсмотектонические — обвалы, провалы и другие гравитационные смещения, происходящие непосредственно по активизировавшимся разломам.

Для изучения землетрясений наиболее важны сейсмотектонические палеодислокации — их характер, протяженность, амплитуда, по которым можно судить приближенно об интенсивности землетрясений. К сожалению, не всегда легко отличить дислокацию, вызванную землетрясением, от дислокаций, произошедших в результате крипа или гравитационных процессов. Примером трудностей, связанных с выделением палеосеймодислокаций, могут служить работы, выполненные на участке строительства Рогунской ГЭС на р. Вахш. В верхнем бьефе гидроузла на протяжении 12 км были выявлены голоценовые или современные дислокации надвигового или сдвигового типов [Леонов, Стром, 1979]. Дислокации выражены уступами в пролювиальных отложениях длиной до 1000 м и высотой до 10 м, отстоящими от выходов коренных пород на 50—100 м. Фронтальные части уступов разбиты мелкими разрывами, однако детали внутреннего строения на поверхности не проявлены. Амплитуда перемещений по дислокациям достигает 20 м. Если предположить, что все они образовались одновременно, то это может свидетельствовать о землетрясении силой до 11 баллов. Но если каждая дислокация отвечает отдельному толчку, то вероятна серия неглубоких землетрясений силой 9 баллов. И, наконец, аналогичные образования могли возникнуть вследствие крипа по активному разлому без сейсмического воздействия. Единственно, о чем можно уверенно говорить, это о высокой новейшей и современной тектонической активности Вахшского разлома. Наиболее вероятно, в данном случае, развитие крипа, хотя не исключается полностью сейсмическое происхождение дислокаций.

Еще менее надежны выводы о сейсмической активности, сделанные на основании анализа оползней и обвалов, рассматриваемых в качестве палеосейсмогравитационных дислокаций. Во-первых, в горах гравитационные смещения происходят зачастую без сейсмических воздействий (например, оползень у с. Айни на р. Зеравшан); во-вторых, по объему и распространению гравитационных смещений нельзя однозначно судить об интенсивности землетрясения, так как основную роль здесь играют геологогеоморфологические условия в эпицентralной области. Например, в районе Рогунской ГЭС оползневые и обвальные

образования распространены достаточно широко. Наиболее крупный оползень коренных пород расположен в нижнем бьефе гидроузла на правом берегу Вахша. Глубокий врез долины, наличие в разрезе гипсов, сильная дислоцированность и раздробленность пород позволяют считать, что он мог образоваться и без сейсмического воздействия или при умеренном локальном землетрясении.

Более надежным индикатором являются гравитационно-сейсмотектонические дислокации, образующиеся при прохождении через массив пород сейсмических волн. За счет гравитационной составляющей амплитуда вертикальных смещений по образовавшимся разрывам может на 1–2 порядка превышать максимально возможную амплитуду перемещения по сейсмотектоническим дислокациям. В районе той же Рогунской ГЭС был обследован ряд дислокаций в Вахшском хребте. Одна из них представляет «зачаточный» скальный оползень, охвативший участок склона длиной до 700 м и мощностью до 300 м. В теле оползня обнаружен микротрабен шириной 3–5 м, заполненный обломками известняков, слагающих массив. Подобное нарушение не могло образоваться иначе как в результате воздействия сейсмических волн. Вторая дислокация представляет собой нагорный грабен-провал длиной до 1,5 км и шириной до 400 м. Линейные размеры дислокации соответствуют землетрясению силой 8–9 баллов.

К недостаткам палеосейсмогеологического метода следует отнести также то обстоятельство, что отсутствие палеосейсмодислокаций не может служить надежным признаком асейсмичности территории, так как они могли быть уничтожены процессами денудации или погребены под более молодыми образованиями. Но наиболее сложной задачей и, вероятно, самым слабым местом палеосейсмологического метода является определение возраста дислокаций. Для этой цели используются в основном геоморфологические наблюдения и определение абсолютного возраста растительных остатков, погребенных в зоне разлома. Однако при использовании рельефа в качестве индикатора сейсмической активности необходимо помнить, что никогда нельзя быть уверенным в том, что участок, характеризовавшийся тектонической и сейсмической активностью сотни тысяч или миллионы лет назад, сохранил эти качества до наших дней. Может иметь место и обратная картина — резкое усиление сейсмической активности на участках, которые ранее находились в состоянии тектонического покоя и не приобрели еще соответствующий геоморфологический облик. Поэтому сильные землетрясения происходят иногда на равнинах, удаленных от горных хребтов, как это имело место, например, за последние годы в Кызыл-Кумах. Определения возраста растительных остатков пока единичны. И тем не менее палеосейсмогеологический метод может в благоприятных случаях повысить надеж-

ность прогнозов, сделанных на основании кратковременных наблюдений и исторических данных.

Большое значение имеют геологические методы, применение которых основано на предположении, что землетрясения, будучи одним из видов геологических явлений, должны возникать в земной коре, подчиняясь общим геологическим закономерностям. В силу этого они должны быть связаны с другими геологическими явлениями, и эта связь может выявить геологические критерии для оценки сейсмической опасности территории. Наиболее важные геологические критерии сводятся к следующему.

1. На земном шаре выделено несколько типов структурных зон, в пределах которых сосредоточено абсолютное большинство землетрясений: а) краевые зоны континентов (Камчатка, Курильская гряда); б) омоложенные древние или молодые горные системы (Карпаты, Горный Крым, Кавказ, Копет-Даг, Памир и Тянь-Шань); в) рифтовые зоны в пределах древних платформ (Байкал и соседние тектонические впадины). В пределах этих зон могут быть выделены участки с различной степенью сейсмичности.

2. Возникновение землетрясений связано со смещениями по существующим тектоническим разломам, главным образом наиболее крупным, представляющим собой глубинные тектонические швы. Это подтверждается статистическими данными. Так, в провинциях Китая Юннань и Шэхвань, где имеются исторические данные о землетрясениях за 3000 лет (более  $\frac{1}{4}$  голоцен), с большими активными разломами связано 61 % землетрясений силой 7 баллов, 80 % — силой 8 баллов и 100 % — силой 9 и 10 баллов. В Калифорнии основная часть землетрясений связана с системой разломов Сан-Андреас; в Турции разрушительные землетрясения приурочены к Северо-Анатолийскому разлому [«Seismic risk...», 1976] и т. д. Вместе с тем, имеются данные и иного характера: например, в Японии выявлены два глубинных разлома, в том числе Срединная Линия, прослеживающаяся на 600 км. Однако ни одно из сильных землетрясений за последние 2000 лет не было приурочено к этой дислокации, а все они были связаны с мелкими тектоническими нарушениями. Все это вместе взятое заставляет относиться с большой осторожностью ко всем разломам, независимо от их величины, если по ним имеются следы недавних подвижек.

3. Сейсмичность и новейшие тектонические движения должны рассматриваться как проявления новейшего тектогенеза, и районы со следами активных тектонических движений следует считать опасными в сейсмическом отношении. Такие признаки, как значительные по величине амплитуды и градиенты новейший тектонических движений, контрастность движений, свидетельства перестройки тектонического плана в неоген-четвертичное время и др., могут служить одновременно указанием на

повышенную сейсмичность соответствующих районов. Однако прямого соответствия между этими явлениями нет, так как медленные тектонические подвижки (в том числе и в форме крипа по существующим разломам) нередко приводят к уменьшению тектонических напряжений в земной коре и не увеличивают, а, наоборот, снижают опасность сильных землетрясений.

4. Сильные землетрясения сопровождаются разрядкой тектонических напряжений на значительных площадях. Поэтому районы, где в недавнем прошлом были отмечены сильные землетрясения, следует считать в сейсмическом отношении менее опасными, чем районы с активными разломами, где сейсмические толчки не наблюдались длительное время, так как именно здесь могли накопиться мощные тектонические напряжения. Конечно, этот вывод можно распространить только на «период повторяемости», длительность которого может изменяться от нескольких десятков до нескольких сотен лет (обычно ее можно уточнить по наблюдениям в конкретном районе). Кроме того, нужно иметь в виду, что период повторяемости устанавливается «в среднем» и не исключает отдельных флюктуаций сейсмической активности, в том числе и повторений сильных землетрясений через небольшие промежутки времени, как это имело место, например, в Газли, где одно за другим произошли два сильных землетрясения. Таким образом, произошедшее землетрясение хотя и снижает вероятность нового сильного сейсмического толчка, но его нельзя считать гарантой сейсмического покоя даже на ближайшие годы. Наиболее же опасными участками в отношении возможного возникновения землетрясений следует, по-видимому, считать так называемые «сейсмические бреши», — промежутки между участками активных разломов, характеризовавшимися в недавнем прошлом сильными землетрясениями.

Большой шаг в направлении разработки эффективных методов оценки сейсмоопасности территорий был сделан в Советском Союзе И. Е. Губиным [1978], которым был разработан в 40—50-х годах сейсмотектонический метод, основанный на комплексном использовании сейсмологических и структурно-тектонических данных. Позднее были сделаны попытки привлечь в эту область некоторые количественные методы прогноза, основанные на математической теории опознавания образов, регрессионном анализе и некоторых других разделах математики. В качестве предсказывающих признаков использовались данные о сейсмической активности территории, градиенты физических полей, глубины до характерных поверхностей, граничные и средние скорости сейсмических волн и др. Это позволило составить многомерные регрессионные зависимости для  $k_{\max}$  (Ю. В. Ризниченко, Е. А. Джигладзе) или составить программы для определения обобщенного синтетического параметра, оценивающего степень сейсмичности территории (Ш. А. Губерман, А. А. Бори-

сов, Г. И. Рейнер и др.). Однако такой чисто формальный подход не принес ожидаемых результатов, что объясняется, с одной стороны, множественностью геологических ситуаций, при которых происходят землетрясения, что затрудняет экстраполяцию полученных зависимостей на другие регионы, а с другой — трудностью формального представления многих геологических (структурно-тектонических) характеристик, которые могут иметь решающее значение для прогноза землетрясений. В связи с этим применение формальных методов можно пока рассматривать только как полезное дополнение к комплексному сейсмологическому и структурно-тектоническому анализу.

Наиболее последовательное воплощение идеи комплексного анализа при оценке сейсмической опасности территорий нашли в работах советских специалистов по Балканскому региону [«Earthquake...», 1976]. Для этой цели был проведен в первую очередь анализ всех факторов, которые могут оказать влияние на сейсмическую активность территории, что нашло отражение в составлении 17 аналитических карт. В число карт входили историко-тектоническая, неотектонических движений, главных геологических линеаментов, мощности активного слоя, накопленных магнитуд и др.

Следующий шаг при определении возможного воздействия землетрясения на инженерные сооружения заключается в составлении карты сотрясаемости территории. Под сотрясаемостью  $B_I$  принято понимать частоту повторения в данной точке земной поверхности сотрясений  $B$  определенной интенсивности  $I$ , которая выражается в баллах макросейсмической шкалы MSK-64, принятой в СССР. Символически это записывается следующим образом:

$$B_I = B(I). \quad (6.11)$$

Обратная величина

$$T = T(I) = \frac{1}{B(I)} \quad (6.12)$$

получила название периода повторяемости.

Для проектирования гидротехнических и других инженерных сооружений наибольшее значение имеет сотрясаемость, отвечающая максимально возможному для данного района значению интенсивности, т. е.  $B_{I_{\max}}$ .

Для определения  $B_I$  устанавливается в первую очередь повторяемость  $N$  землетрясений с разной магнитудой, для чего используется график повторяемости, впервые построенный Гутенбергом и Рихтером [Gutenberg, Richter, 1954] на основании статистической обработки данных о землетрясениях по

всему земному шару. Оказалось, что с ростом магнитуды число землетрясений быстро убывает, и эта закономерность может быть достаточно надежно описана уравнением:

$$N = \alpha e^{-\beta M}, \quad (6.13)$$

где  $N$  — среднее число землетрясений на единицу площади (обычно принимается  $10\,000 \text{ км}^2$ ) за время  $t$  (1 год),  $M$  — их магнитуда,  $\alpha$ ,  $\beta$  — коэффициенты.

Последующие исследования показали, что величина коэффициента  $\alpha$  изменяется в широких пределах, а коэффициент  $\beta$  сохраняет известное постоянство.

Практическое значение приведенного уравнения заключается в том, что оно позволяет установить повторяемость сильных землетрясений, данные о которых отсутствуют или нёмногочисленны, по повторяемости слабых землетрясений, данные о которых имеются по любому региону.

Выше мы изложили основные идеи комплексного геолого-сейсмологического подхода к проблеме детального сейсмического районирования и в общих чертах — последовательность решения этой сложной задачи. Что касается методических аспектов практической реализации этих идей, то с ними лучше всего ознакомиться по специальной литературе и уже упоминавшейся выше работе по районированию Балканского региона [«Earthquake...», 1976]. Здесь же мы ограничимся весьма кратким изложением этих вопросов.

Как следует из сказанного выше, одна из основных задач при осуществлении сейсмического районирования территории заключается в изучении новейшей тектоники и в первую очередь — в выявлении активных тектонических нарушений, которые могут сыграть роль сейсмогенерирующих структур. Для этой цели выполняются комплексные исследования, включающие дешифрирование КФС и АФС, наземные исследования и точные инструментальные наблюдения.

Дешифрирование КФС и АФС позволяет составить детальные геоморфологические карты, которые могут послужить надежной основой для составления карты новейших движений. Дешифрирование позволяет также достаточно уверенно выявить положение крупных разрывных нарушений, в том числе активных, по которым происходили перемещения в неоген-четвертичное время. Наиболее характерными признаками активных разломов могут служить плановые смещения различных форм рельефа по линиям тектонических нарушений (рис. 6.25), наличие слабо измененных линейных образований (уступов, ложбин, обрывов и т. д.), наличие крупных трещин в покрове четвертичных отложений и пр. По характеру и масштабу деформаций можно приблизенно оценить интенсивность произошедших в районе землетрясений.

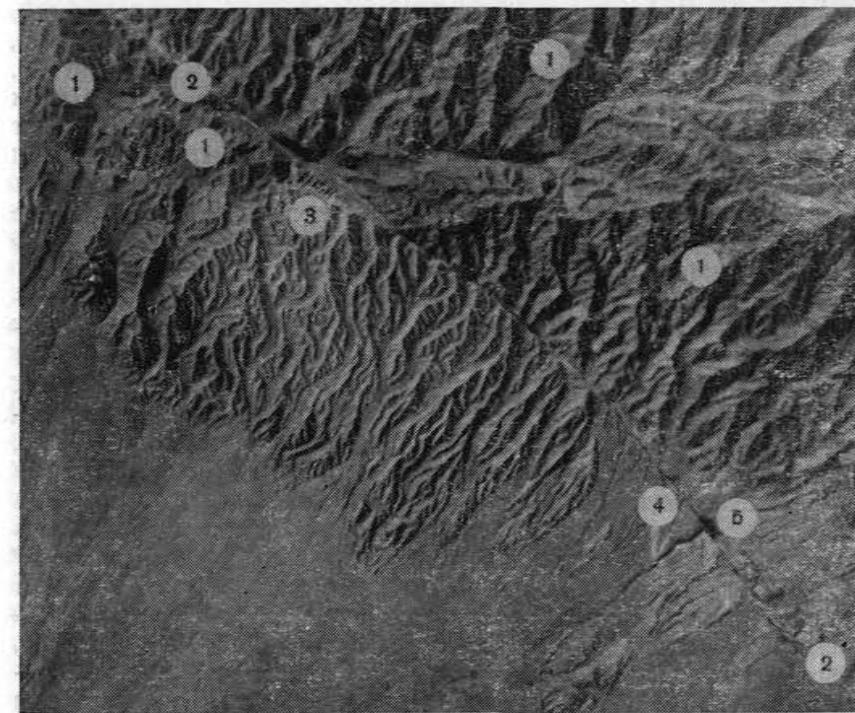


Рис. 6.25. Разлом четвертичного возраста. Отчетливо видно смещение ложбин и разделяющих их гребней на расстояние до 150 м. Плановый среднемасштабный аэроснимок (материалы объединения «Аэрогеология»).

1 — расчлененная поверхность низкогорья, сложенный сланцами нижнего палеозоя; 2 — разлом; 3 — древние пролювиальные отложения; 4 — голоценовые пролювиальные отложения; 5 — родник

При наземных обследованиях для выявления новейших тектонических движений проводится выделение и картирование фрагментов различных геоморфологических поверхностей (террас, поверхностей выравнивания и др.), изучение формы, крутизны и строения склонов речных долин, определение мощности и состава покрывающих их отложений, изучение продольного профиля рек, ручьев и временных водотоков, установление мощности и состава аллювиальных отложений и др. Подробно изучаются также все формы, которые были выделены при дешифрировании космических снимков и аэроснимков. Большое внимание уделяется непосредственному изучению разломов и оперяющих тектонических трещин, что в сочетании с данными дешифрирования позволяет установить кинематический тип нарушений, их параметры, а в благоприятных случаях также абсолютный или относительный возраст (по

возрасту наиболее молодых нарушенных разломом отложений, абсолютному возрасту погребенных растительных остатков, наличию свежих зеркал скольжения в рыхлом заполнителе, следам разрывов новообразований в трещинах-сместиелях и пр.). Иногда полезные сведения о недавних подвижках дает осмотр сооружений, пересекающих разлом,— дорог, каменных изгородей, подпорных стенок, туннелей, заброшенных горных выработок и др., но нельзя упускать из поля зрения и другие возможные причины таких нарушений, как, например, развитие гравитационных процессов.

В последние годы для выявления «активных» тектонических разломов успешно применяется эманационная (торон-родоновая) съемка [Горбушин, Рябоштан, 1975]. Метод основан на характерном феномене — появление радиоактивных газовых аномалий на участке активного проявления современных геологических процессов (естественных и техногенных), связанных с трещинообразованием или перемещением блоков пород по существующим разрывам сплошности. Аномалии выявляются с помощью газовой съемки — отбора проб воздуха из пород с глубины 0,8 м или глубже и определения в них концентрации эманаций. Благодаря своей простоте метод может найти применение в любой природной обстановке. В настоящее время метод широко внедрен в практику работ в Донбассе, где с его помощью обнаруживают и прослеживают зоны современных тектонических и техногенных движений, опасных для строительства сооружений. Примеры успешного применения этого метода для выявления активных тектонических зон можно найти в упомянутой выше книге, но следует учитывать, что в районе строительства газовые аномалии могут быть связаны и с явлениями техногенного характера.

Изложенная методика позволяет установить с определенной степенью надежности максимальную интенсивность землетрясений в любой точке территории и повторяемость землетрясений данной интенсивности. Однако полученная интенсивность отвечает некоторым «средним» грунтам и простым топографическим условиям, т. е. не учитывает ни особенностей инженерно-геологических условий строительной площадки, ни сложной морфологии долины в месте строительства гидротехнических сооружений. В то же время эти два фактора могут внести в полученные оценки весьма существенные коррективы. Поэтому следующий шаг в оценке сейсмической опасности строительства сооружений заключается в оценке влияния на сейсмические эффекты местной инженерно-геологической и топографической обстановки, что является задачей сейсмического микрорайонирования.

При сейсмологических исследованиях за «средний», точнее эталонный, грунт обычно принимают монолитные граниты, относительно которых и рассчитывается приращение интенсив-

ности, для чего можно использовать формулу, предложенную еще в начале 60-х годов С. В. Медведевым:

$$\Delta I = 1,67 \cdot \log \frac{V_0 \rho_0}{V_i \rho_i}, \quad (6.14)$$

где  $V_0$  и  $V_i$  — скорости продольных волн, а  $\rho_0$  и  $\rho_i$  — плотности сопоставляемых пород.

Согласно этой формуле приращение сейсмической интенсивности составляет: для скальных осадочных, метаморфических и изверженных пород 0,1—0,8, для полускальных 0,7—1, для рыхлых 2—2,5. На эти цифры можно ориентироваться при строительстве сооружений на горизонтально залегающих толщах в условиях спокойного рельефа. В условиях сложной тектоники и морфологии картина может быть существенно иной. Отмечены, например, случаи, когда интенсивность землетрясений на скальных породах была существенно выше, чем на рыхлых [Крамынин, Чернов, Штейнберг, 1973]. Заметное влияние на проявление сейсмичности оказывает также степень сохранности пород (выветрелость, трещиноватость). Это может вызвать повышение интенсивности землетрясений на 0,2—1 балл. Некоторое влияние, хотя и более слабое, чем в рыхлых породах, оказывает обводненность, которая также повышает сейсмическую балльность.

Поскольку высокие плотины возводятся в большинстве случаев в глубоко врезанных долинах, существенное влияние на интенсивность землетрясений оказывает рельеф: высота, форма и крутизна склонов. Как показали наблюдения на участках строительства Токтогульской, Папанской и Чиркейской ГЭС [«Сейсмическое микрорайонирование», 1977], в верхней части склонов отмечалось увеличение амплитуды колебаний по сравнению с дном долины в 2—3 раза, что отвечает примерно 1 баллу. Сказались также крутизна и форма склонов.

Большое значение имеют структурно-геологические особенности строения речной долины: последовательность напластования пород, обладающих различной акустической жесткостью, условия их залегания, наличие разломов, крупных тектонических трещин и пр. При сложном геологическом строении долины развитие явлений дифракции, рефракции и интерференции волн приводит к чрезвычайному усложнению волновой картины с резкими местными изменениями динамических характеристик. Особенно большое значение это имеет при небольшом расстоянии между плотиной и эпицентром землетрясения. Существенно сказывается также направление подхода сейсмических волн.

Детальные исследования дают возможность уточнить и дифференцировать максимальную сейсмическую балльность в зависимости от особенностей строения рельефа и инженерно-геологической обстановки и построить на этой основе карту

сейсмического микрорайонирования, приписав соответствующие баллы отдельным структурным элементам массива горных пород, в которой врезана речная долина. Однако балльность, как отмечалось выше, представляет собой условную ранговую величину, которую нельзя непосредственно использовать при проектировании, а отвечающие ей значения сейсмических параметров не учитывают в необходимой степени свойства пород и влияние других геологических факторов. Для того чтобы получить необходимую количественную информацию о колебаниях, геологические исследования дополняются инструментальными наблюдениями, которые фиксируют колебания от слабых и удаленных землетрясений и взрывов и позволяют: а) установить особенности колебаний отдельных структурных элементов естественного основания или среды сооружений, б) составить на этой основе общее представление о структуре поля колебаний и в) определить основные параметры колебаний (смещения, скорости, ускорения и др.). К сожалению, не все из полученных параметров могут быть распространены на колебания, вызываемые сильными землетрясениями. Для проектирования таких уникальных сооружений, как плотины, необходимо, например, располагать данными о длительности колебаний и их спектральном составе, которые таким способом установить нельзя. В связи с этим в настоящее время в качестве основной комплексной меры сейсмической интенсивности на участке строительства сооружения часто используют среднюю акселерограмму, получаемую методом подбора из существующих записей с учетом особенностей местной геологической обстановки, или синтетическую (получаемую методом моделирования), с которой можно снять или получить вычислением значения всех параметров, необходимые для проектирования инженерных сооружений на основе стохастической теории сейсмостойкости. В особо ответственных случаях можно пользоваться ансамблем акселерограмм (или спектров реакции), что дает возможность установить эмпирически и подобрать теоретические законы распределения отдельных сейсмических параметров и, пользуясь методами случайного математического моделирования, «прогноз» на ЭВМ различные ситуации, в которых может оказаться сооружение при сильных землетрясениях [Сувилова, 1972].

Приведем в заключение в качестве примера исследования по сейсмической опасности, которые были выполнены при изысканиях одного из крупнейших в стране гидроузлов — Ингури ГЭС [«Сейсмотектоника...», 1979].

Сейсмическая опасность участка строительства Ингури ГЭС определяется близким расположением ряда крупных сейсмо-генерирующих зон: главного Кавказского надвига, Мингрельского разлома, Ингиришского разлома и др. Были определены расстояния от стройплощадки до этих структур, магнитуды

землетрясений, глубины сейсмических очагов и пр. Это позволило дать предварительную оценку сейсмической опасности, которая оказалась равной 8 баллам. Для уточнения сейсмичности в районе строительства была развернута сеть из 10 станций, которая позволяла регистрировать все землетрясения в радиусе 50 км с  $M > 1 - 1,5$ . Результаты наблюдений и расчеты в соответствии с принципами, изложенными выше, показали, что наибольшую опасность создает Ингиришский разлом, с которым могут быть связаны землетрясения 7—9 баллов. Была определена также вероятная повторяемость землетрясений разной интенсивности: 7-балльных — 1 раз в 200 лет, 8-балльных — 1 раз в 2000 лет и 9-балльных — 1 раз в 14 000 лет. Были оценены также параметры возможных сейсмических воздействий. Интересно отметить, что значения сейсмических ускорений на дне каньона оказались в 2—2,5 раза меньше, чем на уровне гребня плотины.

Остановимся в заключение несколько подробнее на явлении крипа (ползучести), вызываемом тектоническими напряжениями. Многими исследователями отмечается, что наряду с быстрыми смещениями, происходящими по разломам во время землетрясений, часто наблюдаются также медленные асейсмические движения, скорость которых не превышает нескольких миллиметров или сантиметров в год. Подобные смещения были зафиксированы в СССР, США и многих других странах. Так, например, в работе Н. А. Корешкова и др. [1978] отмечены смещения по Ташкентскому разлому со скоростью 4 мм/год и Гиссаро-Кокшаальскому разлому со скоростью  $30,7 \pm 1,5$  мм/год, в работе Е. А. Финько [1971] по Сурхобскому разлому — 15 мм/год, в работе В. Г. Колмогоровой и др. по трассе БАМ [1979] — 13 мм/год и др. В США смещения крипового типа отмечены по системе разломов Сан-Андреас—Хейвард—Калаверас со скоростями от 0,05 до 30 мм/год, в Турции по Северо-Анатолийскому разлому до нескольких сантиметров в год, в Иране по разлому Фердуос со средней интенсивностью 5 мм/год и т. д. Многие исследователи [Brune, 1971 и др.] отмечают, что по некоторым разломам посредством крипа реализуется разрядка значительной части тектонических напряжений. В ряде работ описаны деформации дорог, зданий, мостов и других сооружений, вызванных крипом по тектоническим разломам (например, в г. Холлисте в Калифорнии).

Таким образом, крупные тектонические нарушения представляют опасность для гидротехнических сооружений, и в первую очередь для туннелей, не только по причине возможных землетрясений, но и в связи с медленными, но весьма разрушительными движениями типа крипа, вызываемыми разрядкой тектонических напряжений.

## НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 7.1. Инженерно-геологические исследования для обоснования строительства подземных сооружений

В состав гидроузлов наряду с плотинами и другими наземными сооружениями входят подземные выработки различного назначения: деривационные и отводящие туннели, напорные водоводы, камеры для машинных залов и трансформаторных подстанций, ирригационные, строительные и транспортные туннели, подходные штреки и шахты и пр.

К основным факторам, определяющим условия строительства подземных сооружений, относятся: а) геологическое строение участка строительства — распространение, мощность, условия залегания геологических тел, состав слагающих их пород, мощность и характер покрова четвертичных отложений; б) тектоника района — наличие складчатых и разрывных нарушений, их параметры, степень трещиноватости пород, параметры и ориентировка основных систем трещин; в) гидрогеологические условия — наличие и распределение различных типов подземных вод, водообильность и водопроницаемость пород, распределение напоров подземных вод, их химический состав, агрессивность по отношению к металлу и бетону; г) напряженное состояние массивов пород и геотермические условия (для сооружений глубокого заложения); д) физико-геологические и инженерно-геологические процессы, включая сейсмичность и современные тектонические движения; е) газоносность пород — наличие и возможность поступления в горные выработки взрывоопасных и ядовитых газов.

Основная трудность оценки инженерно-геологических условий строительства подземных сооружений связана с тем, что они закладываются на значительной глубине, где современные методы инженерно-геологических исследований не всегда могут обеспечить получение достаточно полной и надежной информации.

По степени доступности для исследований все подземные сооружения можно подразделить на три группы: мелкого заложения — до 200 м, средней глубины заложения — 200—500 м и глубокие — более 500 м. При мелком заложении трассы участки размещения подземных сооружений доступны для

изучения традиционными методами: проходкой горных выработок, бурением скважин, геофизическими исследованиями; при заложении сооружений на глубине 200—500 м возможности проходки горных выработок и бурения скважин сокращаются, а интерпретация геофизических исследований становится малонадежной; при еще более глубоком заложении сооружений могут быть пройдены только единичные глубокие скважины, и основным источником информации становятся существующие геологические карты, дешифрирование космических снимков и аэроснимков, наземное картирование.

К числу важнейших разделов работ, выполняемых при изучении условий строительства подземных сооружений, относится инженерно-геологическая съемка. На стадии составления ТЭО она проводится на всех намеченных вариантах, на стадии технического проекта — на выбранных вариантах. В зависимости от этапа исследований, сложности геологического строения района, типов подземных сооружений и пр. масштабы съемок обычно принимаются в пределах: на трассах туннелей — от 1 : 50 000 до 1 : 5000, на участках расположения подземных камер машинных залов, а также на припортальных участках туннелей — от 1 : 10 000 до 1 : 2000. Ширина полосы съемки должна устанавливаться с таким расчетом, чтобы можно было получить достаточно ясное представление о геологическом строении и тектонике участка строительства. Не следует, как это иногда делается, ограничивать съемку узкой полосы местности вдоль оси будущего сооружения.

Выполнение съемок основывается на тех же методических приемах, которые были описаны в разделах 6.2 и 6.3. Предварительно осуществляется дешифрирование космических снимков и аэроснимков, что позволяет в благоприятных условиях установить общий структурный план района и закартировать крупные тектонические нарушения. При хорошей обнаженности можно получить также значительную информацию о трещиноватости. Дешифрирование снимков дополняется фототеодолитной съемкой портальных участков туннеля.

Из практики строительства подземных сооружений известны случаи, когда условия строительства туннелей устанавливались только на основании результатов инженерно-геологических съемок, при этом составленные прогнозы оправдывались в разной степени. Так, например, в состав сооружений Теребля-Рикской ГЭС (см. 4.3.1.1) входит туннель длиной 3,6 км с глубиной заложения до 800 м, пересекающий водораздел между двумя реками в изменчивой по строению толще терригенного флиша. В связи с большой глубиной заложения буровые работы по трассе туннеля не проводились, и прогноз инженерно-геологических условий был сделан на основании инженерно-геологической съемки масштаба 1 : 25 000. Проходка туннеля показала, что структура массива была установлена по

результатам съемки в целом правильно, но прогноз гидрогеологических условий оказался неудачным. Предполагалось, что отложения флиша в связи с малой водопроницаемостью будут практически безводными, но в процессе проходки туннеля притоки воды на отдельных участках составляли 10, 30 и даже 100 м<sup>3</sup>/час, а суммарный приток достиг 1200 м<sup>3</sup>/час, что существенно усложнило выполнение строительных работ. Причиной допущенных ошибок явилась недооценка влияния пород разрывных нарушений на водоносность массива [Молоков, 1959 б]. Имели место случаи и противоположного характера. Так, при изысканиях одного крупного гидроузла на основании крупномасштабной инженерно-геологической съемки был сделан предварительный прогноз условий строительства подземного машинного зала и отводящих туннелей. Были выделены и закартированы крупные тектонические нарушения, сопровождающиеся зонами дробления пород, изучена трещиноватость, сделаны прогнозы в отношении устойчивости кровли и стенок в горных выработках, оценена возможная величина водопритоков. Все указывало на то, что строительство подземных сооружений встретится с весьма сложными и неблагоприятными условиями. Однако проходка разведочной штольни по оси камеры подземной ГЭС изменила сложившиеся представления, показав, что трещиноватость пород на глубине много меньше, чем предполагалось, а притоки воды в штольню оказались на порядок меньше полученных по предварительным расчетам.

Инженерно-геологические съемки дополняются геофизическими и горно-буровыми работами, сопровождающимися опробованием подземных вод и горных пород.

При небольшой глубине заложения сооружений (до 200 м) геофизические исследования позволяют уточнить положение и параметры тектонических нарушений, оценить степень сохранности и трещиноватости пород, определить в первом приближении их физико-механические свойства. При большей глубине заложения надежность интерпретации результатов геофизических исследований заметно снижается.

Буровые скважины задаются в местах предполагаемого размещения подземных камер, а также по трассам туннелей, в первую очередь на наиболее неблагоприятных участках — под современными и древними эрозионными врезами, в зонах тектонических нарушений, в местах развития древних кор выветривания и пр. Расстояние между скважинами и общий метраж бурения на каждой стадии проектирования определяются глубиной, типом и назначением подземных сооружений, сложностью геологического строения, наличием опасных геологических процессов, обнаженностью и доступностью местности для транспортных средств. Глубина скважин редко превышает 300 м, но в отдельных случаях они закладываются глубиной до

1000—1500 м. Такой случай имел место, например, на трассе туннеля Арпа—Севан при встрече с мощным тектоническим разломом, не выявленным в процессе инженерно-геологической съемки. Для выбора способа проходки туннеля и типа крепления потребовалась надежная инженерно-геологическая информация, для получения которой была пройдена скважина глубиной 1500 м.

Наряду с вертикальным бурением для подсечения крутых нарушений применяется также наклонное и горизонтальное бурение (в порталных частях туннеля или из подземных камер).

Бурение горизонтальных, так называемых опережающих скважин осуществляется также непосредственно в процессе строительства подземных сооружений с целью уточнения геологического разреза и для предотвращения внезапных прорывов воды или плавунов из крупных разломов или карстовых пустот.

Горные выработки — шахты, штолни — проходят обычно в припортальных частях туннелей и на участках заложения крупных подземных камер. Протяженность выработок может быть различной, но в отдельных случаях весьма значительной. Так, на упоминавшемся уже выше гидроузле для изучения условий строительства камеры машинного зала была пройдена штольня протяженностью 550 м, что позволило получить все необходимые для проектирования данные.

При проходке штолен большое внимание уделяется изучению тектонических нарушений и трещиноватости пород в соответствии с рекомендациями, изложенными в 6.3.1. Фиксируются также все случаи нарушения устойчивости пород в кровле и стенах выработок, деформации временного крепления и проявления различных других геологических процессов (пучение, стреляние пород и др.), устанавливается связь этих явлений с литологией пород, складчатыми и разрывными нарушениями, характером трещиноватости пород, выявляются закономерности изменения этих процессов во времени (усиливаются, стабилизировались, затухают).

Важным разделом работ являются гидрогеологические наблюдения в горных выработках: установление мест поступления подземных вод в выработку, форма и дебит выходов и др. Отбираются пробы воды для химического анализа и обнаружения ее агрессивности к металлу и бетону. По величине водопритоков выделяются следующие участки горных выработок [«Руководство по инженерно-геологическим изысканиям», 1978]:

- практически безводные (капеж отсутствует);
- слабообводненные — (слабый капеж) — до 10 капель с 1 м<sup>2</sup> пролета выработки в секунду;

- среднеобводненные (средний капеж) — более 10 капель с 1 м<sup>2</sup> в секунду, отдельные прерывистые струи;
- сильнообводненные — прерывистые или сплошные струи с небольшим дебитом;
- очень сильно обводненные — сосредоточенные выходы подземных вод (родники) с большими дебитами.

При строительстве сооружений в зоне вечной мерзлоты или при заложении их на большой глубине (в особенности в районах с современным вулканизмом) проводятся наблюдения за температурой пород с использованием ртутных или электрических термометров, термопар или других устройств.

Обязательны наблюдения за проявлениями загазованности пород, которая фиксируется по запаху, пузырькам или наличию пленок на поверхности воды (метан), шумовому (сулфлярному) эффекту и другим признакам. При первом проявлении признаков газовыделений производится отбор проб воздуха для химических исследований.

Скважины и горные выработки используются также для отбора образцов для лабораторного исследования физико-механических свойств пород. Кроме того, в горных выработках выполняются полевые исследования.

Опробуют все элементы разреза (слои, линзы, магматические тела, зоны тектонических нарушений и др.), но особое внимание уделяется элементам, которые могут играть определяющую роль при оценке устойчивости пород в подземных выработках, выборе конструкции временной крепи и постоянной обделки подземных сооружений.

В комплекс исследований входит определение крепости пород и показателей прочностных и деформационных свойств. Основной показатель крепости пород — коэффициент крепости  $f_{kp}$  используется для расчета подземных выработок по методу М. М. Протодьяконова (см. 3.3.1). Коэффициент крепости вычисляется по формуле (3.7), для чего предварительно определяют значения временного сопротивления сжатию  $R_c$  с помощью одного из применяемых в современной практике методов.

Деформационные свойства пород при проектировании обделок гидротехнических туннелей и других подземных сооружений оцениваются величиной модуля общей деформации  $E_0$ , коэффициента Пуассона и коэффициента удельного отпора  $k_0$ . Полевые методы определения всех этих характеристик были изложены в 6.3.4. При испытаниях учитываются насыщение пород водой, анизотропия, ползучесть, а также возможность укрепительных мероприятий.

При строительстве подземных сооружений в зоне распространения мерзлых пород нарушение устойчивости кровли и стенок последних определяется в значительной мере вытапливанием льда и льдонасыщенного заполнителя, цементирующих

массив пород, разбитый трещинами на отдельные блоки. В связи с этим для составления прогноза необходимо располагать данными: а) о скорости оттаивания пород вокруг подземной выработки и мощности образующейся талой зоны; б) об изменении прочностных свойств массива в результате оттаивания и развитии горного давления. Для этой цели используются либо натурные наблюдения на опытных выработках, но это сложно, дорого и требует больших затрат времени, либо лабораторные методы моделирования. Так, при изучении развития горного давления в подземных сооружениях Колымской ГЭС исследования проводились на модели из эквивалентных материалов, которые были разбиты на блоки с зазорами из хлористого кальция, имитирующего лед или льдонасыщенный заполнитель трещин. Вытапливание хлористого кальция достигалось включением в заднюю стенку стенда электрических контуров. В результате был определен коэффициент пропорциональности между горным давлением и глубиной оттаивания с учетом степени трещиноватости и льдистости пород. Аналогичные исследования были проведены для подземного зала Усть-Хантайской ГЭС [Гроссман, Глазунов, Канаев, 1979]. При исследовании зоны оттаивания и теплового режима пород вблизи выработки используется математическая аналогия между электрическими и тепловыми процессами, для чего используются аналоговые устройства. Сопоставление результатов моделирования с натурными наблюдениями показали удовлетворительную сходимость.

Несовершенство используемых в современной практике методов изысканий и весьма ограниченные возможности применения наиболее эффективного из этих методов — горно-буровых работ — нередко приводят к тому, что фактические условия строительства подземных сооружений весьма заметно отличаются от прогнозных, установленных по материалам изысканий. Это в свою очередь вызывает необходимость внесения изменений в запроектированные методы проходки подземных строительных выработок, в конструкции временной и постоянной крепи, а в некоторых случаях и в направлении трасс туннелей. Например, при изысканиях одного из туннелей, входящего в деривационный тракт Гюмушской ГЭС в Армении, инженерно-геологические условия трассы были оценены только по двум скважинам, хотя протяженность трассы была значительной — 6800 м. Обе скважины вскрыли весьма прочные эфузивы, в связи с чем крепление туннеля было запроектировано исходя из предположения, что туннель на 80 % своей протяженности пройдет в крепких породах и только на 20 % в трещиноватых базальтах и неустойчивых вулканических выбросах. В действительности соотношение оказалось обратным, и на 80 % длины туннеля пришлось применить тяжелую крепь. При исследованиях расхождения подобного рода, по-видимому, следует

признать неизбежными, хотя, конечно, в определенных пределах. В связи с этим большое значение приобретает документация подземных выработок в процессе их проходки, что дает возможность выявить и оценить наблюдающиеся расхождения между проектными и фактическими условиями строительства и внести в случае необходимости изменения в принятые проектные решения.

В состав работ по документации включаются зарисовки свода и стенок подземных выработок и детальное их описание, включающее характеристику состава пород, условий их залегания, наличия тектонических нарушений и трещин (с фиксацией всех основных их параметров), физического состояния и свойств пород, проявлений различных геологических процессов, водопроявлений и пр. Регистрируются и описываются также все случаи деформации пород и крепления (прогибание кровли, вывалы, пучение, деформации стен — элементов временного крепления, образования трещин в постоянной обделке и пр.), выявляется связь этих явлений с литологией пород, трещиноватостью, наличием тектонических нарушений и пр., определяются закономерности развития этих явлений во времени. Большое внимание уделяется также гидрогеологическим наблюдениям — фиксации мест выходов подземных вод, определению их дебитов и пр. Ведутся наблюдения за температурой и загазованностью воздуха в подземной выработке.

Одновременно с документацией производится отбор образцов горных пород для лабораторных определений показателей физико-механических свойств и проб воды для химических анализов и определения степени агрессивности подземных вод к металлу и бетону.

При опасности прорывов в подземные выработки значительных скоплений воды из карстовых полостей, открытых трещин и пр. в забоях выработок производятся дополнительные исследования с проходкой опережающих скважин и штолен.

По полученным материалам составляется отчет по документации.

## 7.2. Исследования для проектирования противофильтрационных завес

Противофильтрационные завесы в основании плотин создаются для решения следующих основных задач: а) уменьшения потерь воды на фильтрацию из водохранилищ до допустимых пределов, б) снижения скорости движения воды в трещинах и предотвращения развития механической и химической суффозии; в) уменьшения высоты выклинивания фильтрационного потока на склонах долины в нижнем бьефе за плотиной; г) снижения и равномерного распределения статического и динамического воздействия фильтрационного потока

на основание плотины; д) предотвращение образования сосредоточенных путей фильтрации, могущих привести к фильтрационным деформациям пород основания.

В соответствии с конкретными геологическими условиями завесы могут быть одно- и многорядными, в том числе многоярусными, в которых число рядов скважин с глубиной уменьшается. Для создания завес в трещиноватых скальных породах применяется в основном цементация. Возможность ее применения определяется соблюдением следующих условий: 1) раскрытие трещин должно быть не менее 0,1 мм; 2) скорость движения подземных вод не должна превышать  $7 \cdot 10^{-1}$  см/с (в противном случае требуется постановка опытных работ); 3) подземные воды не должны быть агрессивными к цементу.

Для устройства противофильтрационных завес применяют также сложные цементно-глинистые растворы с пластифицирующими добавками. Они обеспечивают водопроницаемость массива пород, меньшую, чем чисто цементные растворы, дают экономию до 35 % цемента и позволяют увеличить расстояние между скважинами. При создании противофильтрационных завес в закарстованных породах применяют тиксотропные растворы, содержащие 30 % цемента и 70 % бентонитовой глины. При неблагоприятных условиях для устройства завесы применяется битумизация или комбинация обоих методов. Примером комплексного применения цементации и битумизации может служить завеса, созданная под плотиной Мингечаурской ГЭС на р. Куре в толще трещиноватых мергелей и песчаников. Необходимость такой конструкции завесы диктовалась агрессивностью подземных вод к цементу. Ведутся разработки методов создания противофильтрационных завес в скальных породах с помощью коллоидных растворов на базе карбамидных и эпоксидных смол, обладающих малой вязкостью и устойчивостью к воздействию воды, различных химических и биологических факторов. Противофильтрационная завеса должна снижать водопроницаемость пород (в зависимости от напора на плотине): при напоре до 30 м — до 0,05 л/мин; при напоре до 100 м — 0,03 л/мин и при большем напоре — 0,01 л/мин. Качество цементации проверяется путем бурения контрольных скважин и выполнения опытных нагнетаний.

В начале цементационных работ расстояния между скважинами в завесе определяются последовательным сближением. Скважины первой очереди проходят через 10—12 м, затем сближают до 4—5 м и, если нужной плотности достигнуть не удается, — до 2—2,5 м. Опыт показал, что дальнейшее сближение нерационально. Завесы задаются, как правило, вертикальными, но в некоторых случаях часть скважин или все они задаются наклонными, чтобы пересечь крутопадающие трещины или тектонические зоны.

Чтобы не задерживать строительных работ, например при укладке глиняного ядра каменнонабросных плотин, цементацию выполняют из специальных галерей, устраиваемых в подшве ядра (Чарвакская и Нуракская плотины). Аналогичный способ применяют при устройстве береговых завес, в особенности при большой крутизне склонов.

Параметры противофильтрационных завес зависят от мощности и строения зоны разуплотнения пород. При отсутствии тектонических нарушений строение этой зоны обычно сравнительно простое, а раскрытие трещин и водопроницаемость закономерно уменьшаются с глубиной и по горизонтали. Мощность зоны разуплотнения зависит от глубины эрозионного вреза, возраста и истории формирования долины, величины тектонических напряжений. На платформах она обычно не превышает 10—30 м, в горных районах возрастает до 100—150 м, а иногда и более. Вся эта зона или некоторая ее часть, наиболее опасная в отношении фильтрационных потерь и суффозионных явлений, перекрывается противофильтрационной завесой, которая должна быть доведена до водоупорных пород. Для установления этой границы применяются критерии, основанные на величинах, характеризующих водопроницаемость пород. Например, при определении водопроницаемости с помощью обычных нагнетаний за границу принимаются значения удельного водопоглощения 0,05 л/мин, при нагнетаниях по Люжону — 1 л/мин. Иногда применение этих критериев приводило к выделению слишком мощной зоны повышенной водопроницаемости, увеличению стоимости завесы и созданию трудностей технического характера. В таких случаях шли на создание «висячих» завес, не доведенных до водоупора. Опасных последствий для эксплуатации сооружений (если не считать некоторого увеличения потерь воды на фильтрацию) это не имело.

Детальное изучение зоны повышенной водопроницаемости дает возможность разделить ее на подзоны и дифференцировать конструкцию завесы по числу рядов скважин, по расстояниям между скважинами, что позволяет создать надежную завесу при минимальных затратах времени и средств.

Много сложнее оказывается строение зоны повышенной водопроницаемости в массивах пород, разбитых тектоническими разломами. Краевые части зон разломов, характеризующихся дроблением или повышенной трещиноватостью пород, обычно обладают высокой водопроницаемостью (за исключением тех случаев, когда трещины залечены минеральными образованиями), центральные же части разломов могут играть в одних случаях роль дрен (крупные открытые трещины-сместили), в других — барражей (трещины, заполненные миллионитом или глинкой трения). При наличии разломов нескольких генераций в разрезе могут присутствовать разломы обоих типов, что со-

здаст неоднородность и анизотропию основания и примыканий по водопроницаемости, а следовательно, и по распределению фильтрационного противодавления. При неблагоприятных условиях это может привести к нарушению устойчивости плотины. Зоны тектонических разломов представляют также опасность в отношении фильтрационного разрушения пород вследствие суффозии и подземной эрозии. В соответствии с этим зоны разломов обычно перекрываются наиболее мощными (многорядными) и глубокими завесами, а инженерно-геологические исследования должны обеспечить получение достаточно надежной информации о положении, мощности, строении и фильтрационных характеристиках этих зон.

Особенно ответственной и сложной является задача проектирования противофильтрационных завес в массивах закарстованных известняков. Часто в таких условиях судьба гидроузла зависит от возможности создания надежных противофильтрационных завес. Глубина и длина их, а также конструкция (число рядов скважин, глубина их и пр.) определяются закономерностями распространения карста в массиве пород, размером и частотой карстовых полостей, наличием или отсутствием заполнителя в них.

В известняках с карстом, обусловленным влиянием близких эрозионных врезов (по А. Г. Лыкошину), противофильтрационная завеса должна в общем случае перекрывать в основании и примыканиях всю закарстованную часть массива. Такая завеса была создана на Павловской ГЭС на р. Уфе. Известняки в основании и примыканиях плотины были интенсивно закарстованы, глубина зоны интенсивного развития карста достигала 100—110 м от поверхности, а в глубь берегов прослеживалась на 200—250 м.

Созданная противофильтрационная завеса имела общую длину 1100 м, в том числе в примыканиях до 200 м. Завеса была сделана двухрядной, глубиной до 83 м. Несмотря на значительную глубину, завеса в основании плотины оказалась «висячей». Однако и расчеты, и практика эксплуатации сооружения, показали, что принятая глубина вполне достаточна и для уменьшения потерь на фильтрацию, и для предотвращения вымыва заполнителя трещин и полостей [Лыкошин, 1959].

На Каховской ГЭС на р. Днепр, построенной в области развития карста, обусловленного влиянием удаленных эрозионных врезов (по А. Г. Лыкошину), были созданы противофильтрационные завесы значительно большей протяженности. В примыканиях плотины залегают слои кавернозных известняков, причем на правом берегу каверны заполнены плотной глиной, а на левом заполнитель частично вымыт, и водопроницаемость пород  $K_f$  оценивалась до 1200 м/сут. Для обоснования проекта завес был выполнен большой объем инженерно-геологических исследований. По трассе завес было пробурено более 10 000 м

скважин, пройдено 350 м шахт и штолен, проведено 75 кустовых и одиночных откачек, 80 зон нагнетаний. Фильтрационная устойчивость заполнителя каверн изучалась в нескольких опытных шахтах, где выполнялись наливы, нагнетания и откачки, моделировавшие наиболее неблагоприятные условия работы завесы. Пробурено несколько смотровых скважин диаметром 1,2 м до и после цементации известняков.

В этих условиях левобережная завеса длиной 940 м прорезала все слои известняков до подстилающих песков, служивших относительным водоупором. На начальном участке (считая от примыкания) завеса состояла из пяти рядов скважин с расстоянием между скважинами 1,0 м. Многорядность была принята, во-первых, для предотвращения вымыва заполнителя каверн и, во-вторых, для снижения скоростей фильтрации в ее основании, что должно было обеспечить устойчивость песков, залегающих ниже. К концу завесы число рядов скважин снижалось до двух. На правом берегу завеса имела длину 200 м. В связи с меньшей кавернозностью и с заполнением каверн глиной она была только трехрядной и предназначалась лишь для уменьшения обходной фильтрации [Молоков, 1959].

Таким образом, основной задачей гидрогеологических и инженерно-геологических исследований при проектировании противофильтрационных завес является получение полной и достоверной картины структуры поля фильтрации в массиве: положения зон повышенной водопроницаемости, их глубины, ширины, состояния пород в них, возможности фильтрационных деформаций, супфазионных явлений, а также выявление общих закономерностей изменения водопроницаемости пород по глубине и в сторону водоразделов.

### 7.3. Определение мощности зоны съема

Возвведение плотин на скальных основаниях сопровождается врезкой подошвы сооружения на ту или иную глубину в толщу горных пород. Глубина вреза определяется двумя основными факторами: наличием выветрелых, ослабленных пород в верхней части разреза, которые не могут служить надежным основанием тяжелых бетонных сооружений, и морфологическими особенностями речной долины. Как показывают подсчеты [Тиздель, 1976; «Методические рекомендации...», 1975], объем удаляемых пород под высокими плотинами достигает сотен тысяч кубических метров, составляя в некоторых случаях до 40 % и более от объема всей бетонной плотины; и, поскольку удаленные породы подлежат замене бетоном, это приводит к существенному удорожанию строительства (до 25 % от полной стоимости сооружения). В связи с этим определение оптимальной глубины врезки бетонных плотин имеет большое практическое значение. При определении глубины

врезки и мощности зоны съема учитывается большое число факторов, важнейшими из которых являются: а) мощность коры выветривания, ее строение, мощность отдельных выделенных зон, физико-механические и фильтрационные свойства пород в пределах выделенных зон; б) возможность и эффективность применения укрепительной цементации и других мелиоративных мероприятий; в) требования конструктивного характера; г) условия и способы производства строительных работ.

Требования, предъявляемые к определению оптимальной глубины врезки, зависят также в большой степени от типа возводимой плотины. При строительстве гравитационных и контрфорсных плотин основное требование [«Методические рекомендации...», 1978] к глубине врезки заключается в обеспечении опирания плотины на скалу, которая с учетом укрепительных и противофильтрационных мероприятий, во-первых, обладала бы необходимыми параметрами сопротивления сдвигу и, во-вторых, позволяла бы осуществить достаточно эффективные мелиоративные мероприятия. Здесь не нашли отражения деформационные свойства массива пород, и это не случайно. Как показывает опыт, высокие гравитационные и контрфорсные плотины могут быть возведены даже на довольно сильно сжимаемых основаниях (см. 3.2.1.4), поэтому требования по обеспечению устойчивости плотин являются гораздо более важными и жесткими.

Реализация этих требований означает, что удалению подлежит только та часть скального массива, которая превращена в элювий или «разборную скалу», поддается разработке ручным или легким механическим инструментом и имеет невысокие показатели сопротивления сдвигу. В первую очередь это относится к породам, где трещины заполнены глинистым материалом, и применение укрепительной цементации невозможно или малоэффективно.

Поскольку мощность коры выветривания в дне речных долин обычно невелика, врезка плотин в толщу скальных пород также имеет небольшую глубину — 3—5 м, а иногда и менее (Токтогульская ГЭС). Однако такая картина наблюдается только в центральных (русловых) частях долин. В бортовых частях при определении глубины врезки приходится учитывать также устойчивость строительных откосов и бортовых секций плотин, условия производства работ и т. д. По этим причинам глубина врезки здесь обычно достигает 4—16 м, а в некоторых случаях и больше (Саянская ГЭС — 60 м). В случае если при удалении выветрелого слоя в основании плотины обнаруживаются трещины или другие поверхности ослабления, по которым может произойти смещение плотины, глубина врезки увеличивается, или применяются мероприятия по укреплению основания: заделка трещин, укрепительная цементация и др. Во всех случаях окончательное решение об удалении пород

принимается на основании анализа напряженного состояния плотины и основания, расчета устойчивости плотины на сдвиг и оценки эффективности проектируемых противофильтрационных мероприятий.

При возведении арочных плотин глубина и объем врезок определяется в основном устойчивостью береговых упоров, на которые передаются основные усилия. Стремление врезать плотину глубже различных поверхностей ослабления (трещин бортового отпора или расширенных разуплотнением тектонических трещин) нередко приводит к большим объемам скальной выемки. Сказываются также конструктивные соображения — желание максимально использовать преимущества арочного эффекта. Это нередко вызывает необходимость придания створу более правильной геометрической формы, хотя, как показывает опыт, это решение не всегда оправданно, так как тонкие арочные плотины могут быть возведены и в широких резко асимметричных долинах неправильной формы [«Методические рекомендации...», 1978]. При определении глубины врезки учитываются также такие факторы, как местная прочность, неравномерная деформируемость пород и др.

Инженерно-геологические исследования при определении глубины врезки должны быть направлены в первую очередь на определение мощности и изучение строения кор выветривания в дне и бортах речных долин, определение фильтрационных и физико-механических свойств выветрелых пород, изучение структуры скального массива с выявлением всех опасных для устойчивости плотин поверхностей ослабления и пр. Специальные исследования должны быть проведены по изучению возможности и эффективности укрепительной цементации и других методов мелиорации, так как эти вопросы изучены пока недостаточно, а в применении этих методов скрыты значительные резервы удешевления строительства.

#### 7.4. Поиски и разведка естественных строительных материалов

Для возведения гидротехнических сооружений используются в больших количествах различные естественные строительные материалы: грунты для отсыпки или намыва земляных плотин, гравийно- песчаные смеси для бетона и фильтров, камень для наброски и крепления откосов, глина для противофильтрационных элементов и пр. Наличие в районе строительства естественных стройматериалов, их запасы, качество, условия разработки и доставки во многом определяют выбор места строительства и конструкцию гидротехнических сооружений. Например, для строительства Красноярской и Братской ГЭС с бетонными плотинами высотой по 110 м и длиной около 1100 м понадобилось по 8 млн. м<sup>3</sup> песка, гравия и щебня для

бетона. Возведение сравнительно небольшой плотины Сарсангской ГЭС на р. Тертер в Азербайджане (высота 110 м и длина по гребню 550 м) потребовало 600 тыс. м<sup>3</sup> суглинка для ядра и 6 млн. м<sup>3</sup> камня для упорных призм. Практика изысканий для гидротехнического строительства показывает, что для обоснования проектов плотин из местных строительных материалов объем работ по поискам, разведке и опробованию их составляет до 30 % объема изыскательских работ. Для бетонных плотин это соотношение составляет около 10—12 %.

Требования на все строительные материалы, применяемые при гидротехническом строительстве, изложены в соответствующих ГОСТ, СНиП, инструкциях и руководствах. Однако в практике строительства довольно редки случаи, когда имеющиеся вблизи стройплощадки грунты в полной мере отвечают установленным требованиям. Поэтому применение некондиционных материалов допускается после проведения специальных исследований и технико-экономического обоснования.

Перечень работ, выполняемых при поисках, разведке и опробовании строительных материалов, приведен в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Исследования при поисках и разведке естественных минеральных строительных материалов

| Виды исследований                   | Назначение исследований и результаты  |
|-------------------------------------|---|
| Геологическая съемка и поиски       | Выявление месторождений, определение их типов, границ, получение общей характеристики качества материалов                                   |
| Разведка                            | Установление запасов и параметров месторождений (условий залегания, мощности полезной толщи и вскрыши, гидрогеологических условий)          |
| Опробование:                        |   |
| минералогическое и петрографическое | Определение соответствия разведанных грунтов установленным кондициям по минералогическому составу и содержанию примесей                     |
| Геотехнические исследования         | Выявление соответствия разведанных грунтов установленным кондициям по физико-механическим свойствам (плотности, влажности, прочности и пр.) |
| Технологические исследования:       |   |
| по условиям разработки              | Выработка наилучших способов разработки месторождения (использование механизмов, взрывных работ и пр.)                                      |
| по использованию стройматериалов    | Выбор оптимальной технологии укладки грунта в тело плотины и противофильтрационных устройств  |

Как и другие виды исследований, они выполняются в несколько этапов, отвечающих отдельным стадиям проектно-изыскательских работ. На ранних этапах оценивается общая обеспеченность района строительства необходимыми строительными материалами, для чего используются различные карты, общая и специальная геологическая литература. Далее проводится дешифрирование аэроснимков с использованием ландшафтно-индикационного метода и наземные исследования.

С поисками месторождений каменного материала для устройства упорных призм каменно-набросных плотин особых трудностей обычно не возникает, так как для этой цели можно использовать большинство горных пород, слагающих борта ущелий. Если коренные породы, слагающие склоны, непригодны для устройства призм, то используются грунты из полезных выемок или аллювиальные галечники. Так, упорные призмы самой высокой в СССР каменно-набросной плотины (Нурекской ГЭС) уложены из галечников надпойменной террасы р. Вахш. Аллювиальные галечники горных рек обычно представлены самыми прочными разностями пород и в полной мере удовлетворяют требованиям к материалу каменных призм по прочности и морозостойкости.

При строительстве бетонных плотин основная проблема связана с поисками месторождений инертных добавок в бетон. Аллювий горных рек обычно не отвечает установленным кондициям, так как содержит слишком мало песка. Основным источником песчаного или гравийно-галечного материала чаще всего служат аллювиальные или флювиогляциальные террасы. Однако иногда нужный материал приходится завозить издалека или прибегать к дроблению камня на песок и щебень.

Разведку естественных месторождений строительных материалов подразделяют на предварительную и детальную. При предварительной разведке работы ведутся на перспективных участках, выявленных при поисках, в объеме, необходимом для утверждения запасов по категории В и выделения участков для детальной разведки. При детальной разведке выполняются разведочные работы и опробование грунтов в объеме, обеспечивающем подсчет запасов по категории А.

В начальный период строительства отрабатывается технология разработки и укладки естественных строительных материалов в тело сооружений, противофильтрационные элементы, дренажные устройства и пр. Поскольку решить эти вопросы с помощью лабораторных исследований полностью невозможно, их дополняют полупроизводственными опытными работами.

Большое внимание обычно уделяется исследованию технологии разработки месторождений строительных материалов. Конечной целью этих исследований является выработка наиболее экономичных способов получения и транспортировки пород, обеспечивающих получение материала необходимого качества.

К числу наиболее часто встречающихся видов исследований относятся: а) определение способов удаления вскрытых пород (например, гидросмывом); б) выбор способа и определение параметров ведения взрывных работ при разработке камня (определение расстояния между скважинами, мощности зарядов, интервалов между взрывами и пр.); в) разработка способов добычи гравийно-песчаной смеси из обводненных толщ; г) определение рациональной схемы сортировки добываемого материала по крупности и качеству и пр. На инженеров-геологов в этих работах обычно возлагается задача выбора опытного участка, его детальная разведка и участие в оценке полученных результатов.

Вторым важным разделом таких полупроизводственных исследований является разработка технологии использования естественных строительных материалов при возведении сооружений. Наибольший объем работ такого назначения приходится на устройство противофильтрационных элементов в каменно-набросных и земляных плотинах. Поскольку грунты, отвечающие по своим качествам всем установленным кондициям, встречаются в природе не всегда, приходится использовать различные методы сортировки и обогащения материала, удаления крупных или мелких фракций и пр. Эти операции снижают темпы работ и удороажают строительство, поэтому должна быть выбрана оптимальная технология производства работ.

В некоторых случаях выполняются работы, совмещающие исследования условий разработки месторождений и оценку свойств грунтов, уложенных в тело плотины. Примером таких крупномасштабных опытных работ, выполненных на современном уровне, может служить опытный взрыв на р. Бурлыкия. Эти работы проводились для обоснования проектных решений Камбаратинского гидроузла на р. Нарын, плотину которого предполагается создать методом направленного взрыва. Для возведения плотины выбран участок долины р. Нарын, приуроченный к узкому ущелью, заложенному в гранитах. Высота проектируемой плотины около 300 м, длина по гребню примерно 750 м и ширина по руслу 2600 м. В связи с тем что опыта возведения плотин такого типа и масштабов еще недостаточно, возникла необходимость в проведении опытного взрыва в сходных топографических и инженерно-геологических условиях. Для проведения опыта в массиве гранитов, в который врезана долина р. Нарын, было найдено ущелье меньшего размера на р. Бурлыкия, повторяющее его конфигурацию в плане и сходное по другим морфологическим характеристикам.

В долине р. Бурлыкия было пройдено два туннеля на разных уровнях длиной 60 и 280 м для пропуска воды и минные галереи суммарной протяженностью более 1000 м. В них было заложено 700 т взрывчатых веществ, что позволило выполнить

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

опытный взрыв в масштабе, близком к 1 : 7. После взрыва образовался навал высотой 50 м и объемом 340 тыс. м<sup>3</sup>. До начала взрыва выполнены инженерно-геологическая съемка и детальная разведка выбранного участка, проведен комплекс геофизических работ, осуществлена документация туннелей и минных галерей. В результате были уточнены особенности геологического строения участка реки, определена мощность зон разуплотнения и выветривания. После взрыва проведены геодезические наблюдения за осадкой тела плотины, показавшей, что она составила от 11 см на гребне до 36 см на откосах. Для изучения состава и свойств образовавшегося навала было заложено 10 шахт глубиной до 50 м. В шахтах определялись гранулометрический состав навала, его плотность и водопроницаемость (опытными наливами).

Для определения механических свойств пород в навале применялись сейсмическое профилирование с поверхности и в забоях шахт, сейсмокаротаж шахт, сейсмическое просвечивание между шахтами и поверхностью, ультразвуковые исследования образцов взорванной породы. В процессе наполнения водохранилища шахты были использованы в качестве пьезометров и оборудованы самописцами уровней. Проводились определения действительной скорости фильтрации, измерение фильтрационного расхода, а также выноса твердого материала с отбором проб воды на мутность в верхнем и нижнем бьефах.

Опытный взрыв показал, что за пределами воронки взрыва в массиве пород могут быть выделены зоны сильного и слабого влияния взрыва, ширина которых зависит от мощности заряда и состояния пород до взрыва. Выяснилось, что устойчивость подземных сооружений зависит от удаления их от заряда, от сечения и типа крепления. Обнаружилось также, что после проведения взрыва на склонах в пределах контура обрушения образовались потенциально неустойчивые массивы пород объемом до 30 тыс. м<sup>3</sup>. Исследования материала навала показали статистическую его однородность во всех частях навала. При максимальном напоре в 35 м фильтрационный расход через тело навала составил 2,3 м<sup>3</sup>/сек, что соответствовало коэффициенту фильтрации 600 м/сут (в центральных частях плотины коэффициент фильтрации не превышал 300 м/сут). В целом результаты опытного взрыва показали, что с помощью направленного взрыва можно создать прочное, малодеформируемое и достаточно водоупорное сооружение.

*Альтер С. П.* Ландшафтный метод дешифрирования аэроснимков.—М.-Л.: Наука, 1968, 88 с.

*Аксенов С. Г., Карпов Н. М., Сапегин Д. Д.* Новая методика исследования деформируемости скальных пород в скважинах.—Изв. ВНИИТ, 1973, т. 102, с. 91—96.

*Андреев В. Н., Лаврова Л. Д.* Геолого-геофизическое определение зон выветривания и разгрузки в гранитах ДнепроГЭС-2.—Труды Гидропроекта, 1977, сб. 50, с. 123—126.

*Барановская Е. И.* Ириклинская плотина на р. Урале.—Геология и плотины, 1974, т. 7, с. 72—79.

*Барон Л. И., Логунцов Б. П., Позин Е. С.* Определение свойств горных пород.—М.: Госгортехиздат, 1962. 332 с.

*Белый Л. Д.* Плотина Плявинской ГЭС на р. Западной Двине.—Геология и плотины, 1959, т. 1, с. 22—29.

*Белый Л. Д.* Современные тектонические движения и сейсмичность.—Труды Гидропроекта, 1974, сб. 36, с. 25—38.

*Белый Л. Д.* Некоторые теоретические аспекты формационного анализа.—В кн.: Вопросы инженерной геологии. М., 1977, с. 26—48.

*Бечин А. П.* Влияние производственных факторов на выбор типа плотин.—Труды Координационного совещания по гидротехнике, 1974, вып. 90, с. 48—54.

*Болотина Н. М., Виткина Н. Х., Молоков Л. А.* Усть-Илимская плотина на р. Ангаре.—Геология и плотины, 1974, т. 7, с. 125—142.

*Бондарик Г. К.* Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород.—М.: Недра, 1971. 272 с.

*Боряев Ф. И.* Некоторые итоги 25-летней эксплуатации гидротехнических сооружений Камской ГЭС.—Гидротехническое строительство, 1979, № 9, с. 33—35.

*Боярский В. М., Григорьев Ю. А., Телешов В. И.* Буреинский гидроузел на р. Бурее.—Гидротехническое строительство, 1979, № 9, с. 14—18.

*Брызгалов В. И., Шушарин А. Д.* Эффективность эксплуатации гидротехнических сооружений, организация контроля и некоторые результаты наблюдений за гидротехническими сооружениями Красноярской ГЭС.—Гидротехническое строительство, 1976, № 4, с. 11—14.

*Варга А. А.* К прогнозу современных движений по тектоническим нарушениям при инженерно-геологическом картировании.—Труды Гидропроекта, 1978, сб. 65, с. 29—44.

*Варга А. А.* О генетическом подходе к инженерно-геологическому изучению трещиноватости.—В кн.: Проблемы повышения эффективности и качества изысканий для гидротехнического строительства. М., 1979. 76 с.

*Варга А. А.* Методическое пособие по изучению структур напластования при инженерно-геологических изысканиях для гидротехнического строительства.—М.: Энергия, 1979. 76 с.

*Васильева Л. Р.* Усть-Каменогорская ГЭС на р. Иртыше.—Геология и плотины, 1959, т. 1, с. 151—165.

*Веденников Л. Е.* К инженерно-геологической характеристике мерзлых коренных пород Северо-Востока СССР.—Труды ВНИИ золота и редких металлов, 1969, № 29, с. 293—314.

*Викторов С. В.* Использование индикационных географических исследований в инженерной геологии.—М.: Недра, 1966. 197 с.

*Воронков О. К., Акатов Ю. Е.* Сейсморазведочные исследования на карсте.—Геология и геофизика, 1967, № 6, с. 98—105.

*Вторина Е. А., Вторин Б. И.* Льдообразование в горных породах.—М.: Наука, 1970. 297 с.

Газиев Э. Г. Механика скальных пород в строительстве.—М.: Стройиздат, 1973. 176 с.

Газиев Э. Г. Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления.—М.: Стройиздат, 1977. 160 с.

Газиев Э. Г., Архипова Е. К. Учет работы трещины при расчете скальных массивов методом конечных элементов.—В кн.: Инженерная геология скальных массивов. М., 1976, с. 78—83.

Газиев Э. Г., Речицкий В. И. Методы вероятностной оценки устойчивости скальных откосов.—Гидротехническое строительство, 1978, № 3, с. 38—41.

Гзовский М. В. Перспективы тектонофизики.—В кн.: МГК, XXII сессия. Докл. сов. геологов, проблема 4. М., 1964, с. 24—32.

Геологический словарь. Т. 1.—М.: Недра, 1973. 486 с.

Глозман Р. Г., Ермаков И. И., Печенин Ю. И. Устойчивость бортов карьеров в условиях вечной мерзлоты.—М.: Стройиздат, 1975. 55 с.

Голодковская Г. А. Геологические основы инженерно-геологического изучения массивов горных пород сейсмоакустическими методами.—Труды Гидропроекта, 1974, сб. 36, с. 17—25.

Голодковская Г. А. О влиянии тектонических процессов на формирование инженерно-геологических свойств горных пород.—В кн.: Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. М., 1968, с. 112—119.

Гольдфман В. Г. Инженерно-геологические последствия промерзания пород на северо-востоке.—Труды ВНИИ золота и редких металлов, 1973, т. 32, с. 64—79.

Горбушина Л. В., Рябоштан Ю. С. Эманационный метод индикации геодинамических процессов при инженерно-геологических изысканиях.—Советская геология, 1975, № 4, с. 106—111.

Горянин Н. Н., Ляхович Ф. М. Сейсмические методы в инженерной геологии.—М.: Недра, 1979. 142 с.

Горянский А. Г., Шпаковский Ф. В. Инженерно-геологические условия строительства Зейского гидроузла.—Гидротехническое строительство, 1974, № 5, с. 9—12.

Гринбаум И. И. О методике и особенностях расходометрических исследований фильтрационных свойств трещиноватых пород в основании высоконапарных сооружений.—Труды Координационного совещания по гидротехнике, 1970, т. 48, с. 125—134.

Гринбаум И. И. Расходометрия гидрогеологических и инженерно-геологических скважин.—М.: Недра, 1975. 271 с.

Гроссман И. И., Глазунов Е. М., Канаев Ф. С. Строительство подземных сооружений электростанций на Крайнем Севере.—М.: Энергия, 1979. 128 с.

Грохульский Я. Программа комплексного освоения р. Вислы и водных ресурсов Польской Народной Республики.—Гидротехническое строительство, 1979, № 9, с. 14—17.

Грунтоведение/Под ред. Е. М. Сергеева.—М.: Изд-во МГУ, 1973. 387 с.

Губин И. Е. О путях нового сейсмического районирования.—Труды Координационного совещания по гидротехнике, 1974, вып. 94, с. 12—14.

Губин И. Е. Геология и землетрясения.—В кн.: Сейсмотектоника южных районов СССР. М., 1978, с. 5—15.

Гудилин И. С., Комаров И. С. Применение аэрометодов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях.—М.: Недра, 1978. 319 с.

Гупта Х., Растиги Б. Плотины и землетрясения.—М.: Мир, 1979. 245 с.

Гуреев А. М., Могилевская С. Е. Изучение морфологии поверхности трещин в скальных породах в связи с ее влиянием на сопротивление сдвигу.—Труды Координационного совещания по гидротехнике, 1972, вып. 77, с. 30—32.

Гуреев А. М. Инженерно-геологическая модель скального массива в основании гидротехнических сооружений.—Труды Координационного совещания по гидротехнике, 1972, вып. 77, с. 7—14.

Доманский Л. К. Выбор типа высоких плотин на реках Сибири.—Труды Координационного совещания по гидротехнике, 1974, вып. 90, с. 25—31.

Джигаури Г. М. Первая Храмская плотина на р. Храми.—Геология и плотины, 1967, т. 5, с. 90—103.

Емельянов В. А. Иркутская плотина на р. Ангаре.—Геология и плотины, 1962, т. 2, с. 7—23.

Жиленков В. Н. Экспериментальные исследования фильтрационной прочности заполнителя тектонических трещин в скальном основании Нурекской ГЭС.—Труды Координационного совещания по гидротехнике, 1970, т. 48, с. 135—149.

Жуковский С. Я., Каган А. А. Нарвская плотина на р. Нарве.—Геология и плотины, 1964, т. 4, с. 72—81.

Золотарев Г. С. Вопросы инженерно-геологических исследований для проектирования и строительства подземных сооружений в горноскладчатых областях.—Труды Гидропроекта, 1974, сб. 36, с. 47—65.

Золотарев Г. С. Плотины, ГАЭС и устойчивость высоких склонов.—В кн.: Проблемы повышения эффективности и качества изысканий для гидротехнического строительства. М., 1979, с. 10—24.

Зурабов Г. Г., Бугаева О. Е. Гидротехнические тоннели электростанций.—М.: Госэнергоиздат, 1962. 153 с.

Иванова Н. Б., Чернышев С. Н. Обработка на ЭВМ массовых измерений трещиноватости.—Труды ПНИИГИС, 1974, вып. 26, с. 184—194.

Изменение инженерно-геологических условий в основании плотины Братской ГЭС за 15 лет эксплуатации/Суханов Г. К., Савинская М. К., Тиздель Р. Р., Сотникова Н. П.—Гидротехническое строительство, 1978, № 4, с. 12—18.

Изучение напряженного состояния массивов горных пород в инженерно-геологических целях.—М.: Изд-во МГУ, 1968. 136 с.

Ингурская ГЭС на р. Ингуре/Джигаури Г. М., Мастицкий А. К., Кереселидзе С. Б.—Геология и плотины, 1980, т. 8, с. 25—56.

Инженерно-геологическое изучение обвалов и других гравитационных явлений на склонах.—М.: Изд-во МГУ, 1969. 139 с.

Инженерно-геологические изыскания для строительства гидротехнических сооружений/Под ред. Е. С. Карышева.—М.: Энергия, 1972. 376 с.

Инженерно-геологические исследования для гидроузлов на мерзлых скальных основаниях/Гуреев А. М., Воронков О. К., Федоренко А. И., Сапегин Д. Д.—Труды Гидропроекта, 1978, сб. 65, с. 53—65.

Инструкция и краткие методические указания по крупномасштабной инженерно-геологической съемке для гидротехнического строительства.—М.: Энергия, 1966. 108 с.

Инструкция и краткие методические указания по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытных откачек из скважин. И-38—67.—М.: Энергия, 1967. 184 с.

Инструкция по инженерно-геологической документации строительных выемок при гидротехническом строительстве. И-40—68.—М.: Энергия, 1968. 55 с.

Инструкция по мелкомасштабной инженерно-геологической съемке для гидротехнического строительства. И-35—65.—М.: Энергия, 1965. 68 с.

Каган М. Л., Кривоногова Н. Ф. Многолетнемерзлые скальные основания сооружений.—Л.: Стройиздат, 1978. 208 с.

Каган А. А., Чечот В. З., Туткевич В. А. Опыт инженерно-геологического изучения участка строительства Токтогульской ГЭС.—Труды Гидропроекта, 1976, сб. 48, с. 206—219.

Калачев Б. Б., Чечот В. З., Молоков Л. А. Плотина Наглу на р. Кабул.—Геология и плотины, 1972, т. 6, с. 154—171.

Калинина П. И. Новосибирская плотина на р. Оби.—Геология и плотины, 1964, т. 4, с. 24—38.

Калмыкова Н. И., Молоков Л. А. Чарвакская плотина на р. Чирчик.—Геология и плотины, 1962, т. 2, с. 140—151.

Канаев Ф. С. Роль трещиноватости пород при производстве работ в гидротехническом строительстве.—М.: Информэнерго, 1972. 50 с.

Канаев Ф. С., Пашикян Е. М. Руководство по составлению инженерно-геологической документации подземных гидротехнических выработок.—М.: Информэнерго, 1976. 86 с.

*Карлсон А. А., Молоков Л. А.* Задачи и способы натурных наблюдений за разуплотнением и сжатием пород в основании плотин.—Труды Гидропроекта, 1978, сб. 65, с. 119—125.

*Карпышев Е. С.* Волжская плотина на р. Волхов.—Геология и плотины, 1972, т. 4, с. 7—17.

*Карпышев Е. С., Молоков Л. А.* Основные положения методики инженерно-геологических изысканий для строительства подземных гидротехнических сооружений.—Труды Гидропроекта, 1974, сб. 36, с. 38—47.

*Карпышев Е. С., Молоков Л. А.* Прогнозирование при инженерно-геологических изысканиях.—В кн.: Проблемы повышения эффективности и качества изысканий для гидротехнического строительства, М., 1979, с. 25—33.

*Карташов А. А., Нейштадт Л. И.* Сарсанский гидроузел на р. Тертере.—Геология и плотины, 1974, т. 7, с. 110—124.

*Каякин В. В.* К вопросу построения инженерно-геологических моделей скальных оснований высоких плотин.—Труды Гидропроекта, 1977, сб. 50, с. 127—140.

*Каякин В. В., Каякина А. И.* Модели фильтрационных свойств скальных оснований высоких плотин.—Труды Гидропроекта, 1978, сб. 65, с. 90—104.

*Кереселидзе С. Б., Мастицкий А. К.* Разгрузка и выветривание карбонатных пород склонов долины р. Ингурин в створе арочной плотины Ингурин-ГЭС.—В кн.: Вопросы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания, М., 1971, с. 84—97.

*Керкис Е. Е.* Методы изучения фильтрационных свойств горных пород.—М.-Л.: Недра, 1975. 231 с.

*Кириченко Н. И.* Чиркейская плотина на р. Сулак.—Геология и плотины, 1962, т. 2, с. 90—103.

*Кириченко Н. И.* К вопросу о пороге сопротивления мелкозема при вымывании его из трещин в скальных породах.—Труды Координационного совещ. по гидротехнике, 1970, т. 48, с. 170—174.

*Количко А. В., Рац М. В.* Трещиноватость нижнекаменноугольных известняков района Токтогульской ГЭС и ее влияние на инженерно-геологические условия строительства.—Труды Гидропроекта, 1966, сб. 14, с. 104—122.

*Количко А. В., Филь В. Н.* Оползни в прочных осадочных породах в районе гидроузлов на р. Вахш.—В кн.: Геологические закономерности развития оползней, обвалов, селевых потоков. Вып. 2. М., 1976, с. 4—18.

*Колмогорова В. Г., Колмогорова П. П., Лапин П. С.* Характер современных движений земной коры на западном участке трассы БАМ.—В кн.: Сейсмическая опасность и сейсмостойкое строительство района БАМ. Иркутск, 1979, с. 28—29.

*Коломенский Н. В.* Инженерная геология. Ч. 2.—М.: Госгеолтехиздат, 1956. 317 с.

*Комаров И. С.* Накопление и обработка информации при инженерно-геологических исследованиях.—М.: Недра, 1975.

*Комаров И. С.* Некоторые аспекты применения математики и вычислительной техники в инженерной геологии.—Труды Гидропроекта, 1972, сб. 23, с. 221—229.

*Комаров И. С., Хайме Н. М., Бабенщев А. П.* Многомерный статистический анализ в инженерной геологии.—М.: Недра, 1976. 199 с.

*Комплексная интерпретация материалов аэростыков при изучении структуры интрузивных массивов.*—Л.: Недра, 1972. 139 с.

*Кондратьев В. Ф.* Применение метода ЭГДА для исследования фильтрации в районе строительства высоконапорных сооружений, возведенных на трещиноватых скальных породах.—Труды Координационного совещ. по гидротехнике, 1970, т. 48, с. 230—237.

*Конярова Л. П.* Днепродзержинская плотина на р. Днепре.—Геология и плотины, 1962, т. 2, с. 57—67.

*Конярова Л. П., Нейштадт Л. И.* Инженерно-геологические условия строительства плотин на изверженных породах.—Геология и плотины, 1963, т. 3, с. 9—73.

*Конярова Л. П.* Плотина Днепровской ГЭС им. Ленина.—Геология и плотины, 1972, т. 6, с. 18—33.

*Конярова Л. П., Молоков Л. А.* Кременчугская плотина на р. Днепре.—Геология и плотины, 1962, т. 2, с. 41—56.

*Корешков Н. А., Пискулин В. А., Ройзман А. П.* О состоянии и некоторых результатах геодезических работ на геодинамических полигонах Средней Азии.—В кн.: Современные движения земной коры. Новосибирск, 1978, с. 59—67.

*Корженко Л. И.* Основания и фундаменты в условиях Урала.—Свердловск. кн. изд-во, 1963. 148 с.

*Краминин П. И., Чернов Ю. К., Штейнберг В. В.* Ускорение колебаний скальных и рыхлых грунтов при сильных землетрясениях.—Вопросы инженерной сейсмологии, 1973, вып. 15, с. 6—34.

*Кропоткин П. Н.* Методы изучения напряженного состояния земной коры и составления карты тектонических напряжений.—В кн.: Отражение современных полей напряжений и свойств пород в состоянии скальных массивов. Апатиты, 1977, с. 3—11.

*Кривоногова Н. Ф., Братищева Н. Г.* Методика документации и обработки фактического материала по криогенному строению скальных пород.—Труды Гидропроекта, 1976, сб. 51, с. 20—31.

*Крылов А. Е.* Исследование естественного напряженного состояния скального массива в основании арочной плотины Ингурин-ГЭС.—Труды Координационного совещ. по гидротехнике, 1972, вып. 77, с. 13—16.

*Кудояров Л. И.* Задачи изысканий и проектирования в связи с гидроэнергетическим освоением Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока.—Труды Гидропроекта, 1976, сб. 48, с. 6—19.

*Кунинин П. В.* Ладжанурская плотина на р. Ладжанури.—Геология и плотины, 1964, т. 4, с. 90—106.

*Куперман В. Л., Мызников Ю. Н., Плотников В. Н.* Усть-Хантайские плотины.—М.: Энергия, 1977. 152 с.

*Кутепов В. М.* Закономерности в распределении естественных напряжений в массивах скальных трещиноватых пород склонов речных долин.—В кн.: Напряженное состояние земной коры. М., 1973, с. 135—147.

*Ландшафтная индикация природных процессов.*—М.: Наука, 1976. 206 с.

*Леонов М. П., Мазуров О. С., Пирогов И. А.* Красноярская плотина на р. Енисее.—Геология и плотины, 1967, т. 5, с. 166—168.

*Леонов М. П.* О построении и использовании карт интенсивности трещиноватости пород скальных оснований гидротехнических сооружений.—Труды Гидропроекта, 1977, сб. 65, с. 144—157.

*Леонов Н. Н., Стром А. Л.* Применение палеосейсмологического метода при оценке сейсмической опасности (на примере Рогунской ГЭС).—В кн.: Проблемы повышения эффективности и качества изысканий для гидротехнического строительства. М., 1979, с. 64—71.

*Липкинд В. М.* Современная практика проектирования высоких бетонных плотин.—Труды Координационного совещ. по гидротехнике, 1974, вып. 90, с. 19—25.

*Ломизе Г. М.* Фильтрация в трещиноватых породах.—М.: Госэнергоиздат, 1951. 127 с.

*Ломоносов Н. Ф.* Прогнозирование устойчивости скальных пород в тоннелях глубокого заложения.—В кн.: Вопросы инженерной геологии при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений. Л., 1969, с. 31—35.

*Ломтадзе В. Д.* Инженерная петрология.—Л.: Недра, 1970. 528 с.

*Ломтадзе В. Д.* Инженерная геология. Инженерная геодинамика.—Л.: Недра, 1977. 416 с.

*Лыкошин А. Г.* Павловская плотина на р. Уфе.—Геология и плотины, 1959, т. 1, с. 35—60.

*Лыкошин А. Г.* Инженерно-геологические условия строительства плотин на карбонатных породах.—Геология и плотины, 1963, т. 3, с. 74—109.

- Лыкошин А. Г.** Карст и гидротехническое строительство.—М.: Госстройиздат, 1968. 182 с.
- Лыкошин А. Г.** Современные проблемы и вопросы инженерно-геологических изысканий для гидротехнического строительства.—Труды Гидропроекта, 1976а, сб. 48, с. 20—31.
- Лыкошин А. Г.** Вопросы изучения фильтрационных деформаций и неоднородности проводимости горных пород.—Труды Гидропроекта, 1976б, сб. 49, с. 74—80.
- Лыкошин А. Г.** Современные задачи инженерно-геологического изучения скальных оснований гидротехнических сооружений.—Труды Гидропроекта, 1978а, сб. 65, с. 3—9.
- Лыкошин А. Г.** Современные методические принципы изучения карста в связи с гидротехническим строительством.—Труды Гидропроекта, 1978б, сб. 65, с. 74—80.
- Лыкошин А. Г.** Основные принципы методики проведения изысканий и инженерно-геологического прогнозирования.—В кн.: Прогнозирование в инженерно-геологических изысканиях для гидротехнического строительства. М., 1980, с. 3—8.
- Лыткин В. А.** Механизм пучения пород в подземных выработках.—М.: Недра, 1965. 110 с.
- Маменко Г. К.** Камская плотина на р. Каме.—Геология и плотины, 1967, т. 5, с. 5—39.
- Маслов Н. Н., Павлищева Т. В.** К вопросу о прогнозе деформаций смещения скальной толщи, рассеченный трещинами как основания напорного сооружения.—Инженерная геология и механика грунтов, 1976, вып. 128, с. 33—46.
- Маслов Н. Н., Павлищева Т. В.** Прогноз деформаций смещения напорных сооружений как критерий определения мощности съема выветрелых скальных пород и глубины укрепительной цементации.—В кн.: Проблемы повышения эффективности и качества изысканий при гидротехническом строительстве. М., 1979, с. 34—46.
- Марков А. Н.** Влияние геологического строения скальных массивов Центрального и Восточного Казахстана на строительство гидротехнических сооружений.—Гидротехническое строительство, 1975, № 2, с. 13—15.
- Медведев С. В.** Инженерная сейсмология.—М.: Госстройиздат, 1962. 281 с.
- Методическое пособие по изучению горных пород.**—М.: Изд-во МГУ, 1968, т. 1, 347 с.; т. 2, 370 с.
- Методические рекомендации по проектированию оптимальных врезок для сопряжения бетонных плотин со скальным основанием, П-634—75.**—М.: Энергия, 1978. 29 с.
- Методические рекомендации по сейсмическому районированию территории СССР.**—М.: Наука, 1974. 195 с.
- Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке.**—М.: Недра, 1977. 143 с.
- Методические указания по гидрогеологической съемке на закрытых территориях в масштабах 1:500 000, 1:200 000 и 1:50 000.**—М.: Недра, 1969. 142 с.
- Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии.**—М.: Недра, 1972. 295 с.
- Мировая энергетика и гидростроительство.**—Гидротехническое строительство, 1977, № 4, с. 57—61.
- Михайлов А. Е.** Полевые методы изучения трещин в горных породах.—М.: Госгеолтехиздат, 1956. 127 с.
- Михайлов А. Е.** Аэрометоды при геологических исследованиях.—М.: Недра, 1973. 432 с.
- Михайлов А. Е.** Структурная геология и геологическое картирование.—М.: Недра, 1973. 432 с.
- Молоков Л. А.** Каходская плотина на р. Днепре.—Геология и плотины, 1959а, т. 1, с. 61—82.
- Молоков Л. А.** Теребля-Рикская плотина на р. Теребле.—Геология и плотины, 1959б, т. 1, с. 83—98.
- Молоков Л. А., Калмыкова Н. И., Разумов В. К.** Опыт инженерно-геологического изучения разуплотнения и выветривания глинистых пород.—В кн.: Вопросы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания. М., 1971, с. 185—210.
- Молоков Л. А., Тулинов Р. Г.** Исследования влияния заполнителя трещин на сопротивление сдвигу скальных пород.—Труды Гидропроекта, 1974, сб. 33, с. 73—85.
- Молоков Л. А.** Об изменении инженерно-геологических условий в процессе строительства.—Труды Гидропроекта, 1976, сб. 48, с. 83—94.
- Молоков Л. А.** Оценка параметров противофильтрационных завес в массиве закартированных известняков.—Труды Гидропроекта, 1978, сб. 65, с. 80—90.
- Мостков В. М.** Подземные сооружения большого сечения.—М.: Недра, 1974. 320 с.
- Мостков В. М., Серков В. С.** Об изучении опыта эксплуатации гидротехнических тоннелей.—Гидротехническое строительство, 1980, № 1, с. 26—28.
- Мюллер Л.** Инженерная геология. Механика скальных массивов.—М.: Мир, 1971. 254 с.
- Натурные исследования несущей способности скальных оснований/Ухов С. Б., Кубецкий С. А., Фишман Ю. А., Лапин Л. В.—** В кн.: Труды Координ. совещ. по гидротехнике. Дискретные среды в гидротехническом строительстве. Л., 1972, с. 43—47.
- Нейштадт Л. И.** Методы геологического изучения трещиноватых горных пород при инженерно-геологических исследованиях.—М.: Госэнергоиздат, 1957. 152 с.
- Нейштадт Л. И.** Гюмушская плотина на р. Раздан.—Геология и плотины, 1959, т. 1, с. 125—150.
- Нейштадт Л. И.** Арзинская плотина на р. Раздан.—Геология и плотины, 1962, т. 2, с. 104—117.
- Нейштадт Л. И., Пирогов И. А.** Методика инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород.—М.: Энергия, 1969. 248 с.
- Николаев Н. И.** Механизм и особенности возникновения землетрясений, связанных с водохранилищами.—Труды Гидропроекта, 1978, сб. 65, с. 9—28.
- Никонов А. А.** Голоценовые и современные движения земной коры. Геолого-геоморфологические и тектонические вопросы.—М.: Наука, 1977, 239 с.
- Назаров А. Г., Дарбинян С. С.** Шкала для определения интенсивности сильных землетрясений на количественной основе.—В кн.: Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М., 1975, с. 40—82.
- Обработка на ЭВМ массовых измерений параметров трещиноватости.**—Труды ПНИИС, 1974, вып. 26, с. 186—193.
- Окуджава В. И.** Сопоставление прогнозируемых и фактических инженерно-геологических условий при строительстве подземных сооружений Интури-ГЭС.—Тезисы докл. и сообщ. IV конференции изыскателей ин-та Гидропроекта. Сер. инженерная геология, 1972, вып. 1, с. 22—26.
- Опытно-фильтрационные работы/Под ред. В. М. Шестакова и Д. Н. Башкатова.**—М.: Недра, 1974. 202 с.
- Панюков П. Н.** Инженерная геология.—2-ое изд.—М.: Недра, 1978.
- Парафучев И. А., Ладыгин В. М.** Инженерно-геологические особенности выветривания гранитоидов Северного Перу.—В кн.: Проблемы повышения эффективности и качества изысканий для гидротехнического строительства. М., 1979, с. 94—105.
- Пашкин Е. М.** Изучение трещиноватости и учет ее роли при строительстве тоннелей Нурекской ГЭС.—Труды Гидропроекта, 1970, сб. 18, с. 324—330.
- Пашкин Е. М.** Расчетные схемы для определения параметров вывалов в гидротехнических тоннелях.—М.: Информэнерго, 1975. 24 с.

- Пашкин Е. М.** Роль структуры массива в прогнозировании устойчивости пород при проходке тоннелей в горно-складчатых областях.—В кн.: Инженерная геология скальных массивов.—М., 1976, с. 145—147.
- Перепускова Л. А.** Иловская плотина на р. Иова.—Геология и плотины, 1964, т. 6, с. 38—53.
- Петрусович М. Н.** Воздушная и наземная стереофотосъемка при геологических исследованиях.—М.: Изд-во МГУ, 1976. 262 с.
- Пестовский К. Н., Разумов В. К.** Плявинская плотина на р. Даугаве.—Геология и плотины, 1972, т. 6, с. 101—122.
- Погребицкий М. И.** Исследование тектонической трещиноватости и ее влияние на условия строительства крупных гидростанций на р. Вахш.—В кн.: Материалы научно-технической конференции ПНИИС. М., 1969, с. 202—206.
- Попова Е. В.** Остаточные деформации грунтов при сильных землетрясениях.—В кн.: Инженерно-сейсмические проблемы. М., 1976, с. 24—36.
- Праведный Г. Х.** Практические рекомендации по противофильтрационным устройствам подземного контура бетонных плотин на скальных основаниях с трещинами тектонического происхождения.—Труды Координационной конференции по гидротехнике, 1970, т. 48, с. 206—214.
- Прочухан Д. П.** Трещины разгрузки в скальных основаниях высоких плотин.—Советская геология, 1964, № 7, с. 76—83.
- Прочухан Д. П., Фрид С. А., Доманский Л. К.** Скальные основания гидротехнических сооружений.—Л.: Стройиздат, 1971. 192 с.
- Радиоизотопные методы исследований в инженерной геологии и гидрогеологии**/Под ред. В. И. Ферронского.—М.: Атомиздат, 1977. 300 с.
- Расчет фильтрации в скальном основании и береговых примыканиях высоких арочных плотин и плотин из местных материалов**/Павловская Л. Н., Григорьева А. В., Стульевич А. В., Федорова В. В.—Труды Координационной конференции по гидротехнике, 1970, т. 48, с. 219—229.
- Рац М. В.** К вопросу о зависимости густоты трещин от мощности слоев.—Докл. АН СССР, 1962, т. 144, вып. 3, с. 22—32.
- Рац М. В.** Неоднородность горных пород и их физические свойства.—М.: Недра, 1968. 106 с.
- Рац М. В.** Структурные модели в инженерной геологии.—М.: Недра, 1974. 211 с.
- Рац М. В.** Инженерная геология массивов горных пород,—узел научных проблем или новая ветвь инженерно-геологической науки.—В кн.: Инженерная геология скальных массивов. М., 1976, с. 8—12.
- Рац М. В., Чернышев С. Н.** Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород.—М.: Недра, 1970. 158 с.
- Ребрик Б. М.** Бурение скважин при инженерно-геологических исследованиях.—М.: Недра, 1979. 251 с.
- Результаты натурных наблюдений за фильтрацией в основании арочной плотины Чиркайской ГЭС в период наполнения водохранилища**/Малышев А. И., Кузьмин В. М., Максимов К. Н., Скоков В. Г.—Труды Гидропроекта, 1978, сб. 65, с. 10—25.
- Рекомендации по изучению трещиноватости горных пород при инженерно-геологических изысканиях для строительства**.—М.: Стройиздат, 1974. 39 с.
- Рихтер Ч. Ф.** Элементарная сейсмология.—М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 670 с.
- Родионов Н. В.** Инженерно-геологические исследования в карстовых районах.—М.: Госгеолиздат, 1958. 216 с.
- Роза С. А., Зеленский Б. Д.** Исследование механических свойств скальных оснований гидротехнических сооружений.—М.: Энергия, 1967. 392 с.
- Розанов Н. П.** Выбор типа высоких плотин при проектировании гидроузлов.—Труды Координационной конференции по гидротехнике, 1974, вып. 90, с. 31—47.
- Розовский Л. Б.** Введение в теорию геологического подобия и моделирования.—М.: Недра, 1969. 127 с.
- Розовский Л. Б., Зелинский И. П.** Инженерно-геологические прогнозы и моделирование.—Одесса, 1975. 115 с.

- Ромм Е. С.** Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород.—М.: Недра, 1966. 283 с.
- Руководство по инженерно-геологическим изысканиям для строительства подземных гидротехнических сооружений**.—М.: Энергия, 1978. 83 с.
- Руководство по поискам, разведке и опробованию естественных минеральных строительных материалов для гидротехнического строительства**.—М.: Энергия, 1978. 147 с.
- Руководство по определению водопроницаемости скальных пород методом опытных нагнетаний воды в скважины**. П-656—75.—М.: Энергия, 1976. 45 с.
- Руководство по определению состава и объема инженерно-геологических изысканий для гидротехнического строительства**. П-651—74.—М.: Энергия, 1974. 107 с.
- Руководство по расчету коэффициента фильтрации трещиноватых скальных массивов по параметрам трещиноватости**.—М.: Стройиздат, 1979. 60 с.
- Руководство по составлению инженерно-геологической документации подземных гидротехнических сооружений**.—М.: Информэнерго, 1976. 87 с.
- Руппенейт К. В.** Деформируемость массива трещиноватых горных пород.—М.: Недра, 1975. 221 с.
- Садов А. В., Ревзон А. Л., Чалидзе Ф. Н.** Изучение экзогенных процессов в районах крупных водохранилищ аэроландшафтными методами.—М.: Недра, 1976. 46 с.
- Сапегин Д. Д.** Исследования деформируемости скальных массивов.—Изв. ВНИИГ, 1973, т. 102, с. 47—58.
- Свойства горных пород и методы их определения**/Под ред. М. М. Протодьяконова.—М.: Недра, 1969. 392 с.
- Сейсмическое микрорайонирование**.—М.: Наука, 1977. 249 с.
- Сейсмическое районирование СССР**.—М.: Наука, 1968. 512 с.
- Сейсмические методы изучения массивов скальных пород**/Савич А. И., Коптев В. И., Никитин В. Н., Ященко З. Г.—М.: Недра, 1969. 238 с.
- Сейсмотектоника и вопросы сейсмической опасности при гидротехническом строительстве**/Савич А. И., Кузьмин И. П., Леонов Н. Н. и др.—В кн.: Проблемы инженерной геологии в гидротехническом строительстве. Тбилиси, 1979, с. 161—167.
- Сергеев Е. М.** Современные задачи инженерной геологии в связи с освоением новых месторождений и строительством инженерных сооружений.—В кн.: Влияние геологических факторов на свойства и состояние массивов горных пород. Апатиты, 1975, с. 3—15.
- Сергеев Е. М.** Инженерная геология — наука о геологической среде.—Инженерная геология, 1979, № 1, с. 3—19.
- Сергеев Е. М., Турчанинов И. А.** Методология анализа инженерно-геологических условий территории строительства и выбора мест заложения подземных сооружений.—В кн.: Сборник трудов Гидропроекта. М., 1979, с. 5—12.
- Собина В. И.** Ондская плотина на р. Онда.—Геология и плотины, 1964, т. 14, с. 53—60.
- Соколов Д. С.** Основные условия развития карста.—М.: Изд-во МГУ, 1962. 316 с.
- Солоненко В. П.** Сейсмовозбужденные обвалы и земляные лавины (на примере Хантайского землетрясения).—В кн.: Геологические закономерности развития оползней, обвалов и селевых потоков. Вып. 2. М., 1976, с. 4—18.
- Справочник по бурению скважин на воду**/Под ред. Д. Н. Башкатова.—М.: Недра, 1979. 565 с.
- Стратиграфический кодекс СССР/ВСЕГЕИ.** Л., 1977. 79 с.
- Строительные нормы и правила. Гидротехнические сооружения**. Гл. СНиП II-12—69. Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования.—М.: Стройиздат, 1972. 26 с.
- Строительные нормы и правила. Нормы проектирования**. Гл. СНиП II-15—74. Основания зданий и сооружений.—М.: Стройиздат, 1975. 64 с.
- Строительные нормы и правила. Нормы проектирования**. Гл. СНиП II-16—76. Основания гидротехнических сооружений.—М.: Стройиздат, 1977. 37 с.

*Сувилова А. В.* Моделирование записи сильного землетрясения для расчета сейсмостойкости.—В кн.: Мат-лы Всесоюзн. конф. по определению степени сейсмоопасности в районах строительства крупных гидроузлов и обеспечению сейсмостойкости плотин. Л., 1972, с. 26—36.

*Талобр Ж.* Механика горных пород.—М.: Стройиздат, 1960. 428 с.

*Тайчер С. И., Мгалебов Ю. Б.* Расчеты устойчивости скальных упоров арочных плотин.—М.: Энергия, 1972. 120 с.

*Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве.*—М.: Энергия, 1972. 208 с.

*Тиздель Р. Р.* О глубине врезок бетонных плотин в скальные основания.—Труды Гидропроекта, 1976, сб. 48, с. 94—99.

*Ткачук Э. И.* Полевые методы инженерно-геологического изучения горных пород (массив горных пород как объект исследований), Новочеркасск, 1977. 87 с.

*Ткачук Э. И.* Зависимость раскрытия трещин от глубины залегания пород.—В кн.: Гидрогеология и инженерная геология. Новочеркасск, 1978, с. 158—161.

*Токтогульская ГЭС* на р. Нарын/Каган М. Л., Каякин В. В., Молоков Л. А., Чечот В. З.—Геология и плотины, 1980, т. 8, с. 30—44.

*Толоконников И. С.* Ереванская плотина на р. Раздан.—Геология и плотины, 1974, т. 6, с. 79—95.

*Турчанинов И. С., Иофис М. А., Каспарян Э. В.* Основы механики горных пород.—Л.: Недра, 1977. 503 с.

*Указания по проектированию гидротехнических тоннелей.* СН-238-73.—М.: Стройиздат, 1974. 40 с.

*Ухов С. Б.* Скальные основания гидротехнических сооружений.—М.: Энергия, 1975. 363 с.

*Федоренко В. С.* Геологоструктурное изучение разрывных форм скальных массивов при изысканиях высоких плотин.—Труды Гидропроекта, 1966, сб. 14, с. 6—42.

*Федоренко В. С.* Основные закономерности формирования и типы оползней и обвалов в долинах рек бассейна Зеравшана.—В кн.: Геологические закономерности развития оползней, обвалов и селевых потоков. Вып. 2. М., 1976, с. 26—39.

*Финько Е. А.* Современные движения земной поверхности в зоне Сурхабского разлома.—Геотектоника, 1971, № 5, с. 16—28.

*Фисенко Е. А.* Предельное состояние пород вокруг выработок.—М.: Недра, 1976. 272 с.

*Фисенко Г. Л., Кагермазова С. В.* Закономерности выветривания и осыпания пород в откосах открытых горных выработок.—В кн.: Вопросы инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания. М., 1971, с. 132—145.

*Фишман Ю. А.* Развитие механики скальных массивов и исследований скальных оснований гидротехнических сооружений в СССР.—Труды Гидропроекта, 1974, сб. 33, с. 3—31.

*Фишман Ю. А.* Сравнение характеристик прочности и деформируемости скальных оснований и бетонных плотин.—Труды Гидропроекта, 1976, сб. 50, с. 3—27.

*Фишман Ю. А.* Расчеты устойчивости и прочности скальных оснований бетонных плотин.—Гидротехническое строительство, 1976а, № 5, с. 16—18.

*Фишман Ю. А.* О методике исследований сопротивляемости сдвигу бетонных штампов на скальном основании.—Труды Гидропроекта, 1976б, сб. 50, с. 54—69.

*Фрид С. А.* Проблема устойчивости при проектировании бетонных плотин.—Труды Ленгидропроекта, 1967, вып. 5, с. 12—26.

*Хайн В. Е.* Общая геотектоника.—М.: Недра, 1973. 502 с.

*Хаст Н., Нильсон Т.* Измерения напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин.—Проблемы инженерной геологии, 1967, вып. 4, с. 13—21.

*Цытович Н. А.* Механика грунтов.—М.: Госстройиздат, 1973. 533 с.

*Чернышев С. Н.* Экзогенные деформации траппов в долине р. Ангары.—Изв. вузов. Геология и разведка, 1965, № 12, с. 36—42.

*Чечот В. З., Каякин В. В., Каган М. Л.* Модель трещиноватого скального массива (на примере Токтогульского гидроузла на р. Нарын).—Труды Координационного совещ. по гидротехнике, 1972, вып. 77, с. 33—40.

*Чечот В. З., Каякин В. В.* Инженерно-геологическое районирование долин рек для гидротехнического строительства в Средней Азии.—Труды Гидропроекта, 1976, сб. 48, с. 174—182.

*Чураев Н. В., Ильин Н. И.* Радиоиндикационные методы исследования движения подземных вод.—М.: Атомиздат, 1973. 175 с.

*Шатирян С. Н.* Пресснотометрический комплекс ПТ-1.—Экспресс-информация Минэнерго СССР. Сер. Строительство гидроэлектростанций, 1977, вып. 9, с. 22—27.

*Швец В. Б.* Элювиальные грунты как основание сооружений.—М.: Стройиздат, 1964. 199 с.

*Шатский Н. С.* О некоторых насущных задачах геотектоники.—Избранные труды, 1965, т. 4, с. 61—67.

*Шаумян Л. В.* Физико-механические свойства массивов скальных пород.—М.: Наука, 1972. 119 с.

*Шебалин Н. В.* Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании.—В кн.: Сейсмическое районирование СССР. Ч. 2. М., 1968, с. 95—111.

*Шульц С. С.* Планетарная трещиноватость (основные положения).—Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. 176 с.

*Bolt B., Lomnitz C., Mc Evilly T.* Seismological evidence on the tectonics of central and northern California and the Mendocino escarpment.—Bull. Seismol. Soc. Amer., 58, N 6, 1968, p. 1725—1768.

*Brune G. I.* Seismic sources, fault plane studies and tectonics.—Trans. Amer. Geophys. Union, 1971, 52, N 5, p. 178—187.

*Dewey J.* Seismicity of Northern Anatolia. BSSA, N 3, v. 66, p. 843—868.

*Dziewański J.* 1960. Prace geologiczne w budownictwie wodno—energetycznym. Wszechświat, N 5, s. 124—130.

*Dziewański J.* 1963. Określenie przyczepności i współczynnika tarcia betonu w skalach facji fliszowej.—Gosp. Wod. N 1.

*Dziewański J.* 1967. Badania geologiczno—inżynierskie w poszczególnych fazach projektowania hydrotechnicznego.—Przegl. Geol., nr 4, s. 182—185.

*Dziewański J.* 1973. Geologiczne warunki posadowienia zapor w skalach facji fliszowej (na przykładzie górnego Sanu). PAN Kom. Geol. Prace Geol. N 79, Warszawa.

*Dziewański J., Glazer Z., Köhsling J.* 1972. Parametry inżyniersko—geologiczne podłoża zapory wodnej w Młotach.—Przegl. Geod., N 4, s. 198—207.

*Dziewański J., Köhsling J.* 1973. Metodyka określania własności fizyczno—mechanicznych górotworu podłoża zapory w Dobromierzu.—Gospod. Wodna, nr. 7, s. 252—258.

*Dziewański J., Kunstman A., Sekiewicz J., Urbańczyk K., Wilk J.* 1975. Badania metodami numerycznymi i analogowymi przepływu wód w metamorficznych szczelinowatych skalach.—Gospod. Wodna N 12, s. 366—370.

*Earthquake origin zones and distribution of maximum expected seismic intensity for the Balkan region.* Shebalin N. V., Reisner G. I., Drumea A. V. e. a.—Proc. seminar seismic zoning maps, 1976, v. 11, UNESCO. Scopje.

*Jaworski W.* 1969. Badania ciśnien dopuszczalnych cementacji w shalach litych.—Przegl., N 3, Warszawa.

*Jaroszewski W.* 1974. Tektonika uskoków i faldów.—Wyd. Geol. Warszawa.

*Hahn W.* 1958. Baugrund—Grossversuch an der Rappbodenstaumauer zur Nachweis der Stand und Gleitsicherheit.—Wasserwirtschaft—WasserTechnik, N 4.

*Hänenchen H.* Einige ingenieurgeologische probleme beim Bau der Talsperre Pohl.—Z. angew. Geol., Hft 10, 1959, s. 463—469.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

*Louis C.*, 1967. Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen in Fels. Dissertation Universitet (TH) Karlsruhe.—Veroff. Inst. Boden mech und Felsmechanik. 1967, 140 S.

*McEvilly T. V., Niazi M.*, 1975. Past earthquake observations of Dasht-e-Bayas, Iran.—*Tektonophysica*, 26, N 2, 1975, p. 267—279.

*Muchowski J., Stochlak J.*, 1965a. Określenie wodochlonności szczelinowych skał litych w badaniach inżyniersko—geologicznych.—*Archiwum Hydrotechniki*, z. 4, s. 365—387.

*Muchowski J., Stochlak J.*, 1965 b. Analiza wpływu warunków przeprowadzenia badań wodochlonności skał litych na ich wyniki dla potrzeb inżyniersko—geologicznych.—*Przegl. Geol.* 2.

*Reuner F.*, 1958. Die Wasserdurchlässigkeitsprüfungen und Baugrundvergutung als ingenieurgeologische Untersuchungsmethoden bei Talsperren.—*Z. angew. Geol.*, 4, 2, S. 167—174.

*Reuter F.*, 1970. Hauptprobleme der Ingenieurgeologie in der DDR. Bergakademie, Freiberg 22, 4 S. 198—204.

*Reuter F., Molek H., u. Meier G.*, 1971. Beziehungen zwischen Gebirgsfestigkeit und Karsterscheinungen in Salzkarst der DDR.—*Neue Bergbautechn.*, 1, 1, S. 14—20.

*Reuter F.*, 1972. Die anthropogen—geodynamischen Prozesse aus der Sicht der Geotechnik.—*Z. angew. Geol.*, 18, 2, S. 76—81.

*Reuter F.*, 1973. Injektionen zur Verbesserung von Baugrund und Bauwerk, eine Bewertung des gegenwärtigen Entwicklungsstandes.—*Neue Bergbautechn.*, Leipzig, 3, 4, S. 257—266.

*Rochlitzer I.*, 1967. Probleme der Speicherwirtschaft und des Talsperrenbaues in der DDR. Besondere Mitt., Z. IX, Internat. Talsperren-Kongr., Berlin.

*Rudeloff I.*, 1960. Steinbrecher K. Masznahmen zur Abdichtung des Untergrundes der Ohratalsperre. WWT, Hft 12, S. 555—560.

*Scheidegger A. E.*, 1975. Phisic aspects of geological processes.

*Stapledon D. H.*, 1976. Geological hazards and water storage.—*Bull. Inst. Assoc. Engng. Geol.*, N 14, p. 249—262.

*Seismic risk and engineering decision*, Amsterdam—Oxford—New-York, 1976.

*Szczelinowatość masywów skalnych*. Red. Liszkowskiego J. i Stochlaka J., 1976. Wyd. Geol. Warszawa. 312 S.

*Thiel K.*, 1968. Metodyka określania własności fizyko-mechanicznych podłoża skalnego przy projektowaniu zapór wodnych. Prace Inst. Org. i Mech. Bud. Warszawa. 96 S.

*Thiel K.*, 1973. O kryteriach zniszczenia zespołów skalnych w świetle polowych badań bezpośredniego ścinania. Rozprawy hydrotechniczne. Zeszyt 32, s. 278—290.

*Wittke W.*, 1970. Three-dimensional percolation of fissured rock. Planning open pit mines.—*Proc. Symposium on the planning of open pit mines with special reference to slope stability*. Johannesburg, p. 181—191.

Авторегуляция геологических систем 33

Анизотропия 31, 82, 172

— ортогональная 83

— пространственная 83

— трансверсальная 83

Анкерование 103, 108, 131, 178

Аэровизуальные наблюдения 224

Аэрометоды 218

Аэрофотосъемка 288

Блочность 81, 127, 246

Буровые работы 205, 209, 213, 231

Взаимодействие массивов горных пород и сооружений 34, 231, 234

Вещественный состав массивов горных пород 31, 61, 233

Водопроницаемость 181, 249

Водохранилища:

Кариба 120

Койна 120

Кремаста 120

Временное сопротивление сжатию 208, 210

Вулканические выбросы 180

Вулканогенные породы 179

— образования 180

Вывалы 125

Выбросы газа 134

Выветривание 58, 116, 157, 247

Габбро 189

Газоносность пород 318

Геологическое тело:

простое 34, 234

сложное 34, 235

Геомеханические исследования 272

Геотермическая ступень 135

Геофизические методы 207

Гидрогеологические исследования 208, 210, 233, 248

Гидрогеологическое моделирование 233, 269

Гидрохимические исследования 210, 262

Гидроузел 12

Гидроэлектростанция:

Арзинская 179, 182

Братская 18, 115, 150

Богучанская 150

Буреинская 187

Бухтарминская 189

Вилуйская 23

Волжская ГЭС им. В. И. Ленина 142

Волховская 18, 141

Гергебильская 21

Гюмушская 128, 323

Днепровская ГЭС им. В. И. Ленина (ДнепроЭС-1) 18

Днепродзержинская 86, 149

Ереванская 92, 179, 181

Зейская 19, 188

Ингири 21, 166

Иловская 56

Ириклинская 184

Иркутская 24, 117

Камская 119, 146

Капчагайская 24

Каховская 144, 327

Колымская 194, 323

Красноярская 18, 186, 217, 257

Кременчугская 149

Ладжанурская 21

Мингечаурская 24, 91, 163, 325

Мичковце 160

Наглу 75

Нарвская 101, 141

Нива-III 26

Новосибирская 91, 155

Нурекская 23, 128, 156, 332

Ора 184

Павловская 142, 229, 327

Пепанская 267, 315

Пель 182, 183

Плявиньская 26, 141

Раппбоде 18, 114

Сарсангская 184, 331

Саратовская 26

Саянская 178, 329

Солина 18, 160

Теребля-Рикская 15, 158

Токтогульская 18, 169, 213

Усть-Илимская 152, 211

Усть-Каменогорская 189, 210

Хантайская 23, 26

Храмы-1 75, 105, 180

Чарвакская 22, 173

Чиркейская 26, 124, 168

Чир-Юртская 125

Горные работы 212, 231, 233

Горно-буровые работы 231, 233

Горное давление 99

Горные породы:

скальные 77

полускальные 78

Горные удары 132

Гравиразведка 228, 292

Гравитационные процессы 73

Граниты 148, 186

Гранитоиды 148, 185

Дешифрирование аэроснимков 224

— разломов 225

— трещиноватости 225

Диаграмма трещиноватости 244

Документация:

подземных сооружений 215

строительных котлованов 214, 238

Здания гидроэлектростанций 25

Землетрясения:

вызванные заполнением водохранилищ 120

воздействие на сооружения 203

Зона:

азрации 252

разуплотнения 95, 168, 177, 179

съемка 156, 159, 179, 186, 205, 212, 328

Изменчивость пространственная 79, 81

Индикаторы ландшафтные 220

Индикаторные методы 258

Инженерно-геологические элементы 34

Интенсивность землетрясений 302, 314

Инструментальные наблюдения за землетрясениями 302

Исследования инженерно-геологические:

детальные 212, 231

региональные 207, 218

Каранкулиты 72, 173

Карст 68

— древний 72

— изучение 68, 288

— карбонатный 68, 288

— классификация 70  
 — развитие 71  
 Карты:  
     зон возникновения землетрясений 310  
     мощности активного слоя 311  
     неотектонических движений 311  
     очаговых зон 312  
     трещиноватости 239, 246  
 Классификация:  
     инженерно-геологических процессов 98, 100, 105  
      массивов горных пород 138  
     по величине водопроницаемости  
     по степени сохранности 76  
     трещин 42  
     трещиноватых массивов 50  
 Колымаж 117, 119, 251  
 Коры выветривания 58  
 Коэффициент:  
     отпора 86, 131, 273, 280  
     Пуассона 65, 86, 273  
     размягчаемости 85  
     фильтрации 84, 89, 249  
 Космические снимки 218, 288  
 Крепость пород 86, 322  
 Крип 105, 107, 193, 317  
 Круговые диаграммы 244  
  
 Ландшафтно-индикационный метод 221  
 Литолого-стратиграфический комплекс 246  
 Льдистость скальных пород 191  
  
 Магнитуда 203, 301  
 Макросейсмические шкалы 301  
 Массив горных пород 29, 137  
 Масштабный эффект 84, 276  
 Метод:  
     касательных напряжений 278  
     конечных элементов 257, 270  
     инженерно-геологических аналогий 202, 204, 257  
     лабораторного моделирования 203  
     напорных камер 281  
     разгрузки 272  
     торцовый 271  
     щели 280  
 Многолетнее промерзание 191  
 Многолетнемерзлые породы 190, 212  
 Модель:  
     априорная 198  
     дискретной среды 80  
     структурная 198, 233  
     сплошной среды 80  
     трещиноватости 202, 206, 238  
     физических полей 233, 269  
     фильтрационная 199, 202, 233, 265  
 Модуль:  
     деформации 86, 273, 280, 287  
     упругости 87  
  
 Наблюдения:  
     за изменениями гидрогеологических условий 210, 215, 256, 292  
     за развитием геологических процессов 214, 216, 293  
     за эксплуатацией сооружений 216  
 Нагнетание воздуха в скважины 249, 256  
 Напряженное состояние 270, 297  
 Напорно-силовые деформации 117, 214  
 Нарушение устойчивости:  
     кровли стенок подземных сооружений 97, 125  
     оснований 101, 109  
     откосов 101, 103  
     склонов 101, 103  
 Неоднородность 79  
 Новейшая тектоника 207, 309

Обвалы 74  
 Объемная масса:  
     породы 208  
     скелета грунта 210  
 Оползни 76  
 Опытно-строительные работы 216, 333  
 Опытно-фильтрационные исследования 210, 249  
 Опытные нагнетания 210, 213, 250  
     — нагрузки на штанги 110, 113, 169, 187, 276  
     — откачки 211, 213, 251  
  
 Палеосейсмологические исследования 305  
 Параметры сопротивления сдвигу 273  
 Пирокластические образования 179  
 Период повторяемости землетрясений 310  
 Петрографические исследования 331  
 Плиты:  
     арочные 20  
     бетонные 17  
     гравитационные 17  
     земляные 23  
     каменнонабросные 222  
     контрфорсные 19  
 Повышение температуры 135  
 Подземная эрозия 62, 97, 117, 264  
 Подземные воды 61, 258  
     — здания ГЭС 26  
 Поле напряжений 64  
     — тепловое 63  
 Потери на фильтрацию 152, 179, 184, 208, 249  
 Прессометрия 276  
 Притоки воды в подземные выработки 133, 249  
 Прогноз инженерно-геологический 200, 212  
 Прорывы воды в подземные выработки 99, 133  
 Процессы инженерно-геологические 68, 93  
 Прочностные исследования 85, 208, 282  
 Псевдоподлубучесть 113, 115  
 Пучение 99, 132  
  
 Рабочие чертежи 207, 214  
 Радиоактивные индикаторы 258  
 Радиолокационная съемка 230  
 Разведка месторождений строительных материалов 330  
 Разломы 52, 235  
 Разуплотнение пород 49, 93, 101  
 Расплывание 105, 191, 299  
 Расходометрия 242, 254  
 Режимные наблюдения 260  
 Резистивиметрия 242  
 Рухляковая зона 60, 149  
  
 Сапролит 56, 60, 149  
 Свойства горных пород:  
     деформационные 31  
     прочностные 31  
     общие фильтрационные 31  
 Свойства массива горных пород 31, 77  
 Сейсмическая опасность 178, 212, 300  
     — активность территории 207, 304  
 Сейсмическое районирование:  
     обзорное 212, 300, 304  
     детальное 212, 304  
     микрорайонирование 212, 305, 314  
 Сейсмический момент 114  
 Сейсмичность территории 113, 207, 212  
 Сейсмоакустические исследования 111, 228, 240, 273, 299  
 Сеть трещин 38  
 Сила землетрясений 123, 301  
 Системы трещин 41  
 Сооружения водосборные 24  
     — водопроводящие 24  
 Сотрясаемость территории 311  
  
 Стреляние пород 99, 132  
 Структурные неоднородности 34, 233  
 Структура массива пород 30, 34, 233  
     — горизонтально-слоистая 37  
     — блоковая 37  
     — складчато-блоковая 37  
 Суффозия:  
     механическая 62, 98, 117, 176, 187, 215, 263, 324  
     химическая 98, 117, 215, 261, 324  
 Схема комплексного использования реки 206  
 Съемка:  
     инженерно-геологическая 207  
     радиометрическая 258  
     тепловая 298  
  
 Тектонические нарушения 148, 169, 308  
 Температурный режим 298  
 Тензорный метод 257  
 Технико-экономическое обоснование 206, 209  
 Технический проект 207, 211  
 Туннели гидротехнические 25  
 Трециноватость 37, 148, 283  
     — лавовых потоков 37  
     — метаморфических пород 37  
 Трециины:  
     бортового отпора 42, 49  
     выетривания 42, 49  
     гравитационные 42, 51  
     донного отпора 42, 49, 169  
     закрытые 37  
     заполненные 37, 169  
     интрузивных пород 37  
     искусственные 38, 51  
     контракционные 42  
     литогенетические 43  
     напластования 42, 174  
     открытые 42  
  
 Цементационная завеса 140, 152, 160, 161, 164, 177, 190, 269, 324  
  
 Электроразведка 213, 228, 240  
 Электрический каротаж 213, 243  
 Эффузивы 179, 182

первичной отдельности 42  
 петрогенетические 43, 45  
 планетарные 45  
 приразрывные (оперяющие) 42, 46  
 разгрузки 42, 48, 169  
 сейсмотектонические 42, 48  
 скрытые 38  
 сместители 39  
 со складчатые 42, 46  
 тектонические 42, 46, 169  
 экзокинетические 42, 46  
 эндокинетические 42, 43  
 эффузивных пород 40, 46, 180  
 Туфобрекции 181  
 Туфы 181

Удельное водопоглощение 89, 180, 240, 251  
 Укрепительная цементация 131, 169, 179, 329  
 Устойчивость подземных выработок 130

Физико-механические свойства пород 210, 215  
 Физические поля 31, 63, 233, 270  
 Фильтрационные свойства пород 89, 210  
 Фотоэодолитная съемка 239, 290  
 Формации геологические 36, 40  
     — карбонатная 140, 154, 164  
     — молассовая терригенная 155, 161  
     — терригенного флиша 154, 158  
     — эвапоритовая 145

Цементационная завеса 140, 152, 160, 161, 164, 177, 190, 269, 324

Электроразведка 213, 228, 240  
 Электрический каротаж 213, 243  
 Эффузивы 179, 182

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |   |
|--|---|
| Предисловие к русскому изданию . . . . . | 5 |
| Введение . . . . .                       | 7 |

### ГЛАВА 1

|   |    |
|---|----|
| Основные типы гидротехнических сооружений и их назначение . . . . . | 12 |
| 1.1. Плотины . . . . .  | 15 |
| 1.1.1. Бетонные плотины . . . . .                                   | 17 |
| 1.1.2. Плотины из местных строительных материалов . . . . .         | 22 |
| 1.2. Водосбросные и водопроводящие сооружения . . . . .             | 24 |
| 1.3. Здания гидроэлектростанций . . . . .                           | 25 |
| 1.4. Компоновка гидроузлов и выбор типа сооружений . . . . .        | 27 |

### ГЛАВА 2

|   |    |
|---|----|
| Массив горных пород . . . . .   | 29 |
| 2.1. Общие положения, основные понятия, терминология . . . . .        | 29 |
| 2.2. Структура массива горных пород . . . . .                         | 34 |
| 2.2.1. Геологические тела . . . . .                                   | 34 |
| 2.2.2. Разрывные нарушения и поверхности ослабления . . . . .         | 37 |
| 2.2.2.1. Треугольники . . . . .                                       | 37 |
| 2.2.2.2. Разломы . . . . .  | 52 |
| 2.2.3. Складки . . . . .  | 57 |
| 2.2.4. Коры выветривания . . . . .                                    | 58 |
| 2.3. Вещественный состав массивов горных пород . . . . .              | 61 |
| 2.5. Физические поля в массивах горных пород . . . . .                | 63 |
| 2.5.1. Тепловое поле . . . . .  | 63 |
| 2.5.2. Поле напряжений . . . . .                                      | 64 |
| 2.6. Динамика массивов горных пород. Геологические процессы . . . . . | 68 |
| 2.6.1. Карст . . . . .  | 68 |
| 2.6.2. Гравитационные процессы . . . . .                              | 73 |
| 2.7. Свойства массивов скальных пород . . . . .                       | 77 |
| 2.7.1. Общие свойства . . . . .                                       | 79 |
| 2.7.2. Механические свойства . . . . .                                | 85 |
| 2.7.3. Фильтрационные свойства . . . . .                              | 89 |

### ГЛАВА 3

|  |     |
|--|-----|
| Взаимодействие массивов горных пород и гидротехнических сооружений . . . . .   | 93  |
| 3.1. Общие положения . . . . .   | 93  |
| 3.2. Инженерно-геологические процессы, развивающиеся при строительстве плотин и других наземных сооружений . . . . . | 100 |
| 3.2.1. Процессы, связанные с изменением напряженного состояния массива горных пород . . . . .                        | 100 |
| 3.2.2. Выветривание пород в дне и откосах котлованов и строительных выемок . . . . .                                 | 116 |
| 3.2.3. Процессы, вызываемые воздействием фильтрационного потока . . . . .  | 117 |
| 3.2.4. Землетрясения, вызываемые заполнением водохранилищ . . . . .  | 120 |
| 3.2.5. Инженерно-геологические процессы, вызываемые сейсмическими воздействиями . . . . .                            | 123 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.3. Инженерно-геологические процессы, развивающиеся при строительстве подземных сооружений . . . . .                         | 125 |
| 3.3.1. Процессы, связанные с изменением напряженного состояния массива горных пород и проявлениями горного давления . . . . . | 125 |
| 3.3.2. Притоки и прорывы воды в подземные выработки . . . . .   | 133 |
| 3.3.3. Выбросы газа . . . . .   | 134 |
| 3.3.4. Повышение температуры в подземных выработках . . . . .   | 135 |

### ГЛАВА 4

|   |     |
|---|-----|
| Типы массивов горных пород и их инженерно-геологическая характеристика. Обобщение опыта инженерно-геологических изысканий . . . . . | 137 |
| 4.1. Общие положения . . . . .  | 137 |
| 4.2. Скальные массивы платформенных областей . . . . .  | 138 |
| 4.2.1. Массивы, сложенные осадочными породами . . . . .   | 139 |
| 4.2.1.1. Карбонатные формации . . . . .   | 140 |
| 4.2.1.2. Эвапоритовая (соленосная) формация . . . . .   | 145 |
| 4.2.2. Массивы, сложенные магматическими и метаморфическими породами кристаллического фундамента . . . . .                          | 148 |
| 4.2.3. Массивы, сложенные магматическими породами, принимающими участие в строении платформенного чехла . . . . .                   | 150 |
| 4.3. Скальные массивы орогенных регионов . . . . .  | 153 |
| 4.3.1. Массивы, сложенные осадочными породами . . . . .   | 154 |
| 4.3.1.1. Терригенные формации . . . . .   | 155 |
| 4.3.1.2. Молассовые формации . . . . .  | 161 |
| 4.3.1.3. Карбонатные формации . . . . .   | 164 |
| 4.3.2. Массивы, сложенные метаморфическими породами . . . . .   | 174 |
| 4.3.3. Массивы, сложенные вулканогенными породами . . . . .   | 179 |
| 4.3.4. Массивы, сложенные интрузивными породами . . . . .   | 185 |
| 4.4. Массивы, сложенные многолетнemerзлыми скальными породами . . . . .   | 190 |

### ГЛАВА 5

|   |     |
|---|-----|
| Задачи, общие вопросы методики и организации инженерно-геологических исследований . . . . .   | 195 |
| 5.1. Общие положения . . . . .  | 195 |
| 5.2. Составление моделей массивов горных пород . . . . .  | 197 |
| 5.3. Инженерно-геологические прогнозы . . . . .   | 200 |
| 5.4. О необходимой полноте инженерно-геологических исследований . . . . .   | 205 |
| 5.5. Общая схема последовательности инженерно-геологических исследований . . . . .  | 206 |
| 5.5.1. Инженерно-геологические исследования для обоснования схемы комплексного использования реки . . . . .                               | 207 |
| 5.5.2. Инженерно-геологические исследования для составления технико-экономического обоснования (ТЭО) . . . . .                            | 209 |
| 5.5.3. Инженерно-геологические исследования для обоснования технического проекта . . . . .  | 211 |
| 5.5.4. Инженерно-геологические исследования, выполняемые для обоснования рабочих чертежей и в процессе строительства сооружений . . . . . | 214 |
| 5.5.5. Участие инженеров-геологов в наблюдениях за эксплуатируемыми сооружениями . . . . .  | 216 |

### ГЛАВА 6

|   |     |
|---|-----|
| Основные направления инженерно-геологических исследований . . . . . | 218 |
| 6.1. Основные положения . . . . .                                   | 218 |
| 6.2. Региональные инженерно-геологические исследования . . . . .    | 218 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.2.1. Применение аэрокосмических методов . . . . .  | 220 |
| 6.2.2. Наземные исследования . . . . .   | 227 |
| 6.3. Детальные инженерно-геологические исследования . . . . .                                    | 231 |
| 6.3.1. Изучение структуры и вещественного состава массивов горных пород . . . . .                | 233 |
| 6.3.1.1. Общие положения . . . . .   | 233 |
| 6.3.1.2. Выделение геологических тел . . . . .   | 234 |
| 6.3.1.3. Изучение разрывных нарушений . . . . .  | 235 |
| 6.3.1.4. Изучение трещиноватости . . . . .   | 236 |
| 6.3.1.5. Изучение кор выветривания . . . . .   | 247 |
| 6.3.2. Гидрогеологические исследования . . . . .   | 248 |
| 6.3.2.1. Общие положения . . . . .   | 248 |
| 6.3.2.2. Изучение водопроницаемости массивов горных пород . . . . .                              | 249 |
| 6.3.2.3. Индикаторные методы изучения подземных вод в массивах скальных пород . . . . .          | 258 |
| 6.3.2.4. Режимные наблюдения . . . . .   | 260 |
| 6.3.2.5. Гидрохимические исследования . . . . .  | 262 |
| 6.3.2.6. Изучение суффозионных явлений в трещинах скальных пород . . . . .                       | 262 |
| 6.3.2.7. Построение фильтрационных моделей массивов скальных пород . . . . .                     | 265 |
| 6.3.2.8. Применение методов лабораторного гидрогеологического моделирования . . . . .            | 269 |
| 6.3.3. Изучение физических полей в массивах горных пород . . . . .                               | 270 |
| 6.3.4. Изучение механических свойств скальных массивов (геомеханические исследования) . . . . .  | 272 |
| 6.3.4.1. Исследование деформационных свойств . . . . .   | 273 |
| 6.3.4.2. Прочностные исследования . . . . .  | 282 |
| 6.3.5. Изучение современных геологических процессов . . . . .                                    | 287 |
| 6.3.5.1. Изучение карста . . . . .   | 287 |
| 6.3.5.2. Изучение гравитационных процессов . . . . .   | 287 |
| 6.3.5.3. Изучение массивов мерзлых скальных пород . . . . .                                      | 292 |
| 6.3.6. Изучение неотектонических и сейсмических явлений. Оценка сейсмической опасности . . . . . | 297 |
| 6.3.6.1. Общие положения . . . . .   | 300 |
| 6.3.6.2. Установление сейсмической опасности . . . . .   | 300 |

## ГЛАВА 7

### Некоторые специальные инженерно-геологические исследования . . . . .

318

|  |     |
|--|-----|
| 7.1. Инженерно-геологические исследования для обоснования строительства подземных сооружений . . . . . | 318 |
| 7.2. Исследования для проектирования противофильтрационных завес . . . . .                             | 324 |
| 7.3. Определение мощности зоны съема . . . . .   | 328 |
| 7.4. Поиски и разведка естественных строительных материалов . . . . .                                  | 330 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| Список литературы . . . . . | 335 |
|-----------------------------|-----|

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| Предметный указатель . . . . . | 347 |
|--------------------------------|-----|