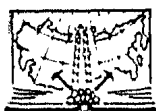


# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

*Под редакцией  
академика Е. М. СЕРГЕЕВА*



МОСКВА „НЕДРА” 1985



Майор Е.М.Сергеев, 1943 г.



Е.М.Сергеев, 1985 г.

### Е.М.Сергеев (1914-1997)

**Сергеев Евгений Михайлович** (23.03.1914, г.Москва - 23.03.1997, г.Москва; похоронен на Троекуровском кладбище) - крупнейший ученый в области инж. геологии, грунтовед, талантливый педагог и организатор геологической науки, профессор каф. инж. геологии и охраны геол. среды геол. ф-та МГУ (1953), академик РАН (1979, чл.-корр. с 1966), лауреат Ленинской (1982) и Государственных премий СССР (1977, 1988), Ломоносовской премии МГУ, зав. кафедрой грунтоведения и инж. геологии (1954, с 1986 - каф. инж. геологии и охраны геол. среды) геол. ф-та МГУ, участник ВОВ.

УДК 624.131.31+550.41

Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы/Под ред. акад. Сергеева Е. М. — М.: Недра, 1985, 332 с., ил.

Обсуждаются генетические основы инженерно-геологического изучения горных пород и слагаемых ими массивов; освещаются факторы, влияющие на формирование инженерно-геологических особенностей пород, даются понятия о массивах и толщах горных пород. Излагаются геологические основы инженерной геодинамики, дается классификация геологических процессов и их техногенных аналогов. Содержатся сведения о геологических основах региональной инженерной геологии, факторах, влияющих на формирование инженерно-геологических условий, об инженерно-геологическом районировании.

Для геологов, гидрогеологов, мерзлотоведов и др. Будет полезна также для студентов и аспирантов.

Табл. 28, ил. 42, список лит. — 50 назв.

Рецензент: *А. А. Варга*, д-р геол.-минер. наук (Всесоюзный ордена Ленина проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт им. С. Я. Жука)

Редакционная коллегия:

*Г. К. Бондарик, А. С. Герасимова* (зам. главного редактора), *Г. А. Голодковская, Р. С. Зиангиров, Г. С. Золотарев, В. И. Осипов, Е. М. Сергеев* (главный редактор), *В. Т. Трофимов* (зам. главного редактора)

Ответственный редактор *Е. М. Сергеев*

Т  $\frac{3202000000-143}{043(01)-85}$  271—85

© Издательство «Недра», 1985

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Термин «инженерная геология» вошел в жизнь в 20—30-х годах нашего столетия в ряде стран, в том числе и в Советском Союзе.

Сейчас инженерная геология изучает горные породы, геологические процессы и геологические особенности территорий с целью рационального использования и охраны геологической среды — верхней части литосферы, где протекает инженерно-хозяйственная деятельность человека.

С древних времен люди строили различные сооружения, добывали полезные ископаемые, занимались сельским хозяйством. Но все это происходило в сравнительно небольших масштабах, и равновесие, установившееся в природе, практически не нарушалось. По словам Ч. Лайеля, «силы человечества казались ничтожными по сравнению с природными силами». Не было никакой необходимости в изучении взаимодействия человека с природой.

Все начало изменяться с развитием капитализма.

К. Маркс, Ф. Энгельс, В. И. Ленин в своих работах показали, что по мере развития производительных сил роль человека в природе повышается, а массовое производство и кооперация в крупных масштабах с применением машин в конце концов подчинят силы природы непосредственному процессу производства. Так это и происходило. По мере развития производительных сил изменялись представления о взаимодействии между человеком и природой. В 1944 г. В. И. Вернадский сформулировал очень важное и принципиальное положение: «...Человек становится крупнейшей геологической силой. Он может и должен перестраивать своим трудом и мыслью область своей жизни, перестраивать коренным образом по сравнению с тем, что было раньше. Перед ним открываются все более и более широкие творческие возможности. Меняется лик Земли, исчезает девственная природа». Прошло сорок лет, и научный прогноз В. И. Вернадского полностью подтвердился.

Появился новый термин «окружающая среда», под которым стали понимать ту часть природной среды, с которой взаимодействует человек. В результате этого взаимодействия в окружающей среде часто возникают изменения, вредные для самого человека. Отсюда возникла проблема глобального масштаба — охрана окружающей среды, хотя лучше сказать: проблема охраны и рационального использования окружающей среды, потому что без использования природных ресурсов человечество не может обойтись. Важно только, чтобы это использование было рациональным. Об этом в нашей стране постоянно заботится Коммунистическая партия.

Охрана и рациональное использование окружающей среды — проблема, связанная с развитием как промышленности, так и сельского хозяйства. Эта проблема по экономическому значению сопоставима с проблемой добычи полезных ископаемых и освоением новых огромных и труднодоступных территорий.

Есть все основания полагать, что к 1985 г. до 8 % поверхности суши Земли будет застроено различными инженерными сооружениями: жилыми и промышленными зданиями, дорогами и аэродромами, каналами и водохранилищами, шахтами и карьерами и т. п.

К началу XXI в. площадь суши Земли, занятая инженерными сооружениями, увеличится почти вдвое и составит около 15 % всей земной суши. При этом нельзя забывать, что инженерные сооружения будут распределены на поверхности Земли неравномерно. Их будет меньше там, где существуют неблагоприятные условия для жизни человека (Антарктида, Крайний Север, высокогорные районы, пустыни и др.), и, наоборот, нагрузка на поверхность Земли возрастет в тех районах, где эти неблагоприятные условия отсутствуют.

Всего через 15 лет одна шестая часть суши поверхности Земли будет находиться под влиянием человека. Она станет частью окружающей среды, точнее, геологической средой, связанной с другими компонентами окружающей среды.

Уже сейчас инженерную геологию можно определить как науку о геологической среде, точнее, как науку о свойствах и динамике геологической среды, ее рациональном использовании и охране в связи с инженерно-хозяйственной, прежде всего — инженерно-строительной деятельностью человека.

Под геологической средой понимаются любые горные породы и почвы, слагающие верхнюю часть разреза литосферы и рассматривающиеся как многокомпонентные, динамичные системы.

В дальнейшем определение инженерной геологии как науки о геологической среде будет еще более справедливым. Не исключено, что инженерная геология, всегда изучавшая и сейчас изучающая взаимодействие человека с верхней частью литосферы, станет тем центром, вокруг которого будут «кристаллизоваться» отдельные разделы гидрогеологии, мерзлотоведения, почвоведения, геохимии, неотектоники, геоморфологии и других геологических и естественных наук, в результате чего возникнет новая наука — геология окружающей среды, значимость которой будет возрастать во времени.

Инженерная геология давно перестала быть только прикладной наукой. Это новое направление в геологии, которое на основе теоретических концепций решает важные практические задачи.

Само название «инженерная геология» говорит о том, что речь идет не столько об «инженерной», сколько о «геологической» науке. Поэтому первостепенным является рассмотрение влияния фундаментальных геологических наук на развитие и современное состояние инженерной геологии. Этому вопросу и посвящена данная книга. В ней излагаются: генетические основы инженерно-геологического изучения горных пород и слагаемых ими массивов, геологические основы инженерной геодинамики и региональной инженерной геологии.

Инженерная геология развивается не только на основе фунда-

ментальных геологических наук, но и под влиянием определенных социально-экономических факторов, а ее теоретической основой являются также науки физико-химического и механико-математического циклов. Рассмотрению этих вопросов посвящены другие книги из данной серии, объединенные под общим названием «Теоретические основы инженерной геологии».

Задачи, которые ставили перед собой авторы «Теоретических основ инженерной геологии», кратко можно сформулировать так: показать современный уровень развития инженерной геологии, ее основные научные направления, базирующиеся на различных фундаментальных науках, с целью разработки путей ее дальнейшего развития. Это трудная задача. Но авторский коллектив надеется, что в первом приближении ему удалось ее решить.

*Возникновение и этапы развития инженерной геологии.* Инженерная геология — одна из самых молодых наук геологического цикла. Она изучает земную кору как среду жизни и деятельности человека. Ее становление как самостоятельной научной дисциплины произошло в 20-х годах нашего столетия и было обусловлено, в первую очередь, настоятельной потребностью в геологическом обосновании инженерно-строительной деятельности человечества. Нельзя сказать, что это была новая проблема для геологов. Решением ее в конце XIX в. и начале XX в. в связи с железнодорожным строительством занимались такие крупнейшие русские геологи, как И. В. Мушкетов, А. П. Павлов, В. А. Обручев, А. П. Карпинский, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, С. А. Яковлев и др.

История инженерной геологии как науки началась в 1923 г., когда Н. И. Прохоров, П. А. Земятченский и Н. Н. Иванов создали в Ленинграде дорожно-исследовательское бюро Центрального управления местного транспорта и тем самым впервые организационно оформили совместные научные и производственные работы инженеров-дорожников с геологами и почвоведом. Горные породы и почвы стали изучать как грунты при дорожном строительстве: возникло понятие «дорожное грунтоведение». Развитие изучения грунтов для промышленного, городского, гидротехнического и других видов строительства привело к исчезновению в этом понятии определения «дорожное» и появлению термина «грунтоведение» — нового научного направления, изучающего горные породы и почвы как грунты в связи с проектированием и строительством различных инженерных сооружений. Развитию грунтоведения в Советском Союзе в значительной степени обязаны М. М. Филатову, В. В. Охотину, В. А. Приклонскому, Б. М. Гуменскому, С. С. Морозову и многим другим ученым, работавшим и работающим в этой области.

Одновременно с грунтоведением сформировалась и другая новая дисциплина, изучающая горные породы, — механика грунтов, возникшая на стыке физико-математических, строительных и геологических наук. Она рассматривала общие закономерности, которые вытекают из применения к горным породам законов теоретической и строительной механики. При этом механические свойства грунтов, подчиняющиеся законам механики и укладываемые в определенные расчетные схемы, учитывались в достаточно полной мере, а геологическая специфика грунтов анализировалась в меньшей степени, а чаще даже не учитывалась. Эти пробелы компенсировались в грунтоведении.

При решении геологических вопросов, связанных со строительством, недостаточно одних знаний о характере грунтов, как бы всесторонне они не были изучены. Необходимы данные о геологических и гидрогеологических условиях территории, геологических

процессах, развитых в ее пределах. Изучение всех этих проблем «взяло» на себя еще одно вновь сформировавшееся в эти же годы научное направление, которое получило название «инженерная геология». Развитие этого направления на первых этапах его возникновения было связано прежде всего с потребностями гидротехнического строительства, с воплощением в жизнь Ленинского плана ГОЭЛРО. Инженерная геология в значительной степени создавалась и развивалась под влиянием работ Ф. П. Саваренского, Г. Н. Каменского, И. В. Попова, Н. Ф. Погребова, Н. Н. Маслова, М. П. Семенова, Л. Д. Белого, П. Н. Панюкова, Н. Я. Денисова, Н. В. Коломенского и др.

Последующее развитие этих новых геологических научных направлений привело к их объединению, к возникновению более широкой науки, которая сохранила название «инженерная геология». На первом этапе она, по И. В. Попову, являлась «отраслью геологии, изучающей динамику верхних горизонтов земной коры в связи с инженерной деятельностью человека».

В истории развития инженерной геологии нашей страны выделяются три основных этапа [38]. Главный итог первого из них (1923—1945 гг.) — возникновение инженерной геологии как новой научной дисциплины, которая по существу состояла из двух направлений: грунтоведения и инженерной геодинамики в современном понимании этого термина. Она развивалась, с одной стороны, в тесной связи с науками геологического цикла, а с другой — со строительными дисциплинами. В своем становлении и развитии, обусловленных социально-экономическими потребностями нашей страны, она широко использовала достижения фундаментальных геологических дисциплин, физики, химии, механики, математики, почвоведения и др.

Второй этап охватывает 1946—1978 гг. Его главная черта — формирование третьего научного направления в инженерной геологии — региональной инженерной геологии. В итоге окончательно замкнулся ряд объектов исследований: грунты (грунтоведение) — геологические процессы (инженерная геодинамика) — территория (региональная инженерная геология). В этот же период оформляются прикладные разделы: инженерная геология месторождений полезных ископаемых, инженерная геология городов, мелиоративная инженерная геология и др. Для этого этапа в методическом плане характерно, с одной стороны, все большее проникновение в микромир грунтов, познания природы их свойств, а с другой — изучение свойств массивов грунтов.

Третий этап (с 1979 г.) — современный период развития инженерной геологии. В настоящее время перед ней стоят более сложные задачи. Сейчас необходимо разработать не просто геологическое обоснование инженерно-строительной деятельности, а такое обоснование, которое исключало бы или сводило к минимуму негативные последствия инженерной деятельности человека в литосфере. Перед инженерной геологией поставлена новая проблема — разработка вопросов рационального использования и охрана



геологической среды, под которой понимают ту часть разреза литосферы, где осуществляется инженерно-хозяйственная деятельность человека. Именно под ее влиянием в пределах геологической среды возникают антропогенные геологические процессы, отсутствовавшие в исходной (природной) ситуации и оказывающие огромное, нередко негативное влияние на состояние биосферы в целом.

Новая проблема выдвинула и целый ряд новых задач. Среди них создание теоретических основ рационального использования и охраны геологической среды, построение теоретической модели взаимодействия геологическая среда—человек, разработка научных основ регионального прогнозирования и составления карт прогноза изменения геологической среды и районирования территории по условиям ее рационального освоения, создание научно обоснованной методики оценки локальных и региональных изменений геологической среды в результате инженерной деятельности людей, разработка инженерно-геологических основ литомониторинга.

Мы показали формирование инженерной геологии на примере нашей страны. Оно является довольно типичным и для других развитых стран. Например, в Великобритании и США в конце XIX—начале XX вв. к изысканиям при строительстве каналов, железных дорог и других инженерных объектов были привлечены наиболее известные геологи, такие, как В. Смит и Ч. Беркли. В 1925 г. вышла монография К. Терцаги «Строительная механика грунтов» и в 1929 г. «Инженерная геология» К. А. Редлиха, Р. Кампе, К. Терцаги.

Инженерная геология возникла примерно в одно и то же время в странах с разным социально-экономическим строем. Это было связано с тем, что уровень производительных сил у них был примерно одинаковый и позволял возводить сложные инженерные сооружения, для строительства которых требовались специальные геологические исследования. Однако пути развития инженерной геологии в капиталистических странах и в Советском Союзе, а затем и в других социалистических странах были разными. В этом сказалось различие в их социально-экономическом строе.

В 1937 г. М. М. Филатов писал: «Творческие силы Октябрьской социалистической революции, проявившие свое плодотворное влияние на всех фронтах науки, вызвали к существованию грунтоведение, теперь уже оформившееся в целую научную дисциплину, призванную к плодотворной работе на пользу нашей социалистической Родине».

Грунтоведение, как было уже сказано, часть инженерной геологии, и оно отличается от механики грунтов. Возникновение грунтоведения именно в Советском Союзе, а механики грунтов в США и странах Западной Европы было обусловлено объективными причинами. В социалистическом государстве на первом месте стоят интересы народа, в капиталистическом — интересы отдельных предпринимателей, фирм, компаний. В последнем случае это приводит

к тому, что при строительстве инженерного сооружения стремятся сократить объем инженерных изысканий, изучить только главное— взаимодействие сооружения с грунтом с помощью разработанного уже в механике математического аппарата. Никаких «лишних», «побочных» исследований не предусматривается. Поэтому механика грунтов и должна была возникнуть в наиболее развитых капиталистических странах. По своей сущности она не является геологической дисциплиной и не может быть частью инженерной геологии; механика грунтов лишь связана с инженерной геологией. Об этом подробнее сказано дальше.

В социалистических странах средства и на научные исследования, и на инженерные изыскания выделяет государство, а не частные лица. Государство заинтересовано в том, чтобы отдельные изыскания проводились на общей научной методологической основе, потому что только это дает возможность связать их воедино, наиболее эффективно учесть предыдущий опыт и в будущем с наименьшими затратами получить максимальную гарантию прочности возводимых инженерных сооружений. Для этого мало знать, как будут взаимодействовать инженерные сооружения с грунтами и свойства последних, надо еще объяснить, почему они обладают такими свойствами. Иначе говоря, нужен естественно-исторический, генетический подход при решении инженерных задач, который и является основным в грунтоведении. Поэтому прав был М. М. Филатов, говоря о том, что социалистическая революция обусловила возникновение грунтоведения, одного из основных теоретических разделов инженерной геологии. Не случайно в странах, которые стали на социалистический путь развития (ПНР, ЧССР, КНР, СРВ и др.), наряду с механикой грунтов стало усиленно развиваться грунтоведение.

Как показано выше, второй этап развития инженерной геологии характеризуется возникновением региональной инженерной геологии — третьего теоретического направления в инженерной геологии. Этому направлению в нашей стране придается большое значение, что подтверждается присуждением в 1982 г. Ленинской премии за восьмитомную монографию «Инженерная геология СССР», в написании которой участвовало более 300 авторов.

Советские ученые первыми (в 1979 г.) поставили вопрос о том, что на современном этапе развития инженерная геология превращается в науку о геологической среде. В соответствии с этим на Генеральной ассамблее Международной ассоциации инженерной геологии (МАИГ), проходившей в 1980 г. на XXVI Международном геологическом конгрессе, была единогласно принята Декларация, в которой все ученые и специалисты, работающие в инженерной геологии, призывались взять на себя ответственность за охрану и рациональное использование геологической среды.

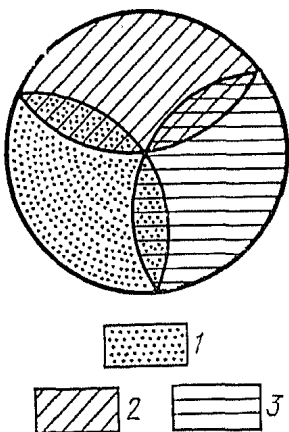
Как видно, инженерная геология в Советском Союзе и других социалистических странах имеет более широкое содержание, чем в странах капитализма. Это обусловлено преимуществом нашего социального строя. Благодаря тому что в 1964 г. было принято

решение о создании МАИГ, начавшей свою активную деятельность с 1968 г., влияние советской инженерной геологии стало распространяться на инженеров-геологов других стран. Советские инженеры-геологи, в свою очередь, лучше познакомились с зарубежным опытом. Происходит процесс сближения различных точек зрения в инженерной геологии. Но своеобразие советской инженерной геологии сохраняется. Поэтому определения, которые даются дальше, в первую очередь относятся к советской инженерной геологии.

*Современная структура инженерной геологии.* На современном этапе развития инженерная геология рассматривается как наука о свойствах и динамике геологической среды, ее рациональном использовании и охране в связи с инженерно-хозяйственной, прежде всего инженерно-строительной, деятельностью человека.

Следует подчеркнуть, что геологическая среда, как область, в пределах которой осуществляется геологическая форма движения материи, является в самом общем понимании объектом исследования всех наук геологического цикла. Однако ее объем, который изучается той или иной конкретной наукой, а также цель исследования различны. Инженерная геология изучает лишь верхнюю часть литосферы, в пределах которой осуществляется инженерно-хозяйственная деятельность человека. В связи с этим применительно к задачам инженерной геологии ту часть литосферы, которая испытывает воздействие человека, можно назвать геологической средой. Под геологической средой, по Е. М. Сергееву [39], следует понимать «любые горные породы и почвы, слагающие верхнюю часть разреза литосферы, которые рассматриваются как многокомпонентные системы, находящиеся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека, что приводит к изменению природных геологических процессов и возникновению новых антропогенных (инженерно-геологических) процессов, изменяющих инженерно-геологические условия определенной территории».

В этом определении выделены три главных элемента геологической среды, целенаправленно изучаемых инженерной геологией, — горные породы и почвы, природные и антропогенные геологические процессы и территория (точнее, определенный объем геологической среды). Выше указывалось, что эти элементы геологической среды составляют объекты трех самостоятельных, тесно связанных между собой научных направлений современной инженерной геологии — грунтоведения, инженерной геодинамики и региональной инженерной геологии (рис. 1). Каждое из этих научных направлений представляет собой определенную систему инженерно-геологических научных знаний и понятий (предмет научного направления) о свойствах и динамике определенного элемента (стороны) геологической



ИС. 1. Соотношение научных направлений инженерной геологии.

1 — грунтоведение; 2 — инженерная геодинамика; 3 — региональная инженерная геология

среды (объект научного направления). Соотношение этих трех научных направлений определяет современную структуру инженерной геологии как науки.

Грунтоведение — это научное направление инженерной геологии, занимающееся изучением состава, строения и свойств грунтов, закономерностей их формирования и пространственно-временного изменения в процессе инженерной деятельности человека. При этом под грунтами понимают любые горные породы, почвы и антропогенные геологические образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы, изучаемые в связи с инженерной деятельностью человека. Основная проблема грунтоведения на современном этапе его развития — изучение грунтов от микро- до мегауровня (массивов), исходя из представлений о них как о многокомпонентных системах, слагающих геологическую среду.

Данные грунтоведческих исследований имеют, с одной стороны, самостоятельное значение, а с другой — являются необходимой базой для развития иных научных направлений инженерной геологии. Достаточно напомнить, что именно специалисты, работающие в области грунтоведения, выдают проектировщикам все требующиеся данные о свойствах грунтов, рекомендации по применению методов технической мелиорации с целью улучшения или коренного изменения этих свойств. Без изучения грунтов невозможно решение многих проблем, стоящих перед инженерной геодинамикой и региональной инженерной геологией, поскольку именно грунты (грунтовые толщи) являются той средой, в которой развиваются геологические процессы, и выступают в качестве важнейшего фактора формирования инженерно-геологических условий любой территории.

Инженерная геодинамика — это научное направление инженерной геологии, изучающее морфологию, механизм, геологические причины и пространственно-временные закономерности развития в геологической среде природных и антропогенных (инженерно-геологических) геологических процессов в связи с осуществляемой и планируемой инженерно-хозяйственной деятельностью человека. Основное внимание уделяется изучению геологических процессов, протекающих в приповерхностной части геологической среды, как в природной обстановке (экзогенные геологические процессы природной геологической системы), так и на освоенных территориях (антропогенные, или инженерно-геологические, процессы природно-технической системы). Динамика геологических процессов анализируется при этом в двух временных системах: в геологическом времени — при исследовании закономерностей развития древних и современных давних (по И. В. Попову) геологических процессов, обусловивших формирование определенных геологических явлений в современном рельефе или толщах горных пород, важных при оценке инженерно-геологических условий той или иной территории; в физическом времени — при анализе тех же закономерностей применительно к современным действующим геологическим процессам.

Значение геологических процессов, протекавших и протекающих в приповерхностной части геологической среды, чрезвычайно велико. А. В. Сидоренко оценил его с учетом деятельности человека так: «Ныне внимание человечества обращено на освоение космоса. Одновременно геологи планируют проникновение в глубокие недра Земли для достижения так называемой верхней мантии. Бесспорно, что познание этого уровня земной коры будет иметь огромное значение для понимания многих геологических процессов, проходящих в земной коре, и в первую очередь причин тектонических движений ее — ведущих процессов развития Земли. Однако нельзя забывать и огромного значения тех геологических процессов, которые протекают непосредственно на поверхности и в приповерхностной части Земли. Проблема изучения этих процессов, особенно учитывая вмешательство в них человека, имеет не меньшее значение, чем проблема освоения космоса, околоземного пространства или глубоких недр Земли». В свете этого главная проблема инженерной геодинамики — количественный пространственно-временной и интенсивностный (по степени интенсивности) прогнозы экзогенных и приповерхностных проявлений эндогенных геологических и антропогенных процессов с целью предотвращения или уменьшения вредного влияния этих процессов на геологическую среду и биосферу в целом.

Следует подчеркнуть, что геологические процессы изучает не только инженерная геодинамика, но и динамическая геология. Это обстоятельство не противопоставляет эти две геологические дисциплины, так как каждая из них исследует геологические процессы в своем аспекте. Динамическая геология изучает геологические процессы, протекающие в природе независимо от человека. Это необходимо для решения главным образом проблем общегеологического характера. Инженерная геодинамика исследует влияние на геологические процессы деятельности человека, а также изучает факторы, возникающие в результате его инженерно-хозяйственной деятельности. Поэтому понятие «геодинамическая обстановка» имеет различное значение в динамической геологии и инженерной геодинамике. В последней геодинамическая обстановка определяется совокупностью природных и антропогенных геологических процессов и созданных ими явлений, причем с развитием научно-технического прогресса роль геологической деятельности человека постоянно возрастает, и вместе с этим увеличивается значение антропогенных геологических процессов и явлений в формировании геодинамической обстановки.

Региональная инженерная геология представляет собой третье научное направление инженерной геологии, исследующее строение и свойства геологической среды различных структурных зон земной коры, закономерности формирования их инженерно-геологических условий и пространственно-временного изменения в связи с осуществляемой или планируемой инженерно-хозяйственной деятельностью человека. В качестве объекта региональной инженерной геологии выступает та часть литосферы, ко-

торая рассматривается как потенциально возможная или уже существующая геологическая среда (в практической работе — чаще определенный ее объем). При этом комплексно исследуются инженерно-геологические условия территории, под которыми принято понимать совокупность ее геологических особенностей, учитываемых при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. В число компонентов, определяющих инженерно-геологические условия, включают характер горных пород, условия их залегания и свойства, рельеф территории, мерзлотные и гидрогеологические особенности и современные геологические процессы и явления (как природные, так и вызванные инженерно-хозяйственной деятельностью человека).

Региональная инженерная геология — наиболее молодое научное направление инженерной геологии. Основной научной проблемой ее на современном этапе является, по Е. М. Сергееву, познание закономерностей формирования инженерно-геологических условий крупных геологических регионов и прогноз их изменения под влиянием деятельности человека.

Региональная инженерная геология развивается, как и вся инженерная геология, на генетических основах. Одно из важнейших, принципиальных положений ее говорит о том, что равнозначными в инженерно-геологическом отношении могут быть участки земной коры, пережившие совершенно одинаковый или очень схожий ход геологического развития и находящиеся в настоящее время в одинаковых или близких условиях экзогенной тепло- и влагообеспеченности. Поэтому познание закономерностей формирования инженерно-геологических условий любой территории (любого объема геологической среды) должно основываться на анализе историко-геологического и генетического путей становления тех геологических черт местности, которые определяют инженерно-геологические условия. Региональная инженерная геология изучает закономерности распространения и проявления в пределах Земли всех факторов, определяющих ход создания инженерно-геологических условий и их динамику на современном этапе развития земной коры, как взаимосвязанные и взаимообусловленные.

*Прикладные разделы инженерной геологии.* Инженерная геология, как и любая другая наука, включает теоретические и прикладные разделы, призванные способствовать решению конкретных народнохозяйственных задач, обеспечить конкретные виды деятельности человечества. Анализ приложения инженерно-геологических результатов к различным видам инженерно-хозяйственной деятельности позволяет выделить целый ряд прикладных разделов инженерной геологии. Среди них к настоящему времени четко обособились инженерная геология городов и городских агломераций, инженерная геология месторождений полезных ископаемых (инженерная геология в горном деле), мелиоративная инженерная геология, инженерная геология в гидротехническом и дорожном строительстве и т. п. Каждый из этих разделов призван решать строго конкретные задачи, ему свойственна определенная методика ис-

следований, которая включает как методы получения, обработки и представления результатов производственных инженерно-геологических изысканий, так и технологию их проведения.

Следует подчеркнуть, что нередко к этой категории относят и такие разделы инженерной геологии, как инженерную геологию глубинных зон, морскую и т. п. Это неправомерно, поскольку при выделении этих разделов используется другое основание деления — пространственное положение изучаемых объемов геологической среды по отношению к внешним средам (атмосфере, поверхностной гидросфере и др.), с которыми она взаимодействует. Использование этого признака позволяет подразделить инженерную геологию на инженерную геологию приповерхностных зон земной коры, для которой характерна наибольшая динамика геологической среды, и инженерную геологию глубинных зон земной коры. Первый из этих разделов подразделяется на два: инженерную геологию территорий (суши) и инженерную геологию акваторий (морского дна). Последний раздел и называют чаще всего «морской инженерной геологией».

*Связь инженерной геологии с другими науками.* Инженерная геология тесно связана с другими науками как геологического, так и негеологического циклов (рис. 2). В частности, она, как и все геологические науки, чрезвычайно широко использует теоретические достижения и методы физики, механики, химии (в первую очередь физической химии, коллоидной химии), математики. Она пользуется достижениями многих наук геологического цикла, по своему интерпретируя их данные, пополняет их результатами собственных исследований и дает необходимый геологический материал для разработки проектов различных инженерных сооружений (строительство, горное дело), всей инженерно-хозяйственной деятельности, инженерно-геологически обосновывая пути рационального использования и охраны геологической среды как важнейшего компонента окружающей среды в целом.

Инженерная геология связана практически со всеми науками геологического цикла. Наиболее тесная связь существует между инженерной геологией и науками геохимического цикла (минералогией, литологией, петрографией, геохимией), тектоникой, динамической геологией и особенно гидрогеологией и мерзлотоведением (рис. 3). Именно поэтому две последние науки объединяются вместе с инженерной геологией в единый цикл геологических дисциплин.

Все научные направления и практические разделы инженерной геологии занимаются изучением подземных вод в своем аспекте, отличном от задач, стоящих перед гидрогеологией. Так, в грунтоведении особое место занимает проблема взаимодействия природных водных растворов с твердыми компонентами грунтов, особенно с тонкодисперсными минеральными, органическими и органоминеральными частицами, в результате которого в дисперсных грунтах образуется связанная вода, оказывающая значительное влияние на состояние и все свойства этих грунтов. В инженерной

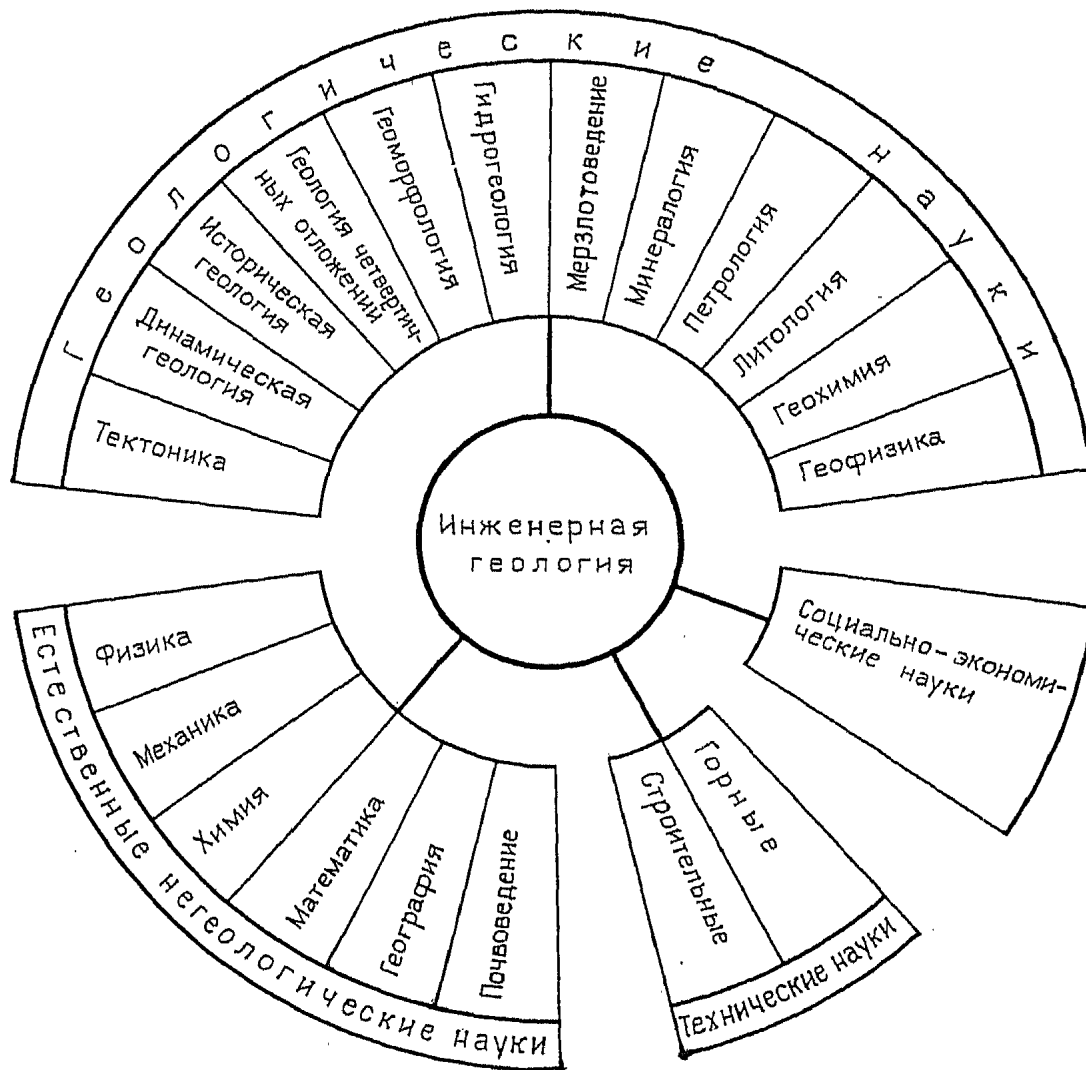


РИС. 2. Связь инженерной геологии с естественными, техническими и социально-экономическими науками

геодинамике подземные воды рассматриваются как один из главных факторов, обуславливающих механизм и динамику развития экзогенных геологических процессов. В региональной инженерной геологии подземные воды оцениваются как важнейший фактор формирования инженерно-геологических условий. В то же время подземные воды — основной объект гидрогеологии, которая изучает их и в целях водоснабжения, и как источник ряда полезных ископаемых, и в связи с их лечебными свойствами и многими другими вопросами, к которым инженерная геология прямого отношения не имеет.

Инженерная геология и мерзотоведение также тесно связаны между собой и по однородности целого ряда задач, стоящих перед ними, и потому, что мерзлые грунты могут переходить в талые (и наоборот) при изменении условий теплообмена. Вместе с тем проблемы мерзловедения не ограничиваются лишь задачами инженерного мерзловедения.

Из негеологических естественных наук инженерная геология теснее всего связана с почвоведением. Эта связь осуществляется



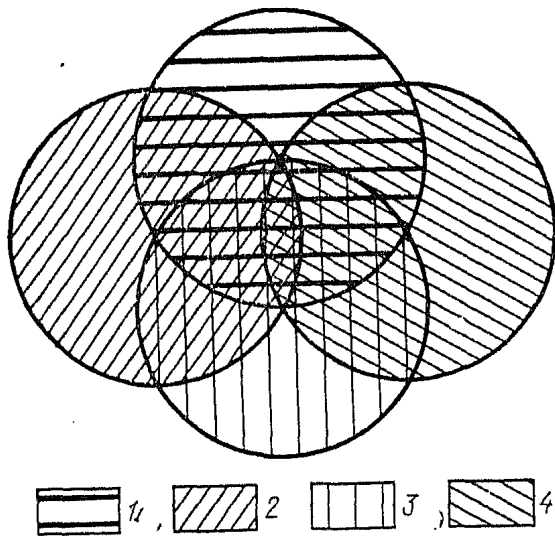


РИС. 3. Соотношение инженерной геологии (1), мерзлотоведения (2), гидрогеологии (3) и почвоведения (4)

через общий объект изучения — почву. Основная задача почвоведения — изучение почвы как среды, в которой произрастают растения. Инженерная геология изучает почву как грунт. Задачи, стоящие перед почвоведением и инженерной геологией, совершенно различны, но, поскольку изучается один и тот же объект (почва), методики его исследования в известной степени совпадают. Некоторые методы исследования были даже заимствованы инженерной геологией у почвоведения, так как ряд основателей инженерной геологии (Ф. П. Саваренский, П. А. Зе-

мятченский, М. М. Филатов и др.) по своему образованию и опыту работы были почвоведом и принесли в инженерную геологию из почвоведения не только отдельные методы исследования, но и методологию этой науки (например, докучаевский генетический подход при изучении почв явился основой при изучении грунтов).

Связь инженерной геологии со строительными и горными науками осуществляется как непосредственно, так и через механику грунтов. Она рассматривает те общие закономерности, которые вытекают из применения к грунтам законов теоретической и строительной механики. Исследования в этой области позволяют истолковывать явления, связанные с изменением состояния грунтов при передаче на них внешнего воздействия. Возведение крупных инженерных сооружений, передающих большие статические, а часто и динамические нагрузки, настоятельно требует приложения законов механики при изучении грунтовых толщ. Механика грунтов решает актуальные задачи, важные не только с точки зрения запросов строительной практики и горного дела, но и с позиций общего развития инженерной геологии.

Таким образом, инженерная геология связана с широким кругом естественных и технических наук. Среди них фундаментальными науками для инженерной геологии были и остаются, как уже отмечалось, науки геологического цикла, а также физика, механика, химия (прежде всего физическая химия и коллоидная химия) и математика.

# **ЧАСТЬ I. ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И СЛАГАЕМЫХ ИМИ МАССИВОВ**

---

## **ГЛАВА I.**

### **ПЕТРОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД**

#### **ВЛИЯНИЕ ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО СОСТАВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ИХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ**

Изучение горных пород в инженерной геологии имеет свои особенности. Одна из них заключается в том, что горные породы рассматриваются как грунты в виде многокомпонентных систем, состоящих из твердого, жидкого, газообразного и живого компонентов. Твердый компонент является основной частью горных пород, так как в большинстве случаев он вмещает (в порах, трещинах и других пустотах) все остальные компоненты. Свойства горных пород, рассматриваемых как грунты, зависят от состава компонентов и взаимодействия их между собой. Но поскольку твердая составляющая в большинстве случаев является основной, то, в первую очередь, следует рассмотреть влияние петрографического состава горных пород на их инженерно-геологические свойства. При этом под петрографическим составом горных пород мы будем понимать не только их минеральный состав, но и строение твердого компонента грунтов.

Горные породы состоят из кристаллов минералов, их обломков, органического вещества, органо-минеральных соединений и льда. В зависимости от состава горных пород изменяются свойства грунтов. Однако при одном и том же составе свойства грунтов могут быть неодинаковы, поскольку они зависят от строения породы, т. е. от ее структуры и текстуры.

Возьмем, например, кварцевый песок. При одинаковом содержании кварца песок может быть крупным и мелким. В крупном песке водопроницаемость и сопротивление сдвигу будут значительно больше, чем в мелком. В этом сказывается роль структуры песка. Два кварцевых песка с одинаковой крупностью зерен в зависимости от расположения частиц и текстуры также могут иметь неодинаковые свойства. В плотных крупных кварцевых песках водопроницаемость меньше, чем в таких же песках рыхлого сложения, а сопротивление сдвигу, наоборот, больше.

Мы рассмотрели пример, относящийся к пескам — осадочным породам, у которых структурные связи между слагающими их частицами наименее прочные. В сухом состоянии пески — рыхлые породы, сыпучие тела. В качестве противоположности таким породам рассмотрим породы, имеющие прочные структурные связи, благодаря которым они обладают монолитностью и высокой прочностью. К таким породам, в частности, относятся все магматические породы.

В ряду магматических пород прочностные и деформационные свойства также изменяются в зависимости от их структурно-текстурных особенностей (табл. 1). Данные таблицы показывают, что

Т а б л и ц а 1

Прочностные свойства андезито-базальтов. По Н. В. Овсянникову

Минералогические типы андезито-базальтов	Структура	Число определенных	Прочность породы (в МПа) при пористости (в %)		
			0—5	5—20	20—40
Авгитовый	Интерсертальная	41	147	112	62
Гиперстеновый	»	36	167	128	58
Оливиновый	»	43	224	141	76
Авгитовый	Витрофировая	21	88	68	21
Гиперстеновый	»	32	109	92	—
Оливиновый	»	4	146	—	—

наибольшей прочностью обладают оливиновые разновидности андезито-базальтов, а наименьшей — авгитовые. Андезито-базальты одинакового состава с витрофировой структурой основной массы (преобладает стекло) имеют значительно меньшую прочность, чем породы с интерсертальной структурой (стекло находится на контактах между минеральными зёрнами).

Любые породы, независимо от того, принадлежат ли они к магматическим, осадочным или метаморфическим, всегда будут иметь свойства, определяющиеся их составом и строением, т. е. их петрографическим составом в широком понятии этого термина. Петрографический состав грунтов влияет на состав других компонентов. Например, только в грунтах, содержащих глинистые минералы, образуется связанная вода. В магматических, метаморфических и осадочных сцементированных породах, которые обычно называют скальными грунтами, трещины, как правило, преобладают над порами. В скальных грунтах, среди трещинных вод резко преобладают свободные виды воды. Общеизвестно, что состав подземных вод в значительной степени определяется составом пород, в которых они находятся. Газовый компонент переходит в адсорбированные и заземленные состояния, преимущественно в дисперсных грунтах. Состав микроорганизмов, содержащихся в грунте, зависит от состава грунтов, подземных вод и т. д.

Петрографический состав, или петрографические особенности, пород определяются их генезисом, условиями формирования. Называя три основные группы горных пород: магматические, осадочные и метаморфические, мы сразу же представляем условия, в которых сформировалась порода, относящаяся к одной из этих основных групп. Можно сказать, что три основные петрографические группы пород в то же время являются их основными генетическими группами. Основной тезис грунтоведения: свойства грунтов зависят от их генезиса — выражается через зависимость свойств грунтов от состава и строения.

### **ВЛИЯНИЕ ГЕНЕЗИСА НА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД**

Под генезисом в геологии обычно понимают происхождение горных пород, т. е. образование и формирование их в определенных условиях под влиянием геологических процессов.

Магматические породы формируются в результате застывания магмы и характеризуются наличием жестких кристаллизационных связей, имеющих химическую природу (ковалентные, ионные и др.). Такого же типа связи возникают в процессе метаморфизма. В группу осадочных пород входят самые различные по своим свойствам образования, начиная с прочных обломочных сцементированных пород, обладающих такими же химическими структурными связями, как магматические и метаморфические, и кончая современными биогенными озерно- и аллювиально-болотными отложениями, у которых структурные связи химической природы отсутствуют и преобладают связи молекулярного и ионно-электростатического характера. Таким образом, характер структурных связей является важнейшим показателем грунтов, связывающим их состав, строение и свойства с генезисом.

У абсолютного большинства магматических пород (интрузивных и эффузивных) между структурными элементами преобладает ковалентный тип связей. Эта важная инженерно-геологическая особенность магматических пород обеспечивает высокую прочность, значительно превосходящую нагрузки, известные в инженерной практике (сопротивление одноосному сжатию достигает у базальтов 450 МПа, железистых кварцитов — 380 МПа, габбро и диабазов — 320 МПа и т. д.). Генезис магматических пород обусловил и такие свойства, как нерастворимость их в воде и практическую водонепроницаемость. Поэтому магматические породы широко используются в качестве оснований и вместилищ для сложных и ответственных сооружений.

Метаморфические породы по ряду своих инженерно-геологических свойств (прочности, водопрочности и др.) схожи с магматическими породами, так как в них также преобладают ковалентные связи. Однако их генезис определил инженерно-геологические особенности, которых нет у магматических пород. У большинства метаморфических пород проявляется анизотропия свойств (гнейсы,

сланцы и др.). Прочность на сжатие, сопротивление сдвигу, модуль упругости значительно ниже вдоль сланцеватости, чем перпендикулярно к ней. Сланцеватостью определяется и значительная выветриваемость этих пород, а также довольно низкая устойчивость на природных склонах, в бортах карьеров и других искусственных выработок. Среди метаморфических пород наиболее неблагоприятными в инженерно-геологическом отношении являются слабые глинистые сланцы и тектониты (раздробленные, перетертые породы), которые обычно удаляются из оснований сооружений.

Осадочные породы вследствие преобладания в них различных структурных связей наиболее пестрые по своим инженерно-геологическим свойствам. Среди них мы встречаем породы со структурными связями химической природы: обломочные сцементированные, пылеватые и глинистые сцементированные, а также химические и биохимические породы. Их свойства зависят от состава (различная растворимость кремнистых, карбонатных, сульфатных и галоидных пород), структуры (например, крупно- и мелкокристаллические известняки обладают различной прочностью), типа цемента (кремнистого, глинистого) и т. д.

Инженерно-геологические особенности осадочных пород без жестких связей во многом определяются принадлежностью к тому или иному генетическому типу. Генетический тип, согласно А. П. Павлову, представляет собой совокупность отложений, образовавшихся в результате работы определенных геологических агентов. При этом выделяются морские аллювиальные, озерные, ледниковые, водно-ледниковые, элювиальные, делювиальные, пролювиальные, гравитационные, эоловые, осадочные породы. Особенности среды и условий первичного осадконакопления наследуются и отражаются в составе пород, их строении и свойствах.

Так, эоловые пески, как правило, полиминеральные, мелкозернистые, хорошо отсортированные (более 70 % частиц имеет размеры от 0,25 до 0,1 мм), окатанные, со скрытой слоистостью. Аллювиальные русловые пески имеют характерную косую слоистость, незначительное содержание пылеватых и глинистых частиц, плохую сортировку и различную окатанность, увеличение дисперсности по течению реки. Песчаные породы межморенных горизонтов полидисперсны, обладают высокой прочностью и слабой сжимаемостью. Даже при наличии одних и тех же структурных связей пески различного генезиса (и другие литологические различия осадочных пород) обладают разными инженерно-геологическими особенностями и свойствами. Таким образом, уже в процессе генезиса породы закладываются ее основные инженерно-геологические особенности, состав, структура и текстура. Так, например, состав магмы и, в частности, содержание в ней основного окисла  $\text{SiO}_2$  предопределяет, какие магматические породы возникнут при ее затвердении — кислые или основные. Типичными представителями первых являются граниты, вторых — базальты. В гранитах преобладают кварц, полевые шпаты, слюды, в базальтах — амфиболы, пироксены, оливин. Естественно, что при различном составе

породы будут обладать и различными свойствами. Различие в свойствах этих пород еще больше усиливается разницей в их структурно-текстурных особенностях.

При формировании осадочных пород выделяют три стадии: седиментогенез, диагенез, катагенез. Уже на стадии седиментогенеза формируются важнейшие черты породы: ее химико-минеральный состав, размер и форма частиц, слоистость. При превращении осадка в породу (диагенез) происходит его изменение в результате окислительно-восстановительных процессов, растворения отдельных минералов, уплотнения осадка и отжатия из него воды и других процессов. Порода отличается от осадка по своим инженерно-геологическим особенностям и свойствам. И все же генетический подход при инженерно-геологической оценке осадочных пород требует в равной степени учитывать процессы седиментогенеза и диагенеза.

Нельзя забывать, что горные породы претерпевают различные преобразования под влиянием постгенетических процессов (в первую очередь катагенеза и гипергенеза), в результате которых также изменяются инженерно-геологические особенности и свойства грунтов. Процессы катагенеза в значительной степени определяются тектоническим режимом территории, гипергенеза — климатическими условиями. Например, кембрийские гидрослюдистые глины широко развиты на севере и северо-западе Русской платформы. В районе Ленинграда эти глины в течение геологической истории дважды испытывали нагрузку: первую — в палеозое, продолжительную по времени, но меньшую по величине (6—7 МПа), вторую в ледниковый период, большую по величине (8—9 МПа), но менее продолжительную. В течение же значительного геологического времени кембрийские глины были разгружены, происходили их разуплотнение и гидратация. В результате этого кембрийские глины выглядят малоизмененными породами, имеют тугопластичную и полутвердую консистенцию, значительную пористость (30 %) и естественную влажность (14 %). Эти же кембрийские глины в районе г. Вологды испытывали постоянное гравитационное уплотнение от палеозоя до настоящего времени, в результате чего их пористость снизилась до 15 %, а естественная влажность до 5 %. Не меньшие, а, может быть, даже большие изменения претерпевают горные породы под влиянием процесса гипергенеза. Под воздействием этого процесса горные породы, имеющие один и тот же возраст и генезис, могут приобрести различные инженерно-геологические особенности и свойства, и, наоборот, породы разные по генезису и возрасту, будучи в одной климатической зоне, под влиянием процесса гипергенеза приобретают общие черты, имеющие большое инженерно-геологическое значение (рис. 4).

На рисунке схематично показано распределение продуктов выветривания и почвообразования по профилю Архангельск — Астрахань. К северу от г. Тулы климатические условия таковы, что все воднорастворимые соли вымыты из верхних горизонтов горных пород. Южнее г. Тулы в породах может содержаться наиболее труднорастворимая соль —  $\text{CaCO}_3$ , но встречается она на глубине

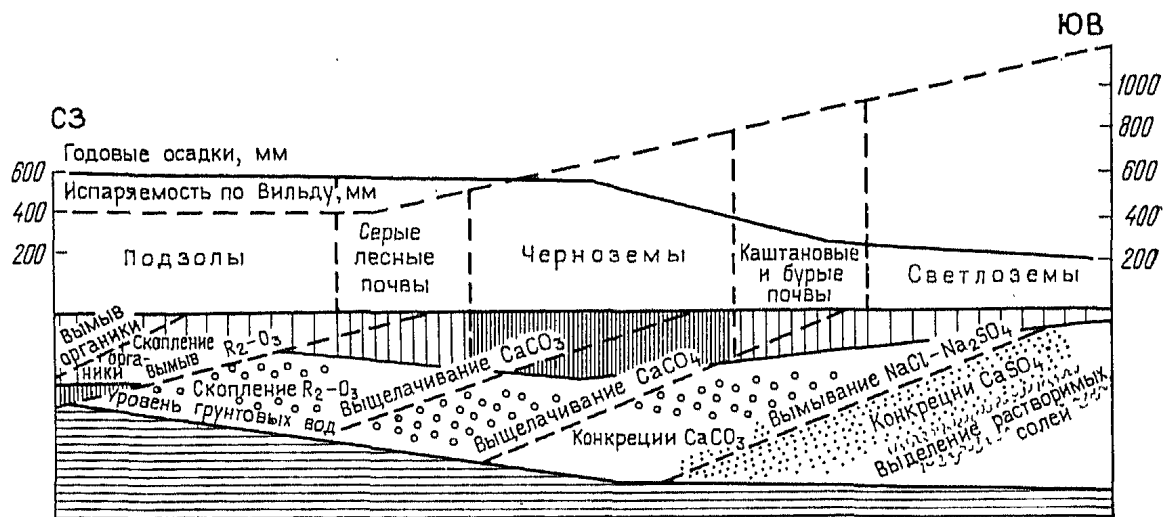


РИС. 4. Распределение продуктов почвообразования и выветривания по профилю Архангельск — Астрахань. По С. А. Захарову

не менее 1,5 м. По мере продвижения на юг, там, где развиты черноземы, каштановые и бурые почвы, карбонатные почвы залегают выше, а под ними встречается  $\text{CaSO}_4$  (гипсовый горизонт). А на самом южном участке профиля, в районе г. Астрахани, даже на поверхности почвы можно встретить такие легкорастворимые соли, как  $\text{NaCl}$ , и другие, образующие солончаки.

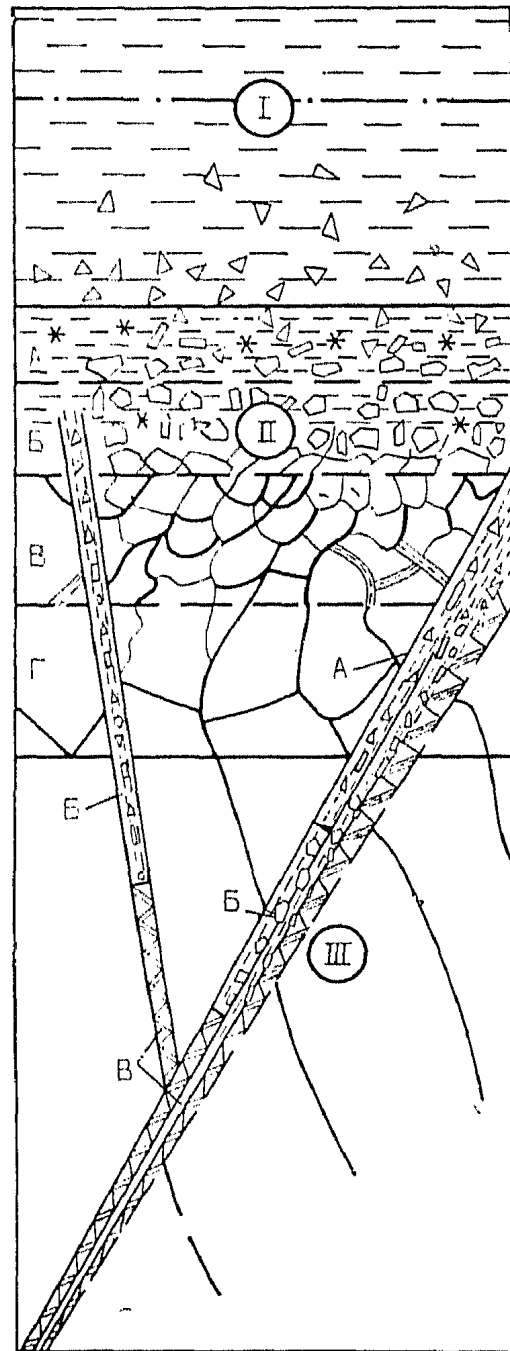
Различные температурные условия, различное количество атмосферных осадков и их испаряемость определили особенности процесса гипергенеза на профиле Архангельск — Астрахань, в результате разные породы в подпочвенном горизонте приобрели общие черты, выражающиеся в отсутствии или содержании в них воднорастворимых солей.

Под влиянием процесса гипергенеза возникает кора выветривания, которая, по Н. В. Коломенскому, сверху вниз делится на четыре зоны: тонкого дробления, зернистая (или мелкообломочная), глыбовая и монолитная. Как видно, процесс гипергенеза наряду с изменением химико-минерального состава грунтов оказывает влияние и на их строение; в частности, нарушает монолитность грунтовых толщ и скальных массивов. Особенно сильно изменяются породы, имеющие структурные связи химической природы — скальные грунты. Об этом дает представление схема, разработанная Г. С. Золотаревым в 1971 г., которая наиболее подходит для скальных грунтов (рис. 5).

Таким образом, постгенетические процессы сильно изменяют первоначальный облик грунтов. Под их воздействием меняются такие важнейшие инженерно-геологические особенности, как химико-минеральный состав и строение — факторы, определяющие свойства грунтов. Поэтому при генетическом подходе к изучению грунтов важно знать не только их генезис, но и постгенетические процессы. По существу мы можем понять все инженерно-геологические особенности породы и ее свойства только в том случае, если будем знать геологическую историю территории, где находится эта

РИС. 5. Схема расчленения коры выветривания. По Г. С. Золотареву.

Зоны выветривания и их характерные особенности: I — дисперсная — полного химического преобразования исходных пород; глины, суглинки и супеси в основании с редкой щебенкой, выщелоченные и ожелезненные, карбонатизированные и т. п. Возможно разделение на 2—3 горизонта. Слабо изучена в инженерном отношении; II — обломочная — преобладание физической дезинтеграции и частичное химическое разложение; по степени раздробленности и химического разложения количеству минеральных новообразований и физико-механическим свойствам подразделяются обычно на 4 горизонта, обозначаемых А, Б, В и Г; III — трещинная — раздробление массива и начало разложения пород по крупным трещинам и тектоническим зонам; появление на значительных глубинах. Возможно образование зон выветривания малой толщины вдоль основной трещины



порода с момента ее образования и до наших дней. В этом заключаются максимальные возможности генетического подхода в инженерной геологии. Поэтому тезис: свойства грунтов зависят от их генезиса — надо понимать широко, включая в понятие «генезис» не только образование породы, но и все постгенетические процессы, все, что порода «пережила» с момента своего образования. Понятно, что провести такой анализ тем сложнее, чем древнее возраст породы.

### ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТА НА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Горные породы формируются и существуют в пространстве и времени. Время, как и пространство, определяет длительность и последовательность процессов формирования горных пород, смену событий, которые испытали они после того как возникли, т. е. их генезис и постгенетические процессы. Следовательно, связь времени (возраста) с формированием горных пород выступает как опосредствованная, т. е. через длительность породообразующих и вторичных процессов. При прочих равных условиях длительность последних определяет интенсивность постгенетических изменений в породах, о чем свидетельствует тот факт, что древние породы обыч-



но более изменены по сравнению с молодыми. Однако имеется немало примеров, когда связь между длительностью вторичных процессов и интенсивностью изменения осадочных пород имеет обратный характер, т. е. среди древних осадочных образований встречаются нелитифицированные разности, а среди молодых — литифицированные. Известно также, что палеозойские и допалеозойские эффузивы вследствие самопроизвольной раскристаллизации стекла, происшедшей с течением времени, лишены обычно стекловатого базиса, тогда как в более молодых эффузивных породах, например четвертичных, он всегда присутствует.

Время — длительность имеет важное значение также для других химических реакций, протекающих в породах, — реакций растворения, замещения, дезинтеграции, перекристаллизации и т. п. В течение геологического масштаба времени эти реакции могут изменить породы настолько сильно, что превращают их в качественно иные геологические образования (переходы песков в песчаники, глин в аргиллиты в процессе литификации, скальных пород в рыхлые в процессе выветривания, магматических и осадочных пород в метаморфические в ходе метаморфизма и т. д.). Естественно, что с изменением общего состояния породы меняются и их отдельные особенности, важные в инженерно-геологическом отношении. Так, при превращении песка в песчаник увеличивается объемная масса и уменьшается пористость, появляются связанность и монолитность, повышается прочность, снижается водопроницаемость и т. д., причем чем дольше при прочих равных условиях протекает процесс литификации песка, тем отчетливее проявляются свойства, присущие песчанику. При ином характере процессов (например, выветривание) длительность их проявления может привести к противоположным результатам. Так, скальные породы под влиянием выветривания с течением времени могут превращаться из монолитных, прочных, водонепроницаемых пород в рыхлые пористые массы, способные при взаимодействии с водой частично растворяться, приобретать пластичность, находиться в текучем состоянии и т. п. При этом следует иметь в виду, что одни и те же изменения могут быть результатом как слабых длительных, так и кратковременных, но интенсивных процессов.

Время — последовательность позволяет реконструировать геологическое прошлое, устанавливать соотношения между породами: «раньше — позже», «одновременно», «предшествует» и т. д. Смена событий определяется путем непосредственных наблюдений в геологических разрезах. Знание последовательности или одновременности геологических событий важно не только для реконструкции процессов породообразования, но и тех изменений, которые произошли в породах в постгенетическое время.

В ряду однотипных по генезису, но разновозрастных комплексов отложений отражаются особенности хода природных процессов, их последовательность: изменяется длительность периода осадкообразования (снижается от древних периодов к молодым), происходит «приспособление» петрографических типов пород к новым услови-

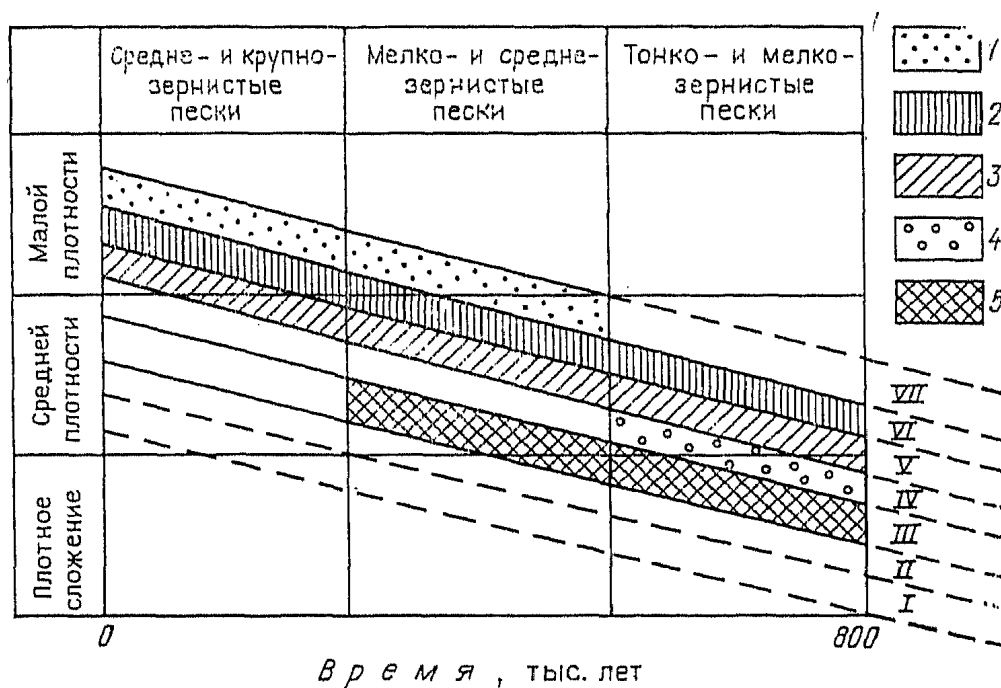


РИС. 6. Изменение дисперсности и плотности сложения песчаных пород по седиментационным ритмам (I—VII) в зависимости от их возраста. По А. А. Жедялису.

Пески: 1 — современного аллювия ( $a$  IV), 2 — древнеаллювиальные ( $a$  III), 3 — краевых образований ( $q^t$  III), 4 — флювиогляциальных отложений ( $f$  III), 5 — межморенных горизонтов ( $aq$  II—III,  $aq$  II)

ям, варьируют зональность и площадное распространение тех или иных отложений. Эти особенности оказывают существенное влияние на состав, структуру и свойства пород (рис. 6). Кроме того, величины дисперсий свойств пород также определяются возрастом, снижаясь у древних отложений в сравнении с более молодыми. Это было показано на примере моренных отложений Прибалтики А. А. Жедялисом в 1975 г.

Детальное изучение скальных горных пород района г. Красноярска, проведенное Н. С. Красиловой в 1963 г., позволило выявить инженерно-геологические особенности разных по возрасту комплексов. Так, сравнение песчаников терригенно-карбонатных формаций кембрия Манского прогиба и девона Рыбинской впадины показало, что эти однотипные в петрографическом отношении породы имеют свои структурно-текстурные особенности и различную инженерно-геологическую характеристику (табл. 2). При этом отличаются не только свойства пород в массиве, но и сами массивы разновозрастных образований.

Массивы, сложенные породами кембрия, характеризуются сильной тектонической раздробленностью, сложной складчатостью, повышенной трещиноватостью. Предельная крутизна устойчивых природных откосов, сложенных терригенно-карбонатными породами кембрия, составляет  $38^\circ$ , высота их достигает в среднем 95 м. Областям распространения этих пород свойственны узкие гребневидные водоразделы с абсолютными отметками 600—650 м. В то же время массивы, сложенные более молодыми девонскими терригенно-карбонатными породами, характеризуются преобладанием тре-

Таблица 2

**Инженерно-геологическая характеристика разновозрастных песчаников.**  
По данным Н. С. Красиловой

Петрографический вид пород	Плотность минералов, г/см <sup>3</sup>	Водопоглощение, %	Водонасыщение, %	Прочность, МПа		
				в воздушно-сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии	после замораживания (25 циклов)
Песчаники кварцевые	<u>2,77*</u>	<u>0,37</u>	<u>0,41</u>	<u>110</u>	<u>98</u>	<u>67</u>
	2,41	0,18	0,21	42	30	25
Песчаники полевошпатово-кварцевые	<u>2,75</u>	<u>0,13</u>	<u>0,15</u>	<u>140</u>	<u>70</u>	<u>70</u>
	2,37	3,35	3,43	25	19	16
Песчаники граувакковые	<u>2,73</u>	<u>1,02</u>	<u>1,15</u>	<u>67</u>	—	<u>48</u>
	2,34	5,78	6,0	15	11	0
						(выдержал 5 циклов)

\* В числителе данные изучения песчаников кембрийского возраста, в знаменателе—девонского.

щин выветривания, устойчивыми природными откосами высотой до 30 м (при близких к вышеописанным величинам крутизны склона и его экспозиции). Рельеф холмисто-грядовый с округловерхними водоразделами (абс. отметки до 300—360 м). Приведенные данные отражают закономерности изменения прочности пород одинаково-петрографического состава в зависимости от их возраста.

Обобщая большой экспериментальный материал исследований по инженерно-геологическим свойствам различных пород. Д. Хендин пришел к выводу, что представления о влиянии времени только что начали разрабатываться и необходимо провести большой объем экспериментальных работ в целях установления зависимостей свойств от времени для всех пород. Кроме того, требуются целенаправленные теоретические исследования, которые позволят экстраполировать лабораторные данные к геологически реальным условиям.

**ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ  
ГОРНЫХ ПОРОД НА ИХ  
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ**

Генезис и возраст отложений являются важнейшими, но далеко не единственными факторами, обуславливающими инженерно-геологические особенности пород. Очень часто породы, сформировавшиеся в одинаковых фациальных условиях и имеющие один и тот

же геологический возраст и, более того, пережившие совершенно однотипную геологическую историю в течение длительного этапа постседиментационных преобразований, имеют в настоящее время различные свойства. Такая картина является прямым следствием их неодинакового современного пространственного (координатного) положения.

Существенное, а в ряде случаев и решающее влияние современного пространственного положения на инженерно-геологические особенности пород и массивов, сложенных ими, обусловлено целым рядом причин: 1) нестационарной или квазифункционной изменчивостью показателей состава и свойств пород одного стратиграфо-генетического комплекса или одной геологической формации; 2) различным характером современной теплообеспеченности и увлажненности пород, занимающих неодинаковое координатное положение (особенно широтное и высотное) в пределах континентов Земли; 3) различным структурным (прежде всего неотектоническим) и орографическим положением массива пород, что во многом определяет степень расчлененности и дренированности территории и, как следствие этого, свойств пород; 4) неодинаковым комплексом современных экзогенных геологических процессов (в первую очередь, криогенных и гипергенных), влияющих на состояние и свойства пород; 5) неодинаковым напряженно-деформированным состоянием пород в разных точках массива и др. Вследствие этого дисперсность, химико-минеральный состав, влажность, фазовое состояние влаги, структурные особенности и, как следствие этого, инженерно-геологические свойства пород одного и того же возраста и генезиса могут оказаться различными, а в ряде случаев — принципиально отличными. При этом различный уровень теплообеспеченности и увлажненности обуславливает общерегиональное широтное в пределах равнинных платформенных и высотное (высотно-поясное) в пределах горно-складчатых областей изменение состава, состояния и свойств пород, а различное неотектоническое и орографическое положение — и локальное (разного порядка), часто очень контрастное изменение тех же параметров [16, 40].

Нестационарный режим изменчивости показателей инженерно-геологических особенностей пород характерен для толщ разных генетических типов. Наиболее отчетливо он проявляется в аллювиальных отложениях: вниз по течению реки закономерно увеличивается дисперсность пород (рис. 7) и в соответствии с этим изменяются и их свойства [17].

Наиболее контрастно влияние современного пространственного положения проявляется в определении закономерностей изменения состояния горных пород. На рис. 8 показана связь этого параметра с широтным положением района: в южной части Западно-Сибирской плиты развиты талые и немерзлые грунты твердой консистенции, в центральной — такие же грунты пластичной консистенции, а в северной — многолетнемерзлые, которые при протаивании приобретают текучую, текучепластичную или реже — мягкопластич-

РИС.7. Характер изменения среднего диаметра частиц пород в разрезах второй (а), первой (б) надпойменных террас и поймы (в), в долинах рек Надым (1), Пур (2) и Таз (3) северной части Западно-Сибирской плиты. По Н. А. Филькину

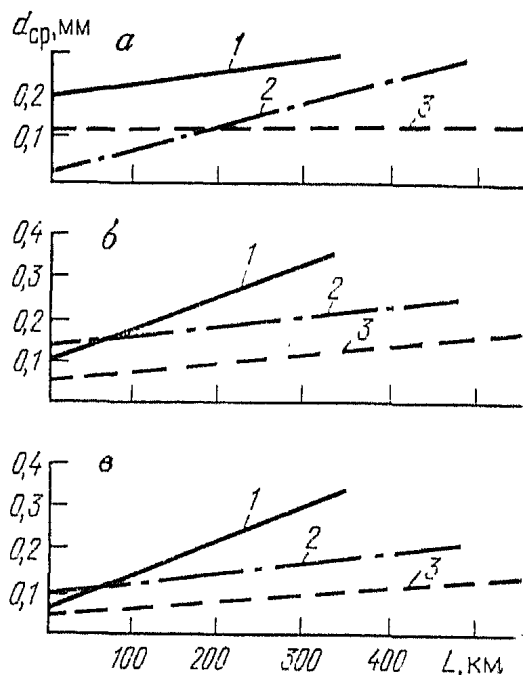
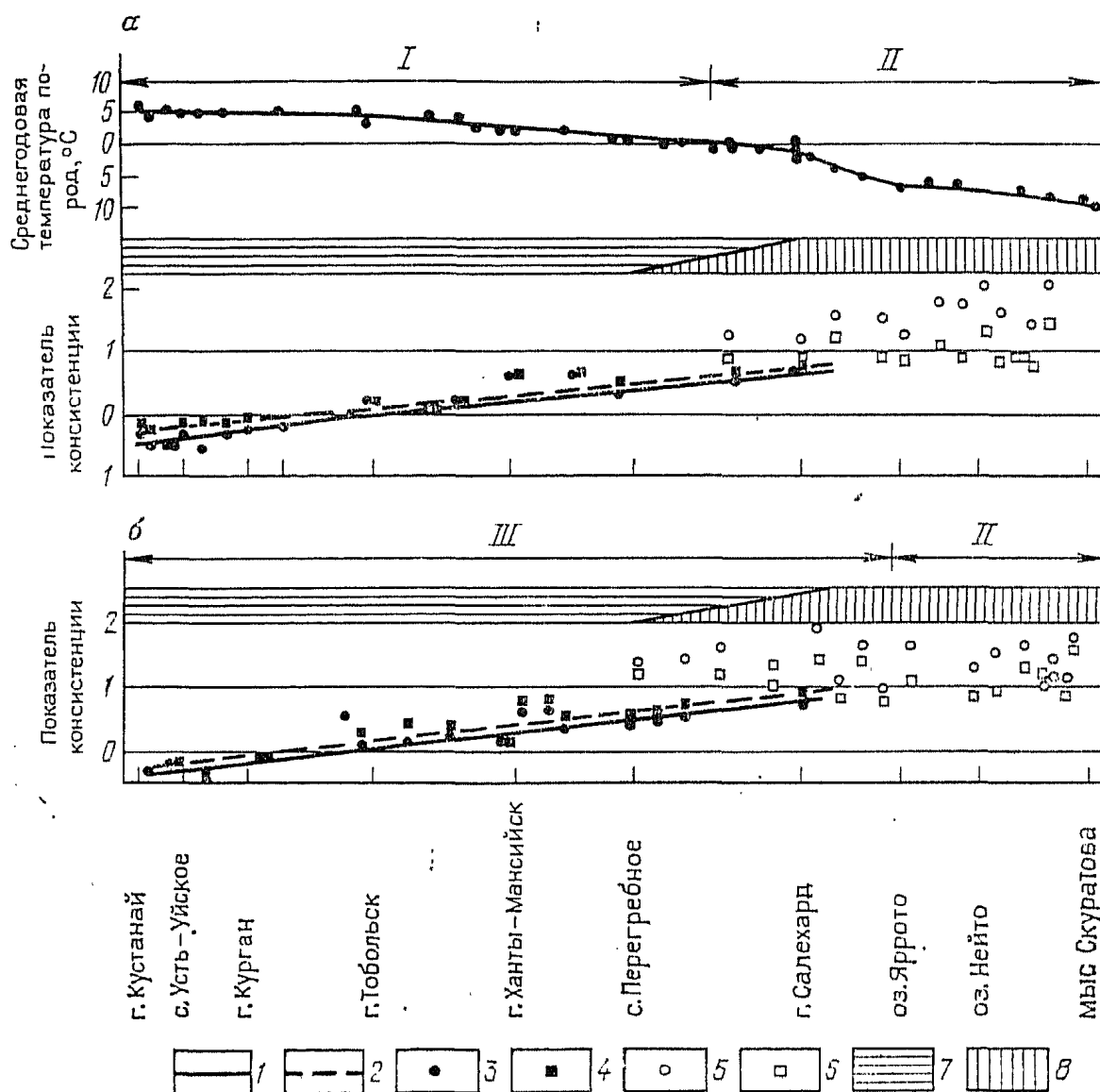


РИС. 8. Характер широтного изменения современного состояния глинистых верхнеплиоцен-нижнечетвертичных и среднечетвертичных (а) и верхнечетвертичных (б) отложений на приречных участках на глубинах 0,5—5 м (1) и в верхней 10-метровой части разреза (2).

3—4 — среднее значение показателя консистенции талых пород (3 — в интервале глубин 0,5—5 м, 4 — в верхней 10-метровой зоне); 5—6 — то же, многолетнемерзлых пород при оттаивании (5 — в интервале глубин 0,5—5 м, 6 — в верхней 10-метровой части толщи); 7—8 — породы (7 — талые (и немерзлые), 8 — мерзлые); I—III — отложения (I — континентальные, II — морские, III — аллювиальные и озерно-аллювиальные)



ную консистенцию. Аналогичная зависимость современного состояния глинистых пород получена для верхней части разреза верхнеплиоцен-нижнечетвертичных отложений, слагающих междуречные равнины, и верхнечетвертичных образований надпойменных террас.

Различное пространственное (широтное и высотное) положение массивов влияет на современное состояние слагающих их пород и на содержание карбонатов, воднорастворимых солей, рН среды, влажности и других показателей состава и свойств пород [9, 40].

Следует подчеркнуть, что зависимость инженерно-геологических особенностей пород от координат пространства отчетливо проявляется и в границах одного массива и даже в одном разрезе. Например, хорошо известно, что плотность скелета грунта одного возраста, генезиса и состава, как правило, возрастает с увеличением глубины залегания пород, причем особенно контрастно в верхних горизонтах разреза. Это явление обусловлено, с одной стороны, увеличением уплотняющей гравитационной нагрузки с возрастанием глубины залегания пород, а с другой — активным их разуплотнением в верхних горизонтах разреза под влиянием процессов выветривания. Влияние последних столь существенно, что, как правило, деформационные свойства пород возрастают, прочностные — резко падают, а в определенных условиях в разрезах пылеватых пород они обуславливают формирование у них принципиально нового инженерно-геологического свойства — просадочности, которое несвойственно более глубоко залегающим породам этого же стратиграфо-генетического комплекса.

Изменение показателей состава и свойств грунтов по разрезу характерно не только для толщ немерзлых и талых пород, но и для многолетнемерзлых толщ. Так, льдистость и суммарная влажность совершенно однородных по дисперсности и химико-минеральному составу эпигенетически промерзших глинистых грунтов, как правило, закономерно убывает вниз по разрезу (рис. 9, кривая *а*). Толщи этого же генезиса, сложенные переслаиванием глинистых и песчаных грунтов, характеризуются высокой и мало меняющейся влажностью (льдистостью) по разрезу (см. рис. 9, кривая *б*). Такой же тип изменчивости характерен и для сингенетически промерзших многолетнемерзлых пород. Однако если учесть увеличение льдистости (влажности) толщ за счет повторно-жильных льдов, то и в разрезах сингенетически промерзших пород наибольшая льдистость будет характерна для верхних частей разреза (3—6 м в большинстве районов), а ниже она будет сначала уменьшаться, а потом оставаться более или менее постоянной.

Таким образом, пространственное положение горных пород при инженерно-геологическом изучении имеет такое же важное

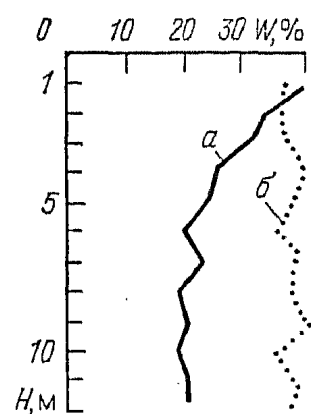


РИС. 9. Изменение суммарной влажности эпигенетически промерзших глинистых (*а*) и переслаивающихся глинистых и песчаных (*б*) пород

значение, как их генезис и возраст. Без учета пространственного положения грунтов невозможны качественная характеристика геологической среды, правильная ее типизация по степени сложности, изменчивости и чувствительности к планируемым антропогенным воздействиям.

## **ГЛАВА 2. ВЛИЯНИЕ ТЕКТНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД**

### **ТЕКТНИЧЕСКИЙ ФАКТОР — ОДИН ИЗ ГЛАВНЫХ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД**

Одной из главнейших теоретических задач грунтоведения является разработка учения о формировании инженерно-геологических свойств горных пород и их массивов. В предыдущей главе показано, что формирование свойств грунтов должно рассматриваться в тесной связи с генезисом и историей их существования, с теми геологическими процессами, влияние которых они испытали. Еще в 1939 г. в первом учебнике «Инженерная геология» Ф. П. Саваренский писал: «Горные породы при дислокации под действием сжимающих и растягивающих усилий приобретают значительные нарушения своей текстуры». Нельзя не согласиться и с П. Н. Панюковым, который особенно подчеркивал влияние тектонического режима на свойства грунтов. Связь тектонических факторов со свойствами грунтов проанализирована при изучении влияния процессов литогенеза, в первую очередь гравитационного уплотнения, на формирование свойств грунтов в работах В. А. Приклонского, В. Д. Ломтадзе, И. Г. Коробановой и других исследователей.

В то же время во многих работах свойства грунтов рассматриваются на микроуровне с позиций коллоидной и физической химии. Очевидно, что исследование природы свойств таких сложных систем, как природные грунты, требует комплексного рассмотрения взаимосвязи и взаимообусловленности геологических, физических, химических и физико-химических процессов, происходящих не только в земной коре, но и в более глубоких ее сферах.

Не менее очевидно и то, что руководящими, контролирующими факторами при этом следует считать факторы, обусловленные тектоническими движениями — колебательными, складчатыми, разрывными и магматическими. При этом для инженерно-геологического анализа одинаково важны как особенности тектонического режима времени формирования породы, так и тектонические движения в последующие геологические эпохи. Поясним сказанное простейшими примерами.

За последнее десятилетие опубликовано множество работ, свидетельствующих о том, что тектоническое давление является одной из главных сил, определяющих напряженное состояние массивов горных пород. Высокие показатели напряжений, особенно горизонтальных, отмеченные во многих подземных горных выработках и часто значительно превышающие значения напряжений, обусловленных силами гравитации, совершенно справедливо связываются с давлениями, возникающими при тектонических движениях.

Хорошо известно также, что тектонические движения дизъюнктивного характера являются главной причиной возникновения блочности, вторичной трещиноватости — главного фактора, определяющего инженерно-геологические свойства массивов скальных пород. Наконец, тектоническим процессам принадлежит ведущая роль формирования современного инженерно-геологического облика осадочных горных пород — их состава, строения и свойств.

Сказанным отнюдь не умаляется значение палеогеографических и современных ландшафтно-климатических факторов в образовании осадочных горных пород определенного вещественного состава, сложения и состояния. Очевидно, однако, что тектонические обстановки в данном случае первичны, палеогеографические — во многом зависят от них. Так, хорошо известно, что такие неблагоприятные в инженерно-геологическом отношении породы, как гипс и легкорастворимые соли, образуются в аридном климате. Однако и в этом случае руководящая роль принадлежит тектоническому режиму. Для создания условий, благоприятных для накопления указанных осадков, недостаточно аридности климата. Необходимо, чтобы бассейн осадконакопления был изолирован от открытого моря, т. е. необходимы определенные тектонические движения. Определяющая роль принадлежит тектоническому режиму и при формировании элювиальных грунтов и кор выветривания. Конечно, климатический фактор определяет характер физических, химических и физико-химических процессов, происходящих при выветривании горных пород, но длительность этих процессов, сохранение образующегося материала при его транспортировке зависят от особенностей тектонического режима: скорости тектонических движений, их продолжительности и т. д.

Тектонический режим определяет пространственное положение осадочных фаций, их строение, гранулометрический и минеральный состав осадка. Известно, что при быстром погружении дна бассейна и коротких путях транзита формируются плохо отсортированные толщи полимиктового состава, содержащие неустойчивые минералы, тогда как при медленном погружении дна бассейна отлагаются хорошо отсортированные, однородные, сложенные устойчивыми минералами осадки (табл. 3).

Напряжения, возникающие при тектонических движениях земной коры, приводят к изменению структуры и текстуры горной породы, ее минерального состава и свойств. Наиболее существенные преобразования происходят при напряжениях, характерных для



## Влияние тектонического режима на состав и строение осадочных толщ. По В. Е. Хайну

Тектонические зоны			
Основные типы осадочных пород	слабого погружения (центральные части платформ, срединные массивы геосинклинальных областей)	умеренного погружения (склоны платформ, передовые и внешние прогибы геосинклинальных областей)	интенсивного погружения (внутренние прогибы геосинклинальных областей)
Терригенные (обломочные)	Редкие галечники (конгломераты), однообразного (олигомерного) состава, мало-мощные, хорошо отсортированные и окатанные. Аркозовые, реже кварцевые пески, обычно светлые, иногда косослоистые в виде тонких выдержанных пластов	Галечники (конгломераты) иногда значительной мощности, пестрого состава (полнмиктовые), разной степени сортировки и окатанности. Кварцевые, реже полимиктовые песчаники, светлые или серые (серо-зеленые), часто с глауконитом, образуют мощные пачки	Конгломераты и брекчии, нередко глыбовые, иногда с туфогенным заполнителем. Полимиктовые (граувакковые) и туфогенные зеленовато-серых тонов
Терригенно-хемогенные (глинистые) Хемогенные	Глинистые минералы сохраняют состав, который они имели или приобрели при выветривании в области сноса. Характерен каолинит Оолитовые и доломитизированные известняки, доломиты, опоки, желваковые фосфориты	Глинистые минералы частично утрачивают свой первичный состав. Все большую роль играют гидрослюда и монтмориллонит Пелитоморфные известняки и мергели, доломиты, гипсы, каменная и калийные соли, пластовые фосфориты, кремни	Среди глинистых минералов преобладают гидрослюда, появляются хлорит и мусковит Пелитоморфные известняки и мергели, глинисты (яшмы и пр.), конкреция глинистых сидеритов
Органогенные	Известняк-ракушечники, водорослевые известняки, органично-обломочные известняки, мелкие биогермы (риффы)	Форамниферовые известняки, барьерные и окранные рифы	Форамниферовые (глобигерниновые) известняки, радиоляриты, рассеянные кораллово-водорослевые биогермы, приуроченные к вулканическим островам
Общие признаки осадочных толщ	Малая мощность, четкая, но крупная ритмичность, слабые диагенетические изменения, в том числе слабая цементация. Породы окрасены в светлые, часто пестрые тона	Умеренная мощность, четкая средняя ритмичность, значительные диагенетические изменения. В окраске преобладают темные, зеленоватые и сероватые тона	Большая мощность, ритмичность мелкая или отсутствует, глубокие диагенетические и катагенетические изменения. Окраска пород преимущественно темная до черной

зон метаморфизма, но и в зонах катагенеза тектоническое давление, возникающее при складкообразовании, существенно меняет инженерно-геологические свойства пород.

Наиболее полно связи между тектоническими обстановками и инженерно-геологическими свойствами горных пород можно выявить при исследовании стадийности процессов литогенеза (см. гл. 7). Мы рассмотрим лишь некоторые вопросы, наиболее важные в интересующем нас аспекте: установление влияния гравитационного уплотнения, геологического времени и напряжений, возникающих при складчатых тектонических движениях, на характер и интенсивность постгенетических изменений пород, определяющих, в свою очередь, изменение их инженерно-геологических свойств.

### **ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Наиболее подробно в геологической литературе рассмотрен вопрос о роли давления от веса вышележащих пород в постгенетических преобразованиях осадка. Установлена определенная зональность в характере и интенсивности переработки пород по глубине. Эта зональность выражается в появлении новообразованных минералов, определенных структурно-текстурных признаках пород, в изменении их свойств. Такая зависимость прослежена А. Г. Коссовской и В. Д. Шутовым в терригенных мезозойских и верхнепалеозойских отложениях Западного Верхоянья, В. Д. Шутовым в отложениях рифейского и палеозойского возраста Пачелмского прогиба, В. И. Муравьевым в мезозойских отложениях Прикаспийской низменности, Г. Н. Перозио в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности, Н. А. Лизалеком в девонских породах Южно-Минусинской впадины, А. В. Копелиовичем в доордовикских песчаниках Приднестровья и многими другими авторами, особенно в нефтяной геологии.

Обращает внимание тот факт, что степень эпигенетической переработки терригенных пород различна в разных регионах на примерно равных глубинах. Так, по данным В. И. Муравьева, нижнемезозойские терригенные породы Саратовского Поволжья не меняют сколько-нибудь заметно своего первичного структурного типа на глубину до 2500 м. Отмечаются лишь некоторое сближение терригенных зерен и появление регенерационных каемок. Пористость песчаников велика и составляет 20—26 %, пористость глин также значительна — 26—28 %. В. Д. Шутов указывает, что уже на глубине 1200 м палеозойские породы в центральной части Пачелмского прогиба претерпели существенные изменения, на что указывает появление кварцево-регенерационного цемента. В верхней зоне пористость песчаников превышает 10 %, а в нижней она падает до первых процентов. Еще более интенсивная переработка пород отмечена А. В. Копелиовичем. По его сведениям, уже на глубинах 1500—1600 м доордовикские песчаники Приднестровья можно сравнивать с метаморфическими породами. В. Д. Шутов и

А. В. Копелиович совершенно справедливо связывают эти различия с возрастом пород, т. е. с длительностью нахождения породы под воздействием постгенетических процессов.

Интересные исследования, характеризующие влияние процессов гравитационного уплотнения на формирование инженерно-геологических свойств горных пород, в первую очередь глинистых, выполнены и в инженерной геологии. Следует подчеркнуть, что процесс гравитационного уплотнения осадочных горных пород нельзя сводить только к уменьшению их пористости. Как известно, гравитационное уплотнение сопровождается дегидратацией породы, изменением состава и концентрации поровых растворов, т. е. является первопричиной сложных химических и физико-химических реакций в системе горная порода — поровый раствор.

Еще в 1948 г. В. А. Приклонский обратил внимание грунтоведов на связь между процессами петрогенеза и формированием свойств грунтов. Инженерно-геологическая классификация глинистых пород, предложенная в 1956 г. В. Д. Ломтадзе, построена с учетом степени их литификации. Широко известны работы И. Г. Коробановой [18] по изучению физического состояния и физико-механических свойств субаквальных глинистых плиоцен-четвертичных отложений Бакинского архипелага в зависимости от стадии катагенеза.

В настоящее время можно считать установленным, что существует определенная зональность в изменении свойств осадочных горных пород по глубине, обусловленная зональностью процессов литогенеза. Каждой зоне отвечают породы определенной степени литификации, с определенными параметрами физических и физико-механических свойств.

К настоящему времени выявлены основные закономерности формирования инженерно-геологических свойств осадочных горных пород под воздействием гравитационных напряжений в зависимости от литологического типа породы, возраста, региональных особенностей истории развития и современной тектонической структуры той или иной территории. Наиболее значительно под действием гравитационных нагрузок уплотняются глинистые породы. Как известно, пористость глинистых осадков составляет 65—80 %, но уже на ранних этапах катагенеза она уменьшается почти вдвое, примерно до 40—45 %, а на поздних стадиях катагенеза в глинистых аргиллитах не превышает первых процентов. Одновременно глины характеризуются достаточно устойчивым минеральным составом, который формируется на стадии диагенеза и мало изменяется при катагенетических преобразованиях. Однако, судя по достаточно большому количеству работ, это утверждение справедливо лишь до определенного интервала глубин и не для всех минералов. Так, известно, что примерно с глубин 1500 м монтмориллонит становится неустойчивым и постепенно преобразуется в гидрослюды. В частности, подобное преобразование отмечается Г. В. Лебедевой и К. А. Черниковым для глинистых пород неокома центрального Приобья. Оно сказалось на пористости пород, при-

ведя к увеличению последней: в интервале глубин 1800—2200 м пористость глин равна примерно 12 %, сами глины пластичны и размокают в воде, тогда как выше по разрезу залегают уплотненные глины и аргиллиты с пористостью менее 10 %.

Изменение минерального состава глин по зонам катагенеза отмечается и в Донбассе М. М. Поповичем, Л. Г. Рекшинской и др. В глинистых породах зоны развития длиннопламенных углей содержание монтмориллонита достигает в ряде случаев 100 % глинистой фракции. В следующей зоне содержание монтмориллонита резко сокращается и возрастает роль смешаннослойных образований, содержание разбухающей фазы в которых закономерно снижается от 30—70 % в зоне развития газовых углей, до 20—50 % в зоне развития жирных углей и до 10—40 % в зоне развития коксовых углей. Значительно меньше гравитационное давление сказывается на уплотнении песчаных пород. В природных условиях пористость рыхлых, хорошо отсортированных песков обычно составляет около 45 %; при уплотнении она уменьшается до 25 %, главным образом за счет более плотной упаковки зерен и их частичного раздробления и растворения на контактах.

Дальнейшее снижение пористости и упрочнение песчаных пород происходит благодаря процессам цементации. Последние, однако, в зависимости от состава поровых растворов могут интенсивно протекать и на ранних стадиях катагенеза, поэтому прямая зависимость между пористостью песчаных пород и глубиной их залегания часто отсутствует. Еще более сложно протекают процессы литификации карбонатных осадков, которые уже на стадии диагенеза превращаются в породы с жесткими структурными связями. Общие закономерности изменения свойств горных пород с глубиной (увеличение плотности, уменьшение пористости) могут быть осложнены и другими наложенными процессами. Так, на нефтегазовых месторождениях с аномально высокими пластовыми давлениями отмечаются разуплотнение глин, увеличение их пористости, изменение структурно-текстурных особенностей и минерального состава. Явления подобного локального разуплотнения описаны И. Д. Зхусом и В. В. Бахтиным для глин различного возраста, от неогеновых до нижнекаменноугольных. Ими же установлено, что степень разуплотнения зависит от степени литификации породы: глинистые породы, находящиеся на ранних стадиях катагенеза, разуплотняются значительно сильнее, чем пережившие поздний катагенез. По данным этих авторов, фоновые значения пористости нижнекаменноугольных аргиллитов на глубине около 4000 м в Днепровско-Донецкой впадине составляют 4—2 %, а в зоне аномально высоких пластовых давлений возрастают до 8 %.

Существенное значение имеет и длительность процесса гравитационного уплотнения. Как отмечалось выше, разновозрастные породы на одной и той же глубине могут характеризоваться различными свойствами; в сходных тектонических обстановках более древние породы имеют меньшую пористость и большую плотность, чем молодые. В этой связи интересны данные Э. А. Прозоровича

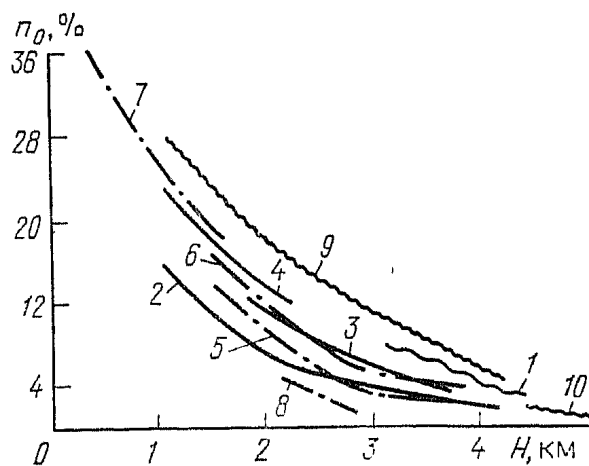


РИС. 10. Зависимость открытой пористости  $n_0$  глинистых пород от глубины  $H$  погружения. По С. Г. Неручеву и др.

1 — Восточная Сибирь, венд; 2—4 — Тимано-Печорская область (2 — девон, 3 — карбон, 4 — верхняя пермь); 5—8 — Западная Сибирь (5 — нижняя — средняя юра, 6 — нижний мел, 7 — верхний мел, 8 — верхняя юра, баженовская свита); 9—10 — Западно-Кубанская впадина (9 — неоген, 10 — палеоген)

об изменении плотности глинистых пород широкого стратиграфического диапазона от палеозоя до плейстоцена по Северному Дагестану. Здесь по данным глубоких нефтяных скважин отмечается закономерное увеличение плотности на одной и той же глубине, равной 3000 м, от четвертичных отложений ( $\rho = 1,85$  г/см<sup>3</sup>) к юрским ( $\rho \approx 2,40$  г/см<sup>3</sup>), к каменноугольным ( $\rho \approx 2,70$  г/см<sup>3</sup>). Подобная же, но более общая зависимость приводится С. Г. Неручевым (рис. 10).

Процессы литогенеза протекают по-разному в платформенных и геосинклинальных областях. Наиболее обстоятельно специфика этих процессов рассмотрена А. Г. Коссовской. Ею проведено параллельное изучение разновозрастных терригенных пород близкого вещественного состава Вилюйской впадины и Западного Верхоянья. Первые из них испытали действие только вертикальной нагрузки, вторые, кроме того, подверглись интенсивному складкообразованию. Как в платформенной, так и в геосинклинальных областях устанавливается зональность в постседиментационных преобразованиях по глубине: для каждой зоны характерны комплекс минеральных новообразований, структурно-текстурные различия, определенные плотность и пористость.

По данным А. Г. Коссовской, все терригенные мезозойские платформенные отложения на глубину до 2000 м принадлежат единой «зоне неизмененного глинистого цемента» (начального эпигенеза), в пределах которой породы сохраняют первичные текстурно-структурные и минералогические особенности, приобретенные в течение осадконакопления и диагенеза; объемная масса пород с глубиной увеличивается от 1,4 до 2,1 г/см<sup>3</sup>, пористость уменьшается от 35 до 12 %.

В наиболее погруженных участках платформы, на глубинах свыше 2000—2500 м, а также в краевом прогибе и периферийных областях складчатых структур выделяется «зона измененного глинистого цемента» (глубинного эпигенеза), мощность которой достигает 3500—4000 м. Породы этой зоны подверглись значительной эпигенетической переработке, что проявилось в перекристаллизации глинистого вещества, хлоритизации, появлении мозаично-регенерационных структур в песчаниках. Влияние гравитационного уплотнения на формирование свойств пород снижается; объемные массы

остаются по существу постоянными по всей зоне — 2,50—2,55 г/см<sup>3</sup>, пористость в верхах зоны достигает 12—13 %, к подошве снижаясь до 4—5 %.

Следующая зона — «кварцитовидных структур и хлоритово-серпичитового цемента» — присуща только геосинклинальной области и сложена интенсивно дислоцированными породами, образующими сводовую часть Верхоянского мегантиклинория. В формировании отложений этой зоны решающая роль принадлежит не гравитационному уплотнению, а одностороннему тектоническому давлению. Для песчаников зоны характерна почти полная замена первичных обломочных структур кварцитовидными, глинистые породы превращены в сланцы преимущественно хлоритового и мусковитового состава. Пористость пород не меняется по разрезу (4—2,7 %) и очень слабо отличается от предыдущей зоны.

Породы, слагающие наиболее дислоцированные участки Верхоянского прогиба, относятся к зоне «шиповидных» структур и мусковитово-хлоритового цемента, представлены аспидными или филитоподобными сланцами и кварцитовидными песчаниками.

Выделенные зоны картируются на площади и в основном совпадают с крупными структурными элементами Верхоянского мегантиклинория и Вилюйской впадины. Они секут стратиграфические границы и отражают особенности истории развития региона и его современной геологической структуры.

Указания о влиянии тектонического давления на постгенетические преобразования пород содержатся во многих литологических работах. В. И. Муравьев пишет об изменении структур песчаников и известняков в районах развития солянокупольных структур Прикаспийской низменности под действием стресса. А. Е. Абрамова, изучая аутигенные минералы в девонских песчаниках и алевролитах Минусинского прогиба, установила связь между интенсивностью аутигенного минералообразования и дислоцированностью пород.

В инженерно-геологической литературе также имеются указания о том, что плотность горных пород тектонически активных областей значительно выше платформенных. В. А. Приклонский отмечает высокую плотность глинистых пород олигоценового возраста Сухумского района и апшеронских глин района Мингечаура ( $\rho = 2,2—2,3$  г/см<sup>3</sup> при типичных значениях для кайнозойских глинистых пород Русской платформы — 1,8—1,9 г/см<sup>3</sup>). В. Д. Ломтадзе приводит примеры, свидетельствующие о том, что плотность разновозрастных пород платформы и складчатых областей резко различны [24]. Так, объемная масса скелета меловых глинистых пород Поволжья равна 1,36—1,78 г/см<sup>3</sup>, а меловых глинистых пород (плотность аргиллитов) Крымской зоны альпийской складчатости — 2,31—2,54 г/см<sup>3</sup>. Объемная масса скелета юрских глин района Москвы и Поволжья составляет 1,32—1,40 г/см<sup>3</sup>, а разновозрастных пород Прикаспийской впадины — 1,70—1,72 г/см<sup>3</sup>. Средняя объемная масса нижнекаменноугольных глин Подмосковского бассейна 1,48—1,85 г/см<sup>3</sup>, а аргиллитов угленосной каменно-

Таблица 4

Средние значения основных физико-механических параметров пород карбона.  
По В. Г. Белоколю, Н. В. Соницу, В. М. Антонову и др.

Марка угля	Число проб	Объемная масса, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Прочность, МПа		Твердость	Коэффициент пластичности
				при сжатии	на разрыв		
Песчаники							
Д	180	2,28	12,4	27	5,2	58	2,13
Г	1689	2,44	7,8	44,5	5,2	83	1,91
Ж	892	2,57	4,7	63,8	9,8	142	1,74
К	631	2,59	4,1	67,5	7,2	130	1,76
ОС	195	2,60	3,8	74,6	6,9	127	1,75
Т	237	2,62	3,6	81	12,3	140	1,71
ПА	430	2,62	3,6	81,8	10,5	123	1,67
А	1107	2,67	3,2	105	15,9	194	1,57
Песчаные сланцы							
Г	183	2,42	8,9	22,6	4,8	35	1,66
Д	1483	2,61	5,8	34,2	5,5	52	1,61
Ж	1262	2,61	4,3	37,5	7,3	60	1,56
К	446	2,62	4,2	40,7	5,9	57	1,56
ОС	209	2,62	4,2	45	5	57	1,57
Т	252	2,63	4,3	43,2	8	61	1,53
ПА	526	2,64	4,1	44	5,9	55	1,55
А	1889	2,68	3,3	58,5	10	79	1,52
Глинистые сланцы							
Р	215	2,43	8,8	16,5	4,3	29	1,65
Г	1153	2,52	6,5	21,3	4,2	38	1,60
Ж	672	2,58	5,2	23,5	6,1	44	1,55
К	164	2,58	5,0	23	6,1	38	1,55
ОС	49	2,60	4,8	26,8	3,5	37	1,62
Т	128	2,62	4,8	30,2	5,3	41	1,56
ПА	102	2,64	4,9	27	3,3	40	1,50
А	442	2,68	3,9	38,4	8,2	55	1,54

угольной формации Среднего Урала 1,8—2,0 г/см<sup>3</sup>. О. А. Шванк отмечает резкое увеличение плотности глинистых пород на границе мэотиса и сармата и на границе чокрака и майкопа, что совпадает с двумя фазами неогеновой складчатости на Кавказе.

Наиболее полные материалы об изменении состава, строения и свойств осадочных горных пород по глубине имеются в настоящее время по Донбассу, чему в немалой степени способствовало совместное изучение процессов катагенеза литологами и специалистами в области инженерной геологии. Угленосные толщи карбона Донбасса являются весьма удачным объектом для выяснения указанных закономерностей не только потому, что мощность осадоч-

ной толщи составляет здесь многие тысячи метров, но и потому, что присутствие в них углей разной степени метаморфизма позволяет наиболее детально расчленить разрез на отдельные зоны и подзоны катагенеза и метагенеза. По мере возрастания степени катагенеза изменяется структура песчано-глинистых пород, в частности, увеличивается зернистость вследствие обрастания обломков вторичным кварцем, упорядочивается текстура, меняется состав цемента от глинистого к гидрослюдистому и хлорит-серицитовому, тип цемента от базального и базально-порового до регенерационного, снижается пористость и возрастает прочность (табл. 4). По мнению ряда исследователей (В. Г. Белоконь, И. В. Сонин и др.), эти изменения пород карбона произошли в связи с общим погружением толщи, под действием веса вышележащих пород, т. е. в доинверсионный период развития бассейна. Большое значение в указанных преобразованиях авторы придают поступлению из глубин в осадочную толщу термальных растворов, содержащих калийные, кремнистые и железистые соединения, способствующих, в частности, образованию кварц-хлорит-серицитового цемента.

#### **ВЛИЯНИЕ СКЛАДЧАТОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Если в платформенных условиях осадконакопления процессам гравитационного уплотнения (и сопровождающим его процессам дегидратации, изменения химического состава поровых растворов при относительно невысоких температурах) принадлежит руководящая роль в формировании прочностных и деформационных свойств горных пород, то в складчатых областях дело обстоит гораздо сложнее. Толщи осадочных пород мощностью до 10 000 и даже 20 000 м, накапливающиеся при интенсивных погружениях, испытывают давление в сотни мегапаскалей уже в доинверсионный период. Огромные напряжения в сочетании с высокими температурами в этих условиях могут привести и приводят к глубоким региональным катагенетическим и даже метаморфическим преобразованиям породы. При определенных условиях эти доинверсионные преобразования оказываются настолько глубокими, что последующие тектонические давления не изменяют сколько-нибудь существенно состав, строение и физико-механические свойства горных пород как минеральных ассоциаций. Определяющая роль тектонических движений как складчатых, так и разрывных проявляется в этих случаях в изменении строения и свойств массива пород, в частности, в формировании вторичной трещиноватости в скальных грунтах. Логично предполагать также, что наиболее сильное влияние тектонических напряжений, например при складчатости, сказывается на породах, находящихся на ранних этапах катагенеза, тогда как породы, пережившие глубинный катагенез (скальные грунты), менее изменяются под действием стресса.

В геологической и инженерно-геологической литературе приводятся данные, свидетельствующие о значительном влиянии текто-



нических давлений на плотность и прочность горных пород как в локальных структурах, так и в различных тектонических регионах.

Многие исследователи отмечают, что в складчатых структурах, сложенных терригенными, обычно глинистыми породами, показатели плотности и пористости различны в сводовой части и на крыльях складок. Так, по данным А. О. Мартиросовой, изучившей третичные отложения Бакинского архипелага, глинистые породы в сводовой части складки имеют объемную массу  $2,04 \text{ г/см}^3$ , пористость  $\approx 27\%$ , а на крыльях соответственно  $2,15 \text{ г/см}^3$  и  $22\%$ . Увеличение пористости от  $18\%$  на крыльях до  $27\%$  в присводовой части антиклинали отмечается Э. А. Прозоровичем в глинах продуктивной толщи Северного Кавказа. В обоих случаях отмечается, что речь идет о конседиментационных структурах, т. е. об одновременности формирования антиклинали и седиментации осадков. Причины подобных различий следует искать в особенностях напряженно-деформированного состояния толщи глинистых образований при тектонических деформациях. Анализ распределения напряжений при различных механизмах образования складок рассмотрен в ряде работ М. В. Гзовского, В. В. Белоусова, Ю. А. Косыгина и других исследователей. Применительно к инженерно-геологическим аспектам этой проблемы на основе теоретических положений М. В. Гзовского и В. В. Белоусова А. М. Монюшко провел серию экспериментов по моделированию и расчету тектонических напряжений в процессе складкообразования в условиях, подобных складчатости Терско-Сунженской области на Северном Кавказе [29]. Эксперименты показали, что как при образовании складок нагнетания, так и при блоковой складчатости на крыльях складок создаются условия дополнительного сжатия, а в сводовой части проявляются растягивающие напряжения. Важной особенностью складчатых областей является «инверсия» физических и физико-механических свойств горных пород, т. е. увеличение их плотности и прочности в стратиграфически более молодых горизонтах по сравнению с более древними. Впервые подобная инверсия была установлена Г. А. Голодковской для осадочных пород Тувинского прогиба. Были изучены песчаники юрского и девонского возраста из различных структурных зон прогиба. При сравнении инженерно-геологических характеристик изученных пород обращают на себя внимание следующие их особенности: а) при достаточно одинаковом минеральном составе, структуре и текстуре песчаников во всех разрезах, близких значениях их плотности и пористости прочность изменяется в весьма широких пределах (от  $40\text{—}50 \text{ МПа}$  до  $150\text{—}200 \text{ МПа}$ ); б) прочность пород одного возраста (в данном случае юрского), залегающих в разных структурных зонах, резко различна; в) песчаники юрского возраста Западно-Таннудольского антиклинория имеют более высокую прочность, чем девонские, для них характерен серицитовый регенерационный цемент, отсутствующий в девонских породах.

Различия в свойствах изученных пород могут быть объяснены особенностями мезозойской тектоники Тувинского прогиба. Песча-

ники Кызыльской мульды дислоцированы слабо, мезозойская складчатость не оказала существенного влияния на их текстуру и характер цемента. Прочность их несколько ниже, чем прочность девонских слабодислоцированных песчаников. Юрские песчаники западного окончания Восточно-Таннудольского антиклинория принадлежат зоне, где палеозойская складчатость выражена очень слабо, а послеюрская была весьма интенсивной. Высокими тектоническими напряжениями (дислокационным метаморфизмом) и можно объяснить появление в юрских песчаниках цемента регенерационного типа, обусловившего их высокую прочность.

Инверсию физических свойств отметил и А. М. Монюшко для миоценовых глин Северного Кавказа (рис. 11). В пределах Ставропольского поднятия прослеживается нормальная последовательность изменения свойств пород в зависимости от их возраста; от более древних к более молодым горизонтам пористость увеличивается. В геосинклинальном регионе отмечается обратная зависимость: пористость возрастает от молодых отложений к более древним. При сходном минеральном и гранулометрическом составе изученных отложений, единых геолого-структурных условиях осадконакопления автор совершенно справедливо связывает выявленную инверсию со сложным характером распределения напряжений в складчатых структурах при тектонических дислокациях, что и подтверждено им в опытах на эквивалентных материалах и расчетами напряжений при различных механизмах образования складок. В частности, по его данным, на крыльях формирующихся антиклиналей внешние (стратиграфически более молодые) слои испытывают большие сжимающие напряжения, чем внутренние (стратиграфически более древние). Инверсия напряжений и влечет за собой инверсию физических и, по-видимому, физико-механических свойств пород.

Весьма интересные данные о влиянии тектонической обстановки на катагенез терригенных отложений приводит О. В. Япаскурт. Им изучены обломочные породы (главным образом мелко- и среднезернистые песчаники) палеозойского и мезозойского возраста на границах Сибирской платформы с Верхоянской складчатой системой. Установлено, что на фоне общей «классической» катагенетической зональности, т. е. увеличения степени вторичных преобразований на глубине, выделяются некоторые геологические структуры, породы которых претерпели аномально высокий катагенез. Такими структурами являются тектонически активные участки, расположенные непосредственно вблизи границы со складчатой системой,

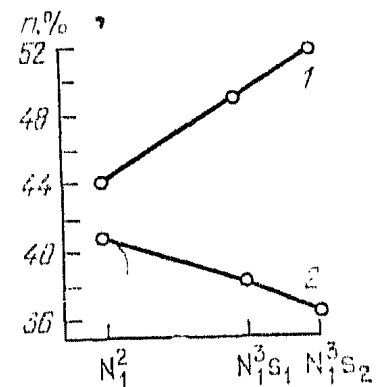


РИС. 11. Изменение пористости  $n$  миоценовых глин по стратиграфическому разрезу для регионов с платформенным (1) и геосинклинальным (2) режимом. По А. М. Монюшко.

$N_1^2$  — среднемiocеновые глины,  $N_1^3 S_1$  — верхнемiocеновые глины нижнесарматского яруса,  $N_1^3 S_2$  — верхнемiocеновые глины верхнесарматского яруса

и некоторые линейные платформенные структуры. Высокую степень катагенетической переработки пород на этих участках О. В. Япаскорт объясняет (с нашей точки зрения совершенно справедливо) высокой напряженностью динамических нагрузок, в частности напряженного сжатия со стороны складчатых областей в эпохи складкообразования в Верхоянье.

Исследование влияния тектонических процессов на формирование инженерно-геологических свойств грунтов имеет первостепенное значение при разработке многих теоретических вопросов инженерной геологии. Как показано выше, разновозрастные, однотипные в литологическом отношении горные породы могут иметь существенно различные свойства в зависимости от особенностей тектонической жизни того или иного региона. Одна из основных теоретических задач инженерной геологии — выявление природы свойств грунтов и закономерностей их распределения в земной коре — может быть успешно решена лишь в том случае, если при этом будет учитываться тектоническая обстановка на всех этапах геологической истории того или иного региона.

## ГЛАВА 3.

### **ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ — МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД.**

#### **ИЗМЕНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ПЕТРОГЕНЕЗА**

Формирование инженерно-геологических особенностей горных пород — это сложный геологический процесс, который длится в течение всей их геологической жизни, с момента возникновения до настоящего времени. Этот процесс определяется целым рядом факторов, среди которых главную роль играют тектонический режим и климатическая обстановка как времени возникновения горных пород, так и последующих этапов их существования. Чем более изменчивы во времени эти факторы, тем более сложен процесс формирования современного инженерно-геологического облика горных пород.

Наиболее прост для изучения закономерностей формирования инженерно-геологических особенностей горных пород процесс литогенеза осадочных (аквальных) пород, развитых в пределах территорий, геологическое развитие которых характеризуется спокойной тектонической обстановкой с тенденцией к опусканию (как, например, Московская синеклиза Русской платформы). В этом случае образовавшиеся в морском бассейне осадки, постепенно по-

гружаясь под более молодые и испытывая при этом влияние все более возрастающих нагрузок, а затем и температуры, постепенно уплотняясь и дегидратируясь, проходят все стадии литогенеза, которые были выделены и описаны Н. М. Страховым: седиментация — диагенез — катагенез. При этом зоны литогенеза, соответствующие конкретным стадиям, характеризуются определенными степенью литификации пород и параметрами их свойств. Для этого случая закономерности в изменении инженерно-геологических особенностей горных пород в общем виде могут быть сформулированы следующим образом: чем древнее порода, тем более позднюю стадию литогенеза она проходит, тем стабильнее показатели ее свойств и выше прочностные характеристики. Примером такого типа формирования современного инженерно-геологического облика горных пород являются кембрийские синие глины района г. Вологды. После своего образования в морском бассейне, как отмечалось выше (см. гл. 1), они были перекрыты в последующие эпохи более молодыми образованиями и в настоящее время находятся на глубине более 1600 м. В своем развитии эти глины прошли стадию диагенеза и начальные стадии катагенеза и сейчас, очевидно, находятся на стадии позднего катагенеза, о чем свидетельствует их современный инженерно-геологический облик [24].

Более сложным и разнообразным является процесс формирования инженерно-геологических особенностей осадочных пород, которые имеют развитие в пределах территорий с меняющейся тектонической обстановкой. В этом случае в зависимости от истории геологического развития территории горные породы при своем формировании проходят различный путь. Образовавшиеся в морском бассейне осадки, пройдя в своем развитии отдельные стадии литогенеза, могут быть в результате тектонических движений выведены на поверхность, где происходят их разуплотнение и гидратация под воздействием процессов выветривания и почвообразования. Примером такого типа формирования современного инженерно-геологического облика являются те же синие кембрийские глины, развитые в районе Ленинграда. История их геологического развития привела к тому, что по своим свойствам эти кембрийские глины близки к современным глинистым отложениям.

Еще более сложные изменения претерпевают осадочные породы геосинклинальных и орогенных областей в результате интенсивных тектонических движений.

Так, нижнекембрийские отложения района г. Красноярска, по данным Н. С. Красиловой, после своего накопления в геосинклинальных условиях были подвергнуты воздействию тектонических движений двух фаз складчатости: позднебайкальской (в конце нижнего кембрия) и каледонской (на границе верхнего кембрия — силура). В результате действия тектонических движений первой фазы породы были уплотнены и сильно дислоцированы, в результате действия второй — частично метаморфизованы (по контакту с сиенитами), уплотнены и еще более дислоцированы. Комплекс изменений, которые произошли в этих породах, привел к значи-

тельному упрочнению пород (по своим свойствам это типичные скальные породы) и к значительной трещиноватости слагаемых ими массивов.

В орогенных областях осадочные породы под влиянием тектонических движений могут быть полностью метаморфизованы, так что о первичном осадконакоплении можно судить только по косвенным признакам (первичные структуры, наличие прослоев мраморов и т. д.).

Весь вышеприведенный материал показывает, что восстановить процесс формирования горных пород возможно путем анализа истории геологического развития территории, в пределах которой они развиты. Только такой анализ дает возможность восстановить этапы формирования горных пород, выявить ведущие факторы этого процесса, определить закономерности распространения пород с различными структурными связями в том или ином районе и предсказать их основные инженерно-геологические особенности.

### **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ ЭТАЖЕЙ**

В истории развития различных территорий выделяется несколько фаз тектогенеза (байкальская, каледонская, герцинская и др.), определяющих выделение структурных этажей, сложенных породами различного возраста и генезиса. Многочисленными инженерно-геологическими исследованиями (Г. А. Голодковская, Н. С. Красилова, Ю. А. Серегина, А. М. Моношко и др.) установлено, что свойства пород определенного петрографического типа в пределах одного структурного этажа остаются достаточно постоянными, а при перестройке структурного плана — качественно изменяются.

Проявление отдельных фаз тектогенеза и их влияние на горные породы в различных геоструктурных областях сказывается по-разному: наиболее интенсивно оно в складчатых областях, менее интенсивно — в платформенных. Это определяет и качественно различные изменения в инженерно-геологическом облике горных пород, принадлежащих одному структурному этажу, но распространенных в пределах разных геоструктурных областей. Это положение достаточно ярко подтверждается примерами, приведенными в настоящей главе, где показано, что осадочные породы одного структурного этажа (байкальского), развитые в пределах различных геоструктурных областей, резко отличаются по своим инженерно-геологическим особенностям: одни сильно литифицированы, уплотнены и дегидратированы; другие — разуплотнены и гидратированы; третьи — метаморфизованы и превращены в типичные скальные породы.

В пределах одной или однотипных геоструктурных областей установлена четкая зависимость между принадлежностью горных пород к определенному структурному этажу и степенью их литификации или метаморфизма. Ярким примером тому могут служить

глинистые породы различных структурных этажей Московской синеклизы [17]. Наиболее древними из них являются кембрийские глинистые отложения байкальского структурного этажа. Это аргиллиты, характеризующиеся кристаллизационными связями, со следующими показателями свойств: естественная влажность — 5 %, объемная масса скелета — 2,35 г/см<sup>3</sup>; пористость — 14 %.

Глинистые отложения герцинского структурного этажа (нижний карбон) обладают прочными коллоидно-кристаллизационными связями, они умеренно пластичны и гидрофильны, слабо набухают, однако характеризуются более высокой естественной влажностью (20—30 %), более низкими показателями объемной массы скелета (1,60—1,69 г/см<sup>3</sup>) и более высокими показателями коэффициента пористости (0,65—0,80). Для глинистых отложений киммерийско-альпийского структурного этажа (средняя юра — ранний мел) характерны довольно высокая пористость (коэффициент пористости 0,76—1,47) и естественная влажность (21—45 %), в то же время они обладают значительной уплотненностью (объемная масса скелета 1,32—1,60 г/см<sup>3</sup>). Эти глины чувствительны к внешним воздействиям и нестойки к выветриванию.

Глинистые отложения верхнеальпийского структурного этажа (верхнечетвертичные) находятся на ранней стадии литогенеза — переходной от илов к мягким связным глинистым породам и характеризуются высокой пористостью (коэффициент пористости до 1,76), естественной влажностью, часто превышающей предел текучести (до 68 %), значительной сжимаемостью и низкой прочностью. Те же закономерности прослеживаются и для метаморфических пород. Так, Г. А. Голодковская на примере Алтае-Саянской складчатой области и Сибирской платформы показала, что степень метаморфизма постепенно убывает от древних образований к более молодым.

Инженерно-геологические особенности осадочных горных пород альпийского структурного этапа в силу их молодости и слабой литифицированности характеризуются значительным непостоянством в свойствах, которое постепенно уменьшается от более молодых к более древним отложениям. Это определяет необходимость более детального расчленения горных пород этого структурного этапа и выделение в его составе структурных подэтажей, горные породы которых характеризуются определенными инженерно-геологическими особенностями. Так, для альпийского структурного этапа молодой Западно-Сибирской плиты С. Б. Ершова показала необходимость выделения трех подэтажей: 1) палеогенового, глинистые породы которого подверглись наибольшей литификации и поэтому их прочностные характеристики достаточно высоки, несмотря на значительную пористость и пластичную консистенцию; 2) неогенового, глинистые породы которого могут быть отнесены к слабо- и среднесжимаемым, причем их прочностные характеристики определяются консистенцией; 3) верхнеплиоцен-четвертичного, глинистые породы которого относятся к породам слаболитифицированным. Прочностные характеристики этих пород определяются их

состоянием и поэтому сильно меняются как во времени, так и в пространстве.

Все вышесказанное убедительно показывает, что основные этапы геологического развития территории определяют формирование особенностей горных пород. Поэтому изучение геологического развития территорий должно являться методологической основой изучения горных пород.

## **ИЗМЕНЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОЦЕССОВ ГИПЕРГЕНЕЗА**

Тектонические процессы являются ведущим фактором в формировании инженерно-геологических особенностей горных пород. Именно тектонические процессы определяют возникновение горных пород определенного петрографического типа (осадочных, метаморфических, магматических), контролируют условия осадконакопления пород (платформенные, геосинклинальные) и определяют направленность и интенсивность постгенетических изменений горных пород.

В платформенных условиях тектонические процессы прежде всего контролируют накопление осадков определенного петрографического состава (глинистых, песчаных, карбонатных и др.), их пространственное положение и строение, так как именно они определяют размеры бассейна осадконакопления, его глубину, длительность путей транзита материала в этот бассейн. Постгенетические изменения также находятся под контролем тектонических движений. Это сказывается прежде всего на ходе литогенеза осадочных пород.

Достаточно четко проявляется роль медленных незначительной амплитуды тектонических движений в стадийности процесса литогенеза и зональности в изменении свойств горных пород в результате гравитационного уплотнения и, прежде всего, влажности, плотности и пористости. Ход этого процесса может быть нарушен положительными тектоническими движениями значительной амплитуды, в результате чего горные породы могут быть выведены на поверхность и подвергаться воздействию агентов выветривания. Это приводит к выщелачиванию карбонатных пород, формированию пор выветривания и другим процессам, способствующим уплотнению и гидратации пород.

Стадийность процесса литогенеза может быть нарушена также в результате дифференцированных тектонических движений, в том числе солянокупольной тектоники, создающих стрессовые напряжения в горных породах. В этом случае происходят незакономерные изменения состава и структур горных пород, которые несвойственны той стадии литогенеза, на которой они находятся. Чаще всего это приводит к уплотнению и упрочнению горных пород.

В настоящее время является также доказанной зависимость свойств горных пород от их приуроченности к определенным элементам тектонической структуры. А. М. Монюшко на примере сар-

матских глин Ставропольского поднятия показал, что плотность их значительно ниже, а сжимаемость выше в центральной части поднятия по сравнению с глинами, приуроченными к склонам (см. рис. 11).

В складчатых областях тектонические движения определяют накопление горных пород в основном с прочными кристаллизационными первичными связями — магматических и метаморфических. Последующие тектонические движения проявляются главным образом в появлении вторичной трещиноватости массивов, сложенных этими породами.

Осадочные горные породы этих областей, формирующиеся в условиях интенсивного погружения территории, характеризуются значительной плотностью. Последующие тектонические движения способствуют дальнейшему изменению этих пород, проявляющейся в частичной (по контактам с излившейся магмой) или общей метаморфизации пород, в результате чего происходят перекристаллизация цемента, ороговикование, окварцевание, переориентировка зерен и другие изменения, которые способствуют уплотнению пород, а также в возникновении вторичной трещиноватости массивов этих пород.

Магматические и метаморфические породы под влиянием тектонических движений могут быть выведены на поверхность и находиться в зоне гипергенеза. Под воздействием процессов выветривания и почвообразования эти породы подвергаются разрушению. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в сильно трещиноватых метаморфических породах. На первой стадии выветривания, когда физическое выветривание преобладает и разрушение прочных кристаллических горных пород заключается в основном в их дроблении, формируются крупнообломочные и песчаные породы. В дальнейшем развитие процесса выветривания приводит к преобладанию химического выветривания, в результате чего образуются глинистые и лёссовые породы. Начальные стадии формирования инженерно-геологических особенностей субаэральных отложений протекают в зоне гипергенеза под влиянием процессов выветривания и почвообразования. Это определяет своеобразие формирования их свойств и отличие этой стадии от стадии диагенеза осадочных пород. Они заключаются в сезонном изменении состояния и свойств осадков, связанном с сезонными изменениями тепло- и влагообеспеченности территории их распространения. Это определяет широкий диапазон изменения свойств субаэральных отложений, распространенных в различных климатических зонах, как во времени, так и в пространстве.



## ГЛАВА 4.

# ОБЩАЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

Построение классификации горных пород стало возможным, когда оформились представления о зависимости инженерно-геологических свойств горных пород от особенностей их состава и строения и накопились фактические данные, подтверждающие эти положения. Такие представления возникли у русских строителей еще в середине XIX в., и тогда уже появилась первая классификация грунтов. В первой работе по этому вопросу «Об основаниях каменных зданий», опубликованной в 1840 г., М. С. Волков выделяет два важнейших свойства грунтов: сопротивление давлению и прочность. В конце XIX и начале XX вв. русские строители уделяли главное внимание вопросам сжимаемости и размываемости грунтов, что нашло отражение в классификации горных пород А. П. Павлова, разработанной им для строительных целей. Эта классификация построена на основе рассмотрения сил сцепления у различных грунтов. Предложенный А. П. Павловым принцип нашел дальнейшее развитие в классификации горных пород, предложенной Ф. С. Саваренским в 1939 г., несколько переработанной В. А. Приклонским в 1943 г. и П. Н. Панюковым в 1956 г. Названные классификации имеют общий характер, их авторы ставили перед собой цель отразить все многообразие горных пород, встречающихся в природе, сгруппировать вместе породы, близкие по инженерно-геологическим особенностям. Такие классификации получили название «общих классификаций грунтов».

Общие классификации имеют задачу по возможности охватить наиболее распространенные типы горных пород и охарактеризовать их как грунты. Выявленные закономерности зависимости состава, строения и свойств пород от их генезиса и последующих постгенетических преобразований, обусловленных историей их развития, приводят к выводу о целесообразности построения классификации грунтов на генетической основе. Под генетической основой следует понимать не только само возникновение породы, но и последующие изменения, которые она претерпела за всю свою «геологическую жизнь». При таком построении общей классификации грунтов оказывается возможным связать инженерно-геологические свойства горных пород с их генетическими особенностями и проследить изменение этих свойств от одной группы грунтов к другой. Общие классификации грунтов являются той основой, на которой должны строиться все остальные классификации (частные, региональные, отраслевые). Исходя из основного тезиса грунтоведения: свойства грунтов определяются их генезисом и постгенетическими процессами — породы должны быть расположены в

общей классификации грунтов в соответствии с этим положением. Такое расположение должно сгруппировать породы, близкие по своим инженерно-геологическим особенностям. При этом надо учитывать взаимосвязь между отдельными группами грунтов. Первичными породами являются магматические. Под воздействием процессов гипергенеза, денудации и седиментации формируются осадочные породы. При этом магматические породы разрушаются неодинаково. В начальной стадии процесса выветривания, когда преобладает процесс физического выветривания, формируются обломочные осадочные породы (крупнообломочные и песчаные). При интенсивном развитии процессов выветривания, когда преобладают факторы химического выветривания, происходит изменение минерального состава пород: образуются глинистые минералы, присутствие которых в глинистых и лёссовых породах обуславливает особые свойства, присущие типичным осадочным несцементированным породам (пластичность и др.).

На осадочных породах формируются почвы. Из почв и осадочных пород водой выносятся отдельные элементы, концентрация которых в водных бассейнах приводит к образованию химически осажденных и биохимических (органогенных) пород. Соли и окислы могут играть роль цемента между обломками горных пород и отдельными зернами минералов; возникают осадочные сцементированные породы. Любые породы под влиянием процесса метаморфизма превращаются в метаморфические породы. Под влиянием процесса гипергенеза метаморфические, химически осажденные и осадочные сцементированные породы вновь превращаются в осадочные несцементированные породы. Этот естественный цикл превращений горных пород все больше и больше нарушается человеком, создающим искусственные грунты.

Рассмотрение взаимосвязи между горными породами даже в самом общем виде дает возможность выделить группы пород различного генезиса, на базе которых должна строиться общая классификация грунтов. Дальнейшая детализация их генетических и петрографических особенностей позволит при составлении общей классификации грунтов провести подразделение групп на подгруппы и типы пород, а затем на виды и разновидности по особенностям структуры, пределу прочности и другим свойствам пород, определяющим их поведение при строительстве на них различных сооружений.

## **ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Общая классификация грунтов, построенная на изучении взаимосвязи между отдельными группами горных пород, была впервые предложена Е. М. Сергеевым в 1948 г. В 1957 г. Е. М. Сергеев, В. А. Приклонский, П. Н. Панюков и Л. Д. Белый сформулировали принципиальные положения, на основании которых эта классификация была значительно усовершенствована. В 1978 г. Е. М. Сер-

геевым общая классификация грунтов была несколько изменена, исходя из характера структурных связей, присущих породам. При этом структурные связи рассматривались, с одной стороны, как своеобразный индикатор, отражающий особенности пород и воздействия на них природных процессов, а с другой — как фактор, оказывающий значительное влияние на свойства пород.

Дальнейшая работа над совершенствованием общей классификации грунтов Е. М. Сергеева дала возможность коллективу сотрудников ПНИИСа под научным руководством Р. С. Зиангирова предложить общую классификацию грунтов для целей строительства, доведенную до выделения видов и разновидностей (ГОСТ 25100—82). В настоящее время общая классификация грунтов может быть предложена в следующем виде (табл. 5). Все породы подразделяются в ней на два класса по характеру структурных связей: скальные грунты, обладающие, как правило, прочными кристаллизационными связями химической природы, и дисперсные (рыхлые) грунты, у которых такие связи отсутствуют или имеют подчиненное значение.

В класс скальных грунтов объединяются горные породы, у которых структурные связи между частицами такие же, как и внутри них, — связи химической природы. Среди этих связей в большинстве случаев преобладают ковалентные. Грунты, в которых преобладают ковалентные связи, имеют высокую прочность, которая мало изменяется при их водонасыщении. Лишь в том случае, когда в породах преобладающим типом становятся ионные связи, породы приобретают значительную растворимость.

В класс дисперсных грунтов объединяются породы, у которых преобладают структурные связи физической природы: молекулярные, ионно-электростатические, капиллярные, магнитные, электростатические. Эти связи значительно менее прочные, чем связи, существующие внутри минеральных частиц и в скальных грунтах. Для пород класса дисперсных грунтов характерна невысокая прочность, которая сильно изменяется при различном соотношении в них компонентов (твердой, жидкой, газообразной и биоконпоненты).

Классы грунтов подразделяются на группы и подгруппы по генезису и постгенетическим процессам, которые испытали породы, типы выделяются по петрографическому составу. К классу скальных грунтов относятся четыре группы пород: магматические, метаморфические, осадочные сцементированные и искусственные грунты. В группе магматических пород выделяются две подгруппы: интрузивные (глубинные) и эффузивные (излившиеся) породы. Метаморфические породы подразделяются на три подгруппы: регионально-метаморфизованные (динамотермальные), контактово-метаморфизованные (термальные) и динамометаморфизованные (катакластические). Среди осадочных сцементированных пород выделяются подгруппы крупнообломочных, мелкообломочных, пылеватых, глинистых, химических и органогенных пород. К группе «искусственных» относятся грунты, искусственно закрепленные в

Таблица 5

Общая классификация грунтов. Класс грунтов с жесткими структурными связями (скальные грунты)

Группа	Подгруппа	Тип
Магматические	Интрузивные (глубинные)	Граниты, диориты, сиениты, габбро, перидотиты и др.
	Эффузивные (излившиеся)	Липариты, трахиты, андезиты, порфиры, порфириты, туфы, базальты, туфобрекчии и др.
Мтаморфические	Регионально-метаморфизованные	Гнейсы, кварциты, кристаллические сланцы, «зеленые сланцы», глинистые сланцы и др.
	Контактово-метаморфизованные	Роговикч, скарны, мраморы, яшмы и др.
	Динамометаморфизованные	Милониты, катаклазиты, тектонические брекчии и др.
Осадочные сцементированные	Обломочные Крупнообломочные	Конгломераты, брекчии, гравелиты
	Мелкообломочные	Песчаники, туфиты
	Пылеватые и глинистые	Алевролиты, аргиллиты
	Биохимические Кремнистые	Спонголиты, радиоляриты, опоки, трапела, диатомиты
	Карбонатные	Доломиты, известняки, мергели, мел
	Химические Сульфатные Галюидные	Ангидрит, гипс Галит, сильвин, сильвинит, карналит
Искусственные	Преобразованные в природном залегании	Магматические, метаморфические и осадочные сцементированные (трещиноватые) Крупнообломочные несцементированные

Группа	Подгруппа	Тип
Искусственные	Преобразованные в природном залегании	Песчаные несцементированные Пылеватые и глинистые несцементированные

Класс грунтов без жестких структурных связей (нескальные грунты)

Осадочные несцементированные	Обломочные—крупнообломочные (элювиальные, пролювиальные, делювиальные, аллювиальные, водно—ледниковые, ледниковые, морские, пирокластические и смешанного происхождения)	Валунные (при преобладании неокатанных частиц—глыбовые)—частиц крупнее 200 мм более 50%. Галечниковые (при преобладании неокатанных частиц—щелбистые) масса частиц крупнее 10 мм более 50%. Гравийные (при преобладании неокатанных частиц—дресвяные) масса частиц крупнее 2 мм более 50%
	Обломочные—песчаные (элювиальные, пролювиальные, делювиальные, аллювиальные, водно-ледниковые, ледниковые озерные, морские, эоловые, пирокластические и смешанного происхождения)	Песок гравелистый—масса частиц крупнее 2 мм более 25%. Песок крупный—масса частиц крупнее 0,5 мм более 50%. Песок средней крупности—масса частиц крупнее 0,25 мм более 50%. Песок мелкий—масса частиц крупнее 0,1 мм 75% и более. Песок пылеватый—масса частиц крупнее 0,1 мм менее 75%. По степени неоднородности гранулометрического состава пески делятся на однородные $C_u < 3$ и неоднородные $C_u \geq 3$
	Обломочные—пылеватые и глинистые (элювиальные, пролювиальные, делювиальные, аллювиальные, водно-ледниковые, ледниковые, озерные, морские, эоловые, пирокластические и смешанного происхождения)	Супеси Суглинки Глины
	Обломочные—пылеватые и глинистые (элювиальные, пролювиальные, делювиальные, аллювиальные, водно-ледниковые, ледниковые, озерные, морские, эоловые, пирокластические и смешанного происхождения)	Лёссы Илы

Группа	Подгруппа	Тип
Осадочные нецементированные	Биогенные (озерные, болотные, озерно-болотные, аллювиально-болотные и др.)	Сапропели  Заторфованные песчаные грунты Заторфованные пылеватые и глинистые грунты
	Биогенные (озерные, болотные, озерно-болотные, аллювиально-болотные и др.)	Торф
	Почвы (тундровые, подзолистые, болотные, лесостепные, черноземные, каштановые и др.)	Почвы щебнистые, дресвяные, песчаные Почвы пылеватые и глинистые
Искусственные	Уплотненные в природном залегании	Песчаные грунты  Пылеватые и глинистые, биогенные грунты и почвы
	Насыпные	Крупнообломочные, песчаные, пылеватые, пылеватые и глинистые, заторфованные грунты, торф. Отходы производства (шлаки, золы, формовочная земля и др.), строительные и твердые бытовые отходы
	Намывные	Песчаные, пылеватые и глинистые грунты. Отходы производства (хвосты обогатительных фабрик, шлаки, золы и др.)

условиях их естественного залегания. Типы грунтов выделяются по петрографическому составу на основании общеизвестных геологических классификаций.

В классе дисперсных грунтов выделяются две группы пород — осадочные нецементированные и искусственные грунты. Группа осадочных нецементированных грунтов включает в себя подгруппы крупнообломочных, песчаных, пылеватых, глинистых, биогенных грунтов и почвы. Осадочные породы по своему генезису могут быть элювиальными, аллювиальными, морскими, озерными, ледниковыми и др. Физическое выветривание в начальной стадии своего развития ведет к образованию крупнообломочных грунтов. При

интенсивном его развитии дробление доходит до минеральных зерен, и образуются песчаные и пылеватые породы. При химическом выветривании происходит дальнейшая диспергация вещества, которая сопровождается разрушением первичных минералов и образованием вторичных; среди последних большое значение имеют глинистые минералы. Продукты химического выветривания, попадая в водоемы, образуют илы, из которых в процессе диагенеза возникают глинистые грунты различной степени литификации.

Таким образом, дисперсность осадочных нецементированных пород, изменяющаяся в широком диапазоне, от крупных обломков до глинистых частиц, является не только одним из петрографических показателей, но и свидетельствует о генезисе их структурных (гранулометрических) элементов. Подразделяя осадочные нецементированные породы на подгруппы по их дисперсности, мы сохраняем принятый генетический подход при построении общей классификации грунтов.

Следует обратить внимание, что в предлагаемой классификации в качестве самостоятельной подгруппы выделены пылеватые грунты, включающие в себя лёссовые, являющиеся весьма специфическими образованиями. Содержание в них частиц размером 0,05—0,005 мм (по данным гранулометрического анализа) обычно превышает 50 %, следовательно, в грунтах явно преобладает пылеватая фракция. Они макропористые, общая пористость, как правило, превышает 40 %, неслоистые, не содержат песчаных прослоев и включений грубообломочного материала (кроме известковых конкреций). Эти породы карбонатные, недоуплотненные, неводоустойчивые. Залегают лёссовые грунты на различных элементах рельефа, покрывая их мощным плащеобразным чехлом. По своим инженерно-геологическим особенностям они резко отличаются от обычных глинистых грунтов.

Глинистые грунты обладают специфическими особенностями, которые резко ухудшают их инженерно-геологические свойства и соответственно снижают их несущую способность. К ним относятся также минеральные илы. Положение выделенного типа грунтов в общей классификации до последнего времени остается не совсем ясным. С одной стороны, они выделяются среди осадочных пород без жестких связей на уровне подгруппы, следовательно, имеют самостоятельный ранг, с другой — рассматриваются как глинистые грунты в начальной стадии своего формирования, т. е. входят в подгруппу глинистых грунтов. С нашей точки зрения минеральные илы следует относить к подгруппе глинистых грунтов, так как среди них в дальнейшем выделяются супесчаные, суглинистые и глинистые разности.

Среди осадочных нецементированных грунтов выделяется также подгруппа биогенных грунтов и почв. Биогенные грунты (озерно-болотные, аллювиально-болотные и др.) включают в себя сапропели, заторфованные песчаные и глинистые грунты, торф.

Сапропели — это пресноводные илы, образовавшиеся на дне озерных водоемов за счет продуктов распада растительных и жи-

вотных организмов и содержащие более 10 % органического вещества в виде гумуса и растительных остатков. Коэффициент пористости сапропелей возрастает с увеличением содержания органического вещества и изменяется от 3 до 30 единиц, показатель консистенции больше 1. Содержание фракции больше 0,25 мм не превышает 5 %.

К заторфованным относятся песчаные и глинистые грунты, содержащие в своем составе от 10 до 50 % органических веществ.

Своеобразным образованием является торф. Торфы до последнего времени относительно слабо изучены в инженерно-геологическом отношении. Однако в связи с интенсивным хозяйственным освоением северных и восточных районов СССР они часто стали вовлекаться в зону воздействия различных сооружений, поэтому указанные грунты, несомненно, должны быть отражены и в общей классификации грунтов для целей строительства.

Торф — органическая горная порода, образующаяся в результате отмирания и неполного распада болотных растений в условиях повышенной влажности при недостатке кислорода и содержащая 50 % и более органических веществ.

Почвы целесообразно включить в группу осадочных несцементированных грунтов несмотря на то, что это особые природные образования, которые отличаются от осадочных горных пород по условиям образования. В них всегда присутствует органическое вещество, выделяются определенные генетические горизонты, обладающие различной структурой.

В инженерно-геологическом аспекте у почв есть много общего с обломочными и глинистыми грунтами, поэтому их можно было бы включить в эти подгруппы. Однако, учитывая общий генетический принцип построения классификации грунтов и указанные особенности почв, их все же лучше выделить в виде самостоятельной подгруппы.

Группа искусственных грунтов в классе нескальных грунтов подразделяется в зависимости от характера воздействия человека на подгруппы: уплотненные в естественном залегании, насыпные и намывные грунты, т. е. в этом случае также учитывается происхождение искусственного грунта.

В общую классификацию грунтов не следует включать нефть, каменный уголь и руды, поскольку они или совсем не используются как грунты, или значительно в большей степени представляют интерес как полезные ископаемые.

Таким образом, общая классификация грунтов для целей строительства рассматривает практически все общеизвестные группы пород с точки зрения возможности их использования в качестве оснований, среды или материала для возведения инженерных сооружений.



## ГЛАВА 5.

### ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД

#### ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД

Основные инженерно-геологические особенности магматических пород (состав, структура, текстура, физико-механические свойства) приобретаются в процессе кристаллизации, когда возникают составляющие их минералы, уже обладающие определенными свойствами. Вклад каждого такого компонента в физико-механические свойства породы обусловлен его составом и строением, количественным содержанием, а также размером и формой, характером взаимоотношения с «соседями», т. е. тем, что определяет структуру породы. Все эти факторы зависят от химического состава магмы и условий ее кристаллизации. Химический состав магмы или количественное соотношение в ней главных окислов определяет возможные их комбинации в породе. А как реализуются эти возможные комбинации, в частности, минеральный состав, зависит от условий кристаллизации. Последние оказывают решающее влияние и на структурно-текстурные особенности магматических пород. Резко различные условия кристаллизации интрузивных и эффузивных пород обусловили своеобразие их инженерно-геологических особенностей. Интрузивные породы, образующиеся в условиях большого давления, высоких температур, при достаточно медленном охлаждении и затрудненном удалении газовой составляющей характеризуются полнокристаллической структурой от мелко- до гигантозернистой, низкой пористостью, плотным сложением. Эффузивные породы, образующиеся в условиях небольшого давления, низких температур, быстрого охлаждения, легкого отделения газовой составляющей, при близком минералогическом составе со своими интрузивными аналогами отличаются неполной раскристаллизацией, мелкой, скрытокристаллической или стекловатой структурой, широкими колебаниями величины пористости (до 65 %).

Во всех случаях инженерно-геологические особенности магматических пород формируются в процессе кристаллизации минералов, составляющих породу и обладающих определенными физико-механическими свойствами, а также в процессе образования структуры и текстуры породы.

#### *Формирование физико-механических свойств основных породообразующих минералов*

Физико-химические и термодинамические условия кристаллизации минералов определяют закономерности расположения в пространстве составляющих минерал атомов, расстояние между ними, ха-

рактически и прочность связей. Дальнейшее изменение физико-механических свойств минералов происходит в результате воздействия разнообразных вторичных процессов.

Природа или физическая сущность физико-механических свойств минералов ясна из тех факторов, которые их определяют. Минералогическая плотность, как показано В. В. Ждановым, обуславливается атомным весом и ионным объемом элементов, слагающих минерал (т. е. их ионной плотностью), координационным числом катионов, отношением объема аниона к катиону, характером связи между атомами, типом кремнекислородных радикалов, состоянием вещества (аморфное или кристаллическое). Объемная плотность обуславливается минералогической плотностью (и факторами, ее определяющими), а также дефектами структуры (вакансиями, дислокациями, порами, микро- и ультратрещинами и т. п.).

По данным А. С. Поваренных и др., упругие свойства минералов изменяются с увеличением прочности межатомных связей в решетке и валентности катионов, уменьшением межатомных расстояний, увеличением координационного числа, с наличием или отсутствием катионов «внедрения», заполняющих промежутки между кремнекислородными радикалами. Чем выше значения этих показателей, тем труднее деформируется минерал, тем больше величины упругих модулей.

Скорость распространения упругих волн, которая рассматривается обычно как величина, характеризующая упругие свойства минералов, определяется в основном плотностью упаковки атомов в решетке, т. е. числом атомов в единице объема.

Теоретическая прочность минералов (прочность на одноосное сжатие, микротвердость и т. п.) зависит в основном от типа и прочности связей в кристаллической решетке и определяется прочностью наислабейшей связи. По данным А. С. Поваренных, прочность связей обусловлена эффективной валентностью ионов, участвующих в связи, межатомным расстоянием, координационным числом, степенью ковалентности связи, числом и состоянием несвязанных валентных электронов. Практическая прочность минералов значительно ниже теоретической вследствие наличия разного типа дефектов. Как известно, в процессе потери прочности кристаллическими телами большую роль играет пластическая деформация (движение петель дислокаций). Механическая прочность кристаллов, по мнению физиков, зависит именно от дислокаций.

Последовательность выделения минералов из магмы идет в виде двух реакционных рядов (по Боуэну): плагиоклазы, калиевые полевые шпаты, кварц и оливины, пироксены, амфиболы, слюды. При кристаллизации из расплава полевых шпатов сначала выделяются основные более плотные минералы ( $\rho_s = 2,76 \text{ т/м}^3$ ), а в конце — кислые менее плотные ( $\rho_s = 2,55 \text{ т/м}^3$ ). Физико-механические свойства плагиоклазов определяются особенностями строения решетки и количественным соотношением альбитовой и анортитовой составляющей. Решетка полевых шпатов отличается достаточно

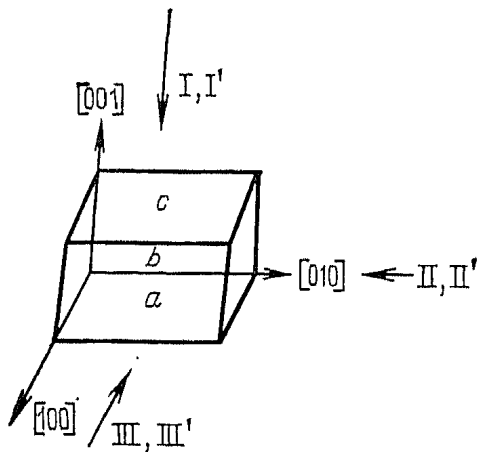


РИС. 12. Элементарная ячейка полевых шпатов и обусловленная ее анизодесмичностью анизотропия физико-механических свойств олигоклаза и микроклина.

Параметры ячейки (в нм):  $a=0,7$ ;  $b=1,3$ ;  $c=0,86$ ; I — олигоклаз ( $v_p=5,67$  км/с,  $R_c=214$  МПа), I' — микроклин ( $v_p=5,36$  км/с,  $R_c=133$  МПа), II — олигоклаз ( $v_p=6,66$  км/с,  $R_c=117$  МПа), II' — микроклин ( $v_p=6,10$  км/с,  $R_c=93$  МПа), III — олигоклаз ( $v_p=5,15$  км/с,  $R_c=174$  МПа), III' — микроклин ( $v_p=4,56$  км/с,  $R_c=98$  МПа)

высоким коэффициентом анизодесмичности структуры (1,86), степенью ковалентности связи, равной 43 %, наличием в каркасной структуре катионов «внедрения». Все это обуславливает их относительно высокую плотность, прочность и четко выраженную анизотропию свойств (рис. 12). Анизотропия скорости распространения упругих волн обусловлена различной ретикулярной плотностью атомов граней, а анизотропия прочности — различной прочностью связей [20]. Известно, что увеличение в плагиоклазе анортитовой составляющей (повышение его основности) увеличивает в целом плотность минерала, повышает скорость распространения упругих волн и величины упругих модулей [2], что связано с более полным заполнением пустот между кремнекислородными тетраэдрами ионами  $Ca^{2+}$ . Прочность изменяется в обратном направлении, она уменьшается с увеличением основности плагиоклазов [20], так как при этом повышается степень ковалентности связей в структуре. Таким образом, при образовании плагиоклазов магматическим путем, в условиях непрерывной реакции возникших кристаллов с расплавом столь же непрерывно меняются и физико-механические свойства. По мере обогащения плагиоклаза альбитовой составляющей происходит не только уменьшение плотности минералов, но соответственно снижаются скорости распространения упругих волн и величины упругих модулей, но при этом возрастает прочность кристаллов.

Физико-механические свойства калинатровых полевых шпатов обусловлены в основном их неоднородным строением, которое является результатом их преобразований. Связано это с тем, что калинатровые полевые шпаты при высоких температурах дают непрерывные твердые растворы от ортоклаза до альбита (смешанные кристаллы), которые при медленном охлаждении распадаются на две твердые фазы. Одна фаза содержит больше калиевого полевого шпата, другая — натриевого. Последняя выделяется в виде вростков одинаково ориентированных пластинок альбита, обуславливающих пертитовую структуру ортоклаза и обладающих более высокой микротвердостью. Альбитовые вростки затушевывают спайность, уменьшают роль связанных с ней поверхностей ослаб-

ления, благоприятных для трансляционного скольжения, что в сочетании с увеличением их содержания приводит к росту прочности ортоклаза (от 100 до 200 МПа), скорости распространения упругих волн (от 5,8 до 6,3 км/с) и величин упругих параметров, таким образом, меняется характер разрушения в результате увеличения хрупкости минерала. Альбитизация, приводящая к появлению грубой макропертитовой структуры, как правило, снижает прочностные свойства минералов, так как плоскости альбитизации становятся дополнительными поверхностями разрушения [20, 21].

При повышении упорядоченности распределения катионов в калинатровом полевоом шпате под действием вторичных процессов (калиевый и натриевый метасоматоз и т. п.) происходят постепенные фазовые переходы, связанные с изменением степени триклинности, в результате ортоклаз может перейти в микроклин. В этом случае физико-механические свойства полевых шпатов будут определяться количественным соотношением ортоклазовой, микроклиновой и альбитовой фаз, степенью упорядоченности их структуры, а также размером и формой пертитов.

Кристаллы кварца, выросшие в свободных условиях при низких температурах, не имеют обычных видимых дефектов структуры. Плотность дислокаций, т. е. их число на квадратный сантиметр площади, в совершенных естественных кристаллах кварца не превышает 10—100. Поэтому физико-механические свойства кристаллов обуславливаются в основном параметрами кристаллической решетки. Кварц как минерал последних стадий кристаллизации имеет довольно «рыхлую» ажурную каркасную структуру, а состав ионов, входящих в решетку, определяет высокую степень ковалентности связей (54 %). Все это обуславливает невысокую плотность ( $\rho_s = 2,65 \text{ т/м}^3$ ,  $v_p = 6,2 \text{ км/с}$ ), высокую прочность на одноосное сжатие (до 890 МПа), на разрыв (83 МПа) и микротвердость ( $H_{ср} = 1040$ ). С невысоким коэффициентом анизотропии структуры кварца [20], равным 1,1, связана слабая анизотропия физико-механических свойств.

Рост кристаллов кварца под действием кристаллизационного давления приводит к его деформации, что макроскопически выражается в появлении облачности или молочно-белой окраски. В результате появления объемных дефектов снижаются плотность, микротвердость (на 20—40 %), прочность на одноосное сжатие (на 50—55 %), прочность на разрыв. Воздействие на кварц еще больших напряжений любого происхождения приводит к «разблокированности» кристаллов в результате смещения отдельных его частей по нескольким системам скольжения. Это вызывает сложное напряженное состояние в кристалле, повышение его хрупкости, снижение микротвердости (более чем на 60 %), прочности (на 55 %), трещиностойкости.

При образовании кварца в высокотемпературных условиях в его решетке возрастает содержание структурной примеси  $Al^{3+}$ , которая создает деформацию особого рода, ведущую к некоторому «разрыхлению» решетки, уменьшению степени ковалентности свя-

зей. Макроскопически это проявляется в появлении дымчатой окраски и в снижении прочности кварца до 550—570 МПа.

В условиях пегматитов с наложенной минерализацией кристаллы кварца обогащаются газожидкими включениями, в результате чего снижается плотность, уменьшаются скорость распространения упругих волн (на 2—3 %), микротвердость (на 15 %), прочность (на 15—20 %). Образовавшиеся включения обуславливают неоднородность напряженного состояния кристаллов и в целом повышают его хрупкость.

В ряду фемических минералов в процессе кристаллизации идет постепенная смена плотных минералов (оливины) минералами средней плотности с более рыхлой структурой (пироксены, амфиболы, слюды) при общем уменьшении минералогической плотности от 4 до 2,7 т/м<sup>3</sup>. В этом же направлении уменьшаются упругие параметры — модуль Юнга и модуль объемного сжатия (в Па): оливин  $20 \cdot 10^5$  и  $13,1 \cdot 10^{10}$ , пироксены  $15 \cdot 10^5$  и  $10,5 \cdot 10^{10}$ , амфиболы  $13 \cdot 10^5$  и  $9,7 \cdot 10^{10}$ , слюды  $7 \cdot 10^5$  и  $5,1 \cdot 10^{10}$ . В этом же направлении растет анизодесмичность структуры и соответственно анизотропия физико-механических свойств. По данным Д. Чарльза, прочность пироксенов равна 270 МПа, амфиболов 220 МПа. Внутри каждой из рассматриваемых групп минералов кристаллизация идет в виде твердых растворов с постепенным изменением состава и физико-механических свойств.

Кальцит не относится к породообразующим минералам магматических пород, но он часто выполняет трещины и развивается в качестве вторичных минералов по породообразующим, поэтому его свойства целесообразно рассмотреть здесь.

Основные особенности кальцита: низкая прочность, равная в среднем 80 МПа, из-за небольшой степени ковалентности связи (19 %) и большая анизотропия физико-механических свойств, связанная с высокой анизодесмичностью структуры (3,42) [20]. Кальцит характеризуется довольно высокой плотностью (2,72 т/м<sup>3</sup>), скоростью распространения упругих волн (6,70 км/с), низкими средними значениями микротвердости (120).

Под воздействием напряжений кристаллы кальцита испытывают как пластическую деформацию, так и хрупкое разрушение. Пластическая деформация развивается путем трансляционного скольжения или двойникования, которое приводит, как правило, к ослаблению кристалла. Хрупкое разрушение ведет к образованию трещин по спайности и отдельностям, снижающих прочность от 40—60 МПа (при одной благоприятно направленной системе) до 18—20 МПа (при двух и более системах).

Таким образом, физико-механические свойства минералов, растущих в благоприятных условиях, формируются под действием физико-химических и термодинамических законов кристаллизации и определяются в конечном итоге параметрами кристаллической решетки. С температурными условиями образования минералов связано образование структурной примеси в кристаллах, приводящее к изменению многих физико-механических свойств. После-

дующее воздействие механических напряжений ведет к развитию пластических деформаций и хрупкого разрушения в кристалле. Увеличение до некоторого предела масштаба развития дефектов в кристаллах (в ряду примесей и деформаций) снижает прочность и плотность, повышает хрупкость, а следовательно, приводит к уменьшению трещиностойкости минералов.

### *Формирование структурно-текстурных особенностей магматических пород*

Структура пород определяется размером и формой кристаллов, характером контактов между ними, типом связей, наличием пор. Размеры кристаллов или степень кристалличности пород определяются в основном условиями кристаллизации магмы и частично ее химическим составом. Число образующихся центров кристаллизации и скорость роста кристаллов влияют на характер структуры. Различное соотношение этих величин в условиях разной скорости переохлаждения может вызвать образование структур различной зернистости. Степень вязкости магмы, набор ее компонентов и их концентрация влияют на размер кристаллов. В более вязкой магме (кислой) затруднена диффузия вещества из-за внутреннего трения, поэтому рост кристаллов происходит медленно. Скорость кристаллизации какого-либо компонента увеличивается в присутствии других веществ, поэтому полиминеральные породы (габбро) при прочих равных условиях отличаются более мелкозернистыми структурами, чем мономинеральные (лабрадорит).

Образующаяся структура породы во многом определяет ее свойства, так как более мелкозернистые структуры при прочих равных условиях приводят к значительно более высокой прочности пород. Например, в долеритах увеличение преобладающего размера кристаллов от 0,1—0,2 и 0,4—0,6 до 0,5—0,8 мм приводит к уменьшению прочности пород соответственно, в МПа: 260—170; 160—80; менее 80. Высокая прочность мелкозернистых пород обусловлена следующими причинами:

1. Высокая прочность самих мелких кристаллов по сравнению с крупными;
2. Наличие на поверхности мелких кристаллов большего числа участков с повышенной химической активностью. Это приводит в свою очередь к тому, что зона контакта между ними часто прочнее самих кристаллов;
3. Наличие большего числа дефектов на контакте крупных кристаллов (микротрещин, пор и т. п.);
4. Менее благоприятные условия для образования и роста трещин, предшествующих разрушению.

Химический состав магмы и равномерность ее охлаждения определяют и относительный размер кристаллов в породе. Вкрапленники часто отличаются повышенной микротрещиноватостью, меньшей прочностью, что приводит к тому, что с увеличением количества вкрапленников в породах с порфировой структурой по-

вышаются пористость, водопоглощение, снижаются скорости распространения упругих волн, прочность.

Форма кристаллов, обусловленная режимом среды кристаллообразования, скоростью роста, числом центров кристаллизации и анизотропией сил связи в кристаллах, также оказывает большое влияние на физико-механические свойства пород. Извилистые очертания границ кристаллов, характерные для аллотриоморфнозернистой структуры, значительно повышают прочность породы. Наличие гладких хорошо выраженных граней (типа *S*), характерных для идиоморфнозернистой структуры, определяет менее прочные связи между кристаллами, создает более благоприятные условия для разрушения и поэтому в целом снижает прочность пород. На форму кристаллов оказывает также большое влияние анизотропия сил связи в них, которая проявляется в неблагоприятных условиях роста. По-видимому, резко выраженный игольчатый характер микролитов плагиоклаза в эффузивных породах, переплетение которых обуславливает их высокую прочность, связан с развитием кристаллов в направлении наиболее прочных связей.

Таким образом, из наиболее характерных структур, связанных с размером и формой кристаллов, которые приобретает магматическая порода в процессе своего рождения, наибольший вклад в повышение ее прочности вносят афанитовые и мелкозернистые структуры, равномернозернистые, аллотриоморфнозернистые; для эффузивных пород — структуры, характеризующиеся полным или почти полным отсутствием стекла (интерсертальная, микроофитовая).

Связи между кристаллами в породе являются связями химического типа, действующими на расстояниях  $3-10 \cdot 10^{-8}$  см, т. е. на расстояниях радиусов ионов. По механизму образования условно их можно подразделить на первичные и вторичные. Первичные связи обусловлены адсорбционными силами, связанными с наличием на поверхности кристаллов свободных ненасыщенных валентных связей, приводящих к тому, что поверхностный слой кристаллов находится в состоянии повышенной химической активности. Вклад этих связей в прочность контакта зависит не только от строения решетки соседствующих минералов, но и от размера кристаллов. Вторичные связи возникают в результате взаимной диффузии атомов при сближении граней кристаллов. Масштаб диффузионных процессов, производящих как бы диффузионную сварку кристаллов, и их механизм зависят от размера и степени подвижности атомов, температуры и давления. Как адсорбционные, так и диффузионные связи при прочих равных условиях обеспечивают большую прочность связи между кристаллами в мелкокристаллических породах, чем в крупнокристаллических.

Условия кристаллизации интрузивных пород определяют достаточно высокую плотность и низкую пористость, которая колеблется от 1 (у ультраосновных пород) до 4,5 % (у кислых пород), повышаясь с уменьшением основности и уменьшением глубины формирования пород. Первичная пористость интрузивных пород свя-

зана с тонкими порами на контакте зерен, как бы заземленными между сомкнувшимися гранями двух соседних кристаллов, и с ультратрещинами, образующимися в результате термических напряжений при остывании породы. Термические напряжения проявляются на разных уровнях — от кристалла до массива. При охлаждении кристаллов они приводят к образованию на их поверхности большого числа ультратрещин, затухающих с глубиной. Интенсивность ультратрещиноватости зависит от размера кристаллов (растет с увеличением размера) и от степени анизотропии структуры, увеличиваясь с увеличением последней. Физико-химические и термодинамические условия застывания потоков эффузивов на земной поверхности вызывают закономерное изменение пористости (1—60 %) вследствие удаления газовой составляющей.

Вторичная пористость, а вернее, пустотность породы, образуется в результате возникновения вторичных микротрещин в минералах под действием тектонических сил, сил минеральных превращений (модификационные превращения, замещения минералов, метамиктный распад), которые сопровождаются приращением объема под действием сил выветривания. Увеличение пустотности пород во всех случаях снижает показатели ее прочностных и деформационных свойств.

В процессе формирования породы образуется определенная текстура, которая вносит свой вклад в величину показателей физико-механических свойств пород, часто обуславливая их неоднородность и появление анизотропии. Наибольшую анизотропию физико-механических свойств обеспечивает гнейсовидная текстура, так как ее направленность наиболее выдержана в породе. Флюидальная текстура даже в шлифе часто имеет нарушения направленности кристаллов, что в некоторой степени затушевывает анизотропию физико-механических свойств.

Таким образом, формирование физико-механических свойств магматических пород на раннемагматической стадии связано с процессами кристаллизации магмы, с образованием определенного набора минеральных компонентов, с приобретением характерных структурно-текстурных особенностей пород.

На позднемагматической стадии формирование свойств обусловлено процессами остывания и теми изменениями, которые могут произойти в породе под действием остаточных постмагматических растворов, ведущих к появлению различных структур замещения и к минеральным новообразованиям, которые могут изменить физико-механические свойства пород как в сторону их улучшения, так и ухудшения (см. гл. 6).

## **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ИНТРУЗИВНЫХ ПОРОД**

Интрузивные породы имеют достаточно широкое развитие на земной поверхности и подразделяются в соответствии с содержанием



кремнезема на ультраосновные (перидотиты, дуниты, пироксени-ты), основные (габбро), средние (диориты) и кислые (гранитоиды). В этом ряду пород (дуниты→граниты) по мере увеличения содержания кремнезема и уменьшения глубины их зарождения отмечается увеличение их неоднородности, проявляющейся на всех уровнях, что выражается в следующем.

1. Увеличивается неоднородность минерального состава, выражающаяся в переходе от одного-двух породообразующихся минералов в ультраосновных породах к трем-четырем в кислых.

2. С повышением кислотности пород возрастает плотностная неоднородность слагающих их ионов. В ультраосновных породах преобладают ионы средней плотности (Mg со средней ионной плотностью  $I=20,3$ ), в основных породах возрастает роль более тяжелых ионов (Fe— $I=32,6$ ; Al— $I=54,7$ ), в то же время появляется значительное количество относительно легких ионов (Ca— $I=10$ ). В кислых породах плотностная неоднородность ионов выражена наиболее четко (Si— $I=104,2$ ; Na— $I=6$ ; K— $I=3,3$ ).

3. Наряду со стремлением к увеличению средней ионной плотности вещества в кислых породах В. В. Жданов отметил противоположную тенденцию к максимальному разуплотнению вещества путем создания наименее плотных кристаллохимических структур. Соответственно для ультраосновных пород характерны плотные и средние минералы, для основных — средние, для кислых — рыхлые. Преобладание этой тенденции приводит к уменьшению плотности пород с возрастанием кислотности от  $3,25 \text{ т/м}^3$  (перидотит) до  $2,58 \text{ т/м}^3$  (гранит) и ее увеличению с возрастанием глубины формирования породы. Соответственно наблюдается уменьшение пористости от  $3,5\text{—}4,5\%$  (у кислых пород) до  $1\%$  (у ультраосновных пород) с уменьшением кислотности и глубины залегания пород.

4. Уменьшается однородность структуры пород по мере увеличения их кислотности; структуры от равномернозернистых переходят в разнотекстурированные, часто порфировидные.

Рассмотренные закономерности приводят к появлению тенденции снижения прочности пород с увеличением их кислотности.

Кислые интрузивные породы, представленные гранитами и гранодиоритами, распространены наиболее широко из всех магматических пород.

Физико-механические свойства гранитоидов определяются минеральным составом и структурно-текстурными особенностями, связанными с условиями кристаллизации. Последовательная смена стадий кристаллизации гранодиоритов нормальными гранитами (в области Станового хребта) в условиях некоторого изменения давлений и температур привела не только к изменению количественного содержания минералов (хотя соотношение их остается близким), но и к изменению некоторых особенностей одного и того же минерала в различных гранитоидах. Так, несколько увеличивается содержание кварца, одного из наиболее прочных породообразующих минералов, в ряду гранодиорит — нормальный гра-

нит — лейкократовый гранит. При этом последовательно возрастают размер зерен кварца, изометричность формы кристаллов, их неоднородность по размеру, дымчатость окраски, а это сопровождается увеличением параметров решетки: растет содержание различного рода дефектов в виде минеральных включений. Все это приводит к уменьшению микротвердости кварца и его прочности. Одновременно уменьшается содержание плагиоклаза и возрастает количество менее прочного калиевого полевого шпата. Несмотря на то что уменьшение содержания плагиоклазов в рассматриваемом ряду пород сопровождается уменьшением размера их кристаллов, снижением степени идиоморфизма, основности, т. е. сопровождается увеличением роли тех факторов, которые повышают прочность кристаллов плагиоклаза, тем не менее это не компенсирует указанных выше потерь прочности. Увеличение размера кристаллов кварца и уменьшение размера кристаллов плагиоклаза обуславливают увеличение неоднородности структуры от гранодиорита к гранитам. В результате прочность гранодиоритов в целом более высокая по сравнению с нормальными гранитами (табл. 6), причем наименьшей прочностью характеризуются лейкократовые граниты. В этом же направлении уменьшается плотность пород (2,65—2,55 т/м<sup>3</sup>). Для гранодиоритов области Станового хребта прочность на одноосное сжатие изменяется в пределах от 120 до 225 МПа (при средних значениях 175 МПа), достаточно высоких значений достигают и деформационные показатели. Прочность нормальных гранитов в целом ниже и колеблется в очень широких пределах — от 60 до 200 МПа (при средних значениях по монолитам 130 МПа) в зависимости от преобладающих темноцветных минералов. Наиболее низкой прочностью обладают биотитовые и двуслюдяные граниты (от 60 до 170 МПа при средних значениях 120 МПа). Увеличение содержания биотита до 10 % приводит к изменению почти всех показателей физико-механических свойств и к снижению прочности до 50—85 МПа. Наиболее высокой прочностью характеризуются роговообманковые граниты (от 100 до 200 МПа, при средних значениях 150 МПа). По прочности роговообманковые граниты приближаются к гранодиоритам. Преобладающие значения прочности лейкократовых гранитов колеблются в пределах 80—120 МПа.

Высокими показателями физико-механических свойств обладают плагиограниты. Например, архейские плагиограниты (Хибинский массив), характеризующиеся среднезернистой структурой, с извилистыми, иногда зубчатыми границами между зернами, обладают высокой плотностью (табл. 7), низкой пористостью, высокой прочностью на одноосное сжатие, достигающей 250 МПа (при средних значениях 180 МПа).

Формирование гранитоидов в условиях трещинных тел (малых интрузий), особенно в условиях жил, когда раскристаллизация расплава происходит достаточно быстро, приводит к развитию тонко- и мелкозернистых структур, часто с ксеноморфной формой зерен, что обуславливает высокие прочности пород. Например, прочность

Таблица 6

## Физико-механические свойства гранитоидов

Порода	Возраст	Район развития пород	Особенности состава и строения	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Объемная масса, т/м <sup>3</sup>
Гранит лейкократовый	Pz <sub>2</sub>	Северная окраина Хибинского массива	—	2,59—2,66	2,55—2,65
				2,63 (5)	2,59
Гранит биотитовый	PR	Область Станового хребта	Биотит 1%	2,64—2,69	2,55—2,60
				2,66 (15)	2,58
			Биотит 10%	2,60—2,67	2,47—2,53
				2,63 (10)	2,50
Гранит биотит-рогово-обманковый	Mz	То же	Биотит 3—5%, Роговая обманка 3—10%	2,67—2,75 2,71 (12)	2,59—2,63 2,61
Гранодиорит	Mz	То же	Слабоизмененный	2,71—2,79 2,74 (15)	2,64—2,71 2,68
			Диафторированный	2,68—2,77 2,72	2,58—2,67 2,61
Плагиогранит	AR	Северная окраина Хибинского массива	—	2,65—2,72 2,68 (25)	2,60—2,69 2,66
Гнейсогранит биотитовый	RR	Область Станового хребта	—	2,63—2,69 2,66 (5)	2,59—2,71 2,62

Примечание. В числителе предельные значения, в знаменателе—средние, в скобках—число.

Общая пористость, %	Скорость продольных волн, км/с	Динамический модуль упругости, $E_d \cdot 10^4$ МПа	Коэффициент Пуассона	Прочность на одноосное сжатие, МПа		Прочность на разрыв, МПа
				воздушно-сухое состояние	водонасыщенное состояние	
$\frac{1,5-3,4}{1,7}$	$\frac{3,8-4,9}{4,3}$	$\frac{4,1-5,3}{4,5}$	—	$\frac{80-120}{100}$	—	15
$\frac{1,9-5,0}{3,38}$	$\frac{2,9-4,3}{3,5}$	$\frac{1,7-4,6}{2,9}$	$\frac{0,22-0,32}{0,27}$	$\frac{80-175}{120}$	$\frac{50-150}{90}$	$\frac{4,9-9,4}{7,1}$
$\frac{3,8-6,1}{5,1}$	$\frac{1,4-2,3}{1,9}$	$\frac{0,5-1,6}{0,9}$	$\frac{0,23-0,33}{0,27}$	$\frac{53-85}{70}$	$\frac{30-50}{40}$	$\frac{1,5-2,5}{1,9}$
$\frac{3,0-4,3}{3,6}$	$\frac{3,6-4,7}{3,9}$	$\frac{3,1-4,9}{3,8}$	$\frac{0,21-0,28}{0,25}$	$\frac{120-210}{150}$	$\frac{100-160}{120}$	$\frac{8-12}{10}$
$\frac{1,1-3,9}{2,4}$	$\frac{4,0-5,1}{4,4}$	$\frac{2,9-5,9}{4,2}$	$\frac{0,18-0,29}{0,25}$	$\frac{120-225}{175}$	$\frac{86-140}{115}$	$\frac{8-11}{9}$
$\frac{1,8-5,1}{4,2}$	$\frac{2,3-3,1}{2,7}$	$\frac{1,1-1,9}{1,4}$	$\frac{0,27-0,36}{0,32}$	$\frac{60-115}{85}$	$\frac{70-80}{75}$	$\frac{4-7}{5}$
$\frac{0-3,0}{0,8}$	$\frac{3,8-5,6}{4,5}$	$\frac{4,5-7,1}{5,8}$	$\frac{0,13-0,25}{0,20}$	$\frac{105-255}{180}$	$\frac{95-170}{135}$	$\frac{12-20}{15}$
$\frac{2,4-3,0}{1,7}$	$\frac{2,8-4,8}{4,0}$	$\frac{1,3-5,8}{3,6}$	$\frac{0,10-0,33}{0,23}$	$\frac{135-200}{165}$	$\frac{125-165}{140}$	$\frac{7,5-11,5}{9,5}$

сло определений.

Т а б л и ц а 7

Прочности и скорости распространения упругих волн в гранитах.  
По данным Н. С. Красиловой

Порода	Состав минералов, %	Преобладающий размер кристаллов, мм	Скорости распространения упругих волн, км/с	Прочность на одноосное сжатие, МПа
Микрогранит	Кварц—75, плагиоклаз—20, калиевый полевой шпат—4, биотит, роговая обманка—1	0,05—0,08	5,2—5,4	300—350
			5,3	330
			(4)	(4)
Гранит-аплиг	Кварц—70, плагиоклаз—20, калиевый полевой шпат—8, биотит—2	0,10—0,15	3,7—4,2	220—270
			3,9	250
			(4)	(4)
Нормальный гранит	Кварц—30—60, плагиоклаз—20, калиевый полевой шпат—18—40, роговая обманка—2,5, биотит—1	0,5—1 до 5	2,7—4,0	80—210
			3,2	130
			(25)	(25)
Гранит-рапакиви	Калиевый полевой шпат—70, кварц—18—25, плагиоклаз—8, биотит, роговая обманка—3—4	3—5 до 10	4,3—5,0	90—150
			4,6	120
			(4)	(4)

Примечание. В числителе даны предельные значения, в знаменателе — средние, в скобках — число определений.

гранит-аплита составляет 250 МПа, микрогранита — 330 МПа (см. табл. 6, 7). В табл. 7 показано, что прочность гранитоидов устойчиво возрастает с уменьшением преобладающего размера кристаллов.

Все рассмотренные гранитоиды являются обычно изотропными по своим физико-механическим свойствам. Воздействие давлений и температур вызывает развитие процессов перекристаллизации и появление гнейсовидных текстур, что приводит прежде всего к анизотропии физико-механических свойств пород. Особенно это характерно для плагиогнейсо-гранитов и гнейсо-гранитов, часто встречающихся среди гранитоидов архейского и протерозойского возраста. Они обладают аллотриоморфнозернистой с элементами реакционной (мирмекиты, реакционные каймы по первичным темноцветным, заливообразные вторжения минералов друг в друга) и пойкилитовой (включения кварца в плагиоклазы) структурой. Такая структура определяет высокие физико-механические свойства гнейсо-гранитов и плагиогнейсо-гранитов по сравнению с другими

гранитоидами (см. табл. 6). Но гнейсовидность текстуры вызывает появление анизотропии прочностных и упругих свойств.

При воздействии на гранитоиды высоких давлений, когда нет условий для перекристаллизации, происходит их частичное раздробление (катаклиз). Хрупкие минералы растрескиваются и дробятся, мягкие изгибаются. Кварц приобретает волнистое угасание. В породах появляется катакластическая структура, когда крупные, сохранившиеся кристаллы плагиоклазов и калиевых полевых шпатов как бы погружены в мелкозернистую раздробленную массу минералов. Катаклиз гранитоидов снижает их прочностные и деформационные показатели примерно на 20 %; несколько повышает пористость. В тех случаях, когда гранитоиды залегают вблизи зон глубинных разломов или зон смятия хребтов в условиях активного поступления  $H_2O$  и  $CO_2$ , может начаться регрессивное минеральное преобразование гранитоидов. Диафторез мезозойских гранитоидов Становой области протерозойской складчатости выразился в актинолитизации амфиболов на 10 %, в хлоритизации биотита от 0 до 100 %, пелитизации и серицитизации полевых шпатов на 30—50 %. По-видимому, эти процессы сопровождаются выщелачиванием, что приводит к увеличению пористости до 4 %, резкому снижению скоростей упругих волн (см. табл. 7), уменьшению средних значений динамического модуля упругости, прочности на одноосное сжатие, на разрыв. Такое довольно резкое ухудшение физико-механических свойств связано прежде всего с образованием по пороодообразующим минералам новых, более мягких минералов. Например, пелитизация ортоклаза, выражающаяся визуально в осветлении минерала, приводит к снижению микротвердости на 10 %, прочности на 25 %. Полное замещение ортоклаза, выражающееся в появлении бурой окраски, снижает микротвердость на 40 %, прочность на 50 %. Серицитизация также ослабляет минерал. Кристалл калиевого полевого шпата в лейкократовых верхнепалеозойских гранитах (Хибинский массив), неравномерно покрытый чешуйками серицита, имеет средние значения микротвердости на неизменных участках 1040—1140, чешуек серицита 300—340, микротвердость калиевого полевого шпата вблизи чешуйки серицита падает до 450—500, на расстоянии 0,0006 мм от нее — 720, на расстоянии 0,0012 мм — 920. Радиус площади и степень снижения микротвердости калиевого полевого шпата увеличивается с ростом размера чешуек серицита. Это свидетельствует о том, что образование чешуек серицита сопровождается выносом компонентов из решетки полевого шпата, что приводит к ее разрыхлению, снижению микротвердости и прочности. Поэтому процессы диафтореза, ведущие к образованию более мягких вторичных минералов, к разрыхлению решетки пороодообразующих минералов, в целом ухудшают физико-механические свойства гранитоидов.

Средние интрузивные породы, представленные диоритами, имеют менее широкое распространение. Диориты составляют 1,8 % от всех магматических тел. От гранитоидов они отличаются более высокими прочностными и деформационными показателями, что

обусловлено, по-видимому, бóльшей однородностью их состава и структуры. По своим свойствам они наиболее близки к роговообманковым гранитам. Тем не менее колебания величин показателей их свойств связаны с составом темноцветных и с некоторым различием структуры по размеру зерен. Наиболее высокую прочность, по данным Е. П. Труфмановой, имеют мелкозернистые диориты (260—300 МПа). Высокой прочностью характеризуются разности кварцевых диоритов (до 250—230 МПа), наиболее низкой — биотитовых.

Представителями основных пород являются габбро. Это мелко- и среднезернистые породы, состоящие преимущественно из основных плагиоклазов (лабрадора, битовнита — 55—60 % и примерно в таких же количествах фемического минерала, представленного обычно пироксеном — 40—45 %). Однородность структуры, высокая прочность породообразующих минералов обуславливают высокие показатели прочностных и деформационных свойств габбро. Средние значения прочности на одноосное сжатие 228 МПа, при максимальных значениях до 320 МПа, динамический модуль упругости  $9,94 \cdot 10^4$  МПа, пористость очень низкая — 0,22 %. Рассчитанные Г. В. Алексеевым значения прочностных показателей по уравнениям регрессии для габбро с максимальным теоретически возможным содержанием главных породообразующих минералов равны 250—270 МПа. Средние значения прочности габбро при этом снижаются до 130 МПа (колеблясь от 100 до 160 МПа), объемной массы до 2,79 т/м<sup>3</sup>, пористость повышается до 3 % (от 1,5 до 4 %), коэффициент Пуассона снижается до 0,26, динамический модуль упругости до  $6,10 \cdot 10^4$  МПа.

К ультраосновным породам относятся перидотиты и пироксениты, которые являются начальными продуктами кристаллизации ультраосновной магмы, а конечным — габбро. Ультраосновные породы отличаются однородностью минерального состава, так как состоят из одного (пироксениты) или двух (перидотиты) фемических минералов (оливина и пироксена), не содержат полевых шпатов. Структура их мелко- и среднезернистая, равномернoзернистая, текстура массивная. Г. В. Алексеев, изучавший свойства ультраосновных пород, пришел к выводу, что они определяются в основном минеральным составом. Рассчитанные им значения прочностных показателей по уравнениям регрессии (с максимальным теоретически возможным содержанием главных породообразующих минералов) показали, что прочность при сжатии составляет 360—420 МПа. Практически в породах прочность часто снижается в результате появления вторичных минералов, характеризующихся низкой прочностью. Пироксениты протерозойского возраста массива Пильгуярви (Кольский п-ов), состоящие из пироксена на 40—75 %, содержащие плагиоклаз до 15 % и рудные минералы до 10 %, характеризуются чрезвычайно малой пористостью, в результате значения плотности и объемной массы практически совпадают, но прочность их достигает в среднем лишь 245 МПа. Перидотиты того же массива, состоящие на 90 % из оливина и пироксена,

отличаются прочностью на одноосное сжатие до 335 МПа, динамический модуль упругости —  $11 \cdot 10^4$  МПа; с уменьшением содержания оливина и пироксена до 50 % и соответственно увеличением содержания серпентина прочность падает до 300 МПа, а динамический модуль упругости — до  $10 \cdot 10^4$  МПа. Дальнейшее увеличение серпентинизации, ведущее к уменьшению содержания пироксена и оливина до 10 %, приводит к снижению прочности до 200 МПа, динамического модуля упругости до  $8 \cdot 10^4$  МПа.

Таким образом, при формировании физико-механических свойств интрузивных пород видна достаточно отчетливая тенденция к увеличению показателей прочностных и деформационных свойств с возрастанием их основности, что связано в основном с увеличением в этом направлении однородности как в отношении структуры, так и минерального состава, обусловленной химическим составом магмы и условиями ее кристаллизации.

### **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЭФФУЗИВНЫХ ПОРОД**

Вулканогенные породы занимают огромные пространства Советского Союза. Особенно много среди них пород основного — среднего состава, которые по объему более чем в 5 раз преобладают над всеми остальными магматическими породами. Эффузивы встречаются во всех стратиграфических толщах, начиная с протерозоя, а образование их можно наблюдать и в наши дни. Это позволяет проследить все стадии изменения как самих пород, так и их свойств от самого зарождения до полного перерождения в метаморфические породы или в глины. Важной особенностью эффузивов является то, что благодаря газам, содержащимся в магме, при остывании в них образуется уникальная для скальных пород пористость, величина которой колеблется от 0 до 65 %, а размер пор от 0,001 до 50 мм и более. Эффузивы основного — среднего состава сложены ограниченным числом минералов: плагиоклазы, моноклинные и ромбические пироксены, в меньшей степени оливины и амфиболы, почти всегда присутствуют рудные минералы и стекло. Различный химический состав магмы вызывает достаточно резкие колебания в процентном содержании этих компонентов и изменении структуры породы.

Для молодых эффузивов неоген-четвертичного возраста наиболее характерна пористая текстура породы, где поры, образовавшиеся при застывании расплава, не заполнены вторичными минералами, а остаются открытыми в течение длительного периода развития территории, вплоть до ее погружения на значительные глубины и начала первых этапов метаморфизма. Этот период неодинаков в различных регионах. Для п-ова Камчатки и Исландии он охватывает четвертичный период, для Кавказа захватывает еще и неоген.

Большое Трещинное Толбачинское извержение (п-ов Камчатка), позволило четко определить влияние химического состава исход-



ного расплава на характер породы и ее свойства. В процессе извержения образовались базальты из двух магм: магнезиальной (умеренной щелочности, вязкой) и высокоалюминиевой (субщелочной, жидкой), резко различающихся по свойствам. Величина пористости для Южного прорыва составляет 8—64 % ( $n_{\text{ср}} = 42\%$ ), для Северного прорыва — 8—26 % ( $n_{\text{ср}} = 16,6\%$ ). Именно этот показатель оказал определяющее влияние на скорость упругих волн и прочность, которые столь различны для этих двух видов базальтов (табл. 8).

Таблица 8

Физико-механические свойства базальтов

Участки отбора образцов	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Объемная масса, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Скорость продольных волн, км/с	Прочность, МПа	Число определений	Тип лавы
Южный прорыв	2,86	1,67	42	2,8	27	42	Высокоалюминиевые
Северный прорыв	2,94	2,45	16,6	4,1	122	144	Магнезиальные

Увеличение пористости в породе всегда однозначно уменьшает прочность и скорость продольных волн, однако степень влияния на них может быть различной. Кривые зависимости — прочность — скорость — пористость показали, что они имеют криволинейный характер. Графики связи между  $v_p$  и  $n$  более расплывчаты и разнообразны. По-видимому, на  $v_p$  помимо пористости существенно влияют и структурно-минеральные особенности пород. На свойства пород влияет также и сам характер пор — их величина, форма, распределение по породе. Круглые, изометричные поры в меньшей степени влияют на скорость упругих волн и прочность, чем извилистые, уплощенные, неровные. Крупные поры (более 5 мм), особенно когда они немногочисленны, сильно влияют только на величину пористости и прочности, но практически не оказывают воздействия на скорость упругой волны. Сравнительный анализ свойств вулканогенных пород п-ова Камчатки современного и нижне-верхнечетвертичного возраста показал, что в современных лавках, при их кристаллизации и переходе из жидкого состояния в твердое в результате сжатия образуются, помимо крупных трещин остывания, тончайшие микротрещины. Они значительно снижают (до 2—3,5 км/с) скорости упругих волн даже в плотных разностях, но слабо влияют на другие показатели свойств породы — пористость и прочность. Аналогичные данные получены для различных регионов — Курильские острова, п-ов Камчатка, Исландия. Такая микротрещиноватость характерна только для самых молодых, современных лав (голоцен), причем она более интенсивна для

базальтов из высокоглиноземистых, жидких лав. После 15—25 тыс. лет существования эффузивов такая микротрещиноватость исчезает, величина  $v_p$  в породах не опускается ниже 4,0 км/с.

Наиболее легко проследить влияние минерального состава и структуры на свойства породы в свежих, неизмененных разностях. Исследования, проведенные Ф. А. Асинкритовым, З. А. Ацагоряном, Б. П. Беликовым и другими, показали, что присутствие в эффузивах достаточного количества пироксенов и более основных плагиоклазов практически всегда увеличивает объемную массу, плотность, скорость упругих волн и прочность. Аналогичное воздействие должен оказывать и оливин, но это только в том случае, если он не затронут процессами вторичного изменения.

Дальнейшие преобразования породы связаны с явлениями метаморфизма и гидротермальной деятельности, в результате чего начинается процесс разложения первичных минералов, вынос определенных элементов и осаждение их в порах и трещинах. Заполнение пор вторичными минералами — достаточно длительный и сложный процесс, о чем свидетельствует тот факт, что пористые текстуры встречаются даже в девонских породах, прошедших стадии регионального метаморфизма. Изменение пород происходит крайне неравномерно. Лишь самые древние ( $PR_{1-3}$ ) эффузивы практически полностью подверглись изменению, а среди более молодых (Т, D, E) базальтов часто встречаются свежие, мало измененные разности. Наиболее сильным изменениям подвергаются пористые и трещиноватые породы, а массивные плотные разности изменяются крайне слабо. Если в молодых эффузивах главным фактором, определяющим величины  $v_p$  и  $R_c$ , является величина пористости, то в более древних породах главными становятся степень изменения породы и ее трещиноватость.

Насколько сильно может происходить изменение свойств породы под воздействием гидротермальных растворов, можно проследить на примере измененных эффузивов Армении. При воздействии на андезито-базальты и дациты щелочных гидротермальных растворов, при температуре около 300 °С породы постепенно полностью преобразуются в глины, сложенные Na, — монтмориллонитом. Все физико-механические свойства при этом коренным образом изменяются — резко увеличивается пористость с 3 до 39 %, уменьшается скорость упругих волн с 5,5 до 1,5 км/с и прочность с 200 до 2 МПа. Все эти изменения показателей происходят только за счет перехода первичного материала, в первую очередь стекла, во вторичные глинистые минералы — гидрослюды и монтмориллонит.

В пикритовых базальтах Сибирской платформы с большим количеством оливина при его серпентинизации в результате возникновения большого числа микротрещин увеличивается пустотность породы до 9—12 %, уменьшаются  $R_c$  до 20—70 МПа и  $v_p$  до 2,8—4,0 км/с. В порфириновых базальтах девитрификация стекла, сосюритизация плагиоклазов, изменение пироксенов уменьшили  $v_p$  на 2—2,5 км/с и  $R_c$  на 150—200 МПа.

Глубокие преобразования в нижне-среднепротерозойских базальтах, вызванные региональным метаморфизмом, привели к полному замещению первичных минералов вторичными: основные плагиоклазы — альбитом, пироксены — амфиболом и биотитом, стекло — мелкокристаллическим агрегатом кварца, альбита, хлорита, эпидота, актинолита. Поры и трещины выполнены кальцитом и кварцем. Пористость породы очень мала — 0,5—2 %. Несмотря на резкую смену минералов и структуру породы, скорость упругих волн имеют значительную величину до 6 км/с, так же, как и прочность, — 200 МПа, нередко достигая 250 МПа. Таким образом, изменение свойств эффузивов зависит от минерального состава, структуры и текстуры пород. Для молодых (неоген-четвертичных) эффузивов определяющим фактором является величина пористости; для древних — степень вторичных преобразований, которые первоначально уменьшают величины  $n$ ,  $v_p$  и  $R_c$ , а затем в ряде случаев могут повысить значения скорости упругих волн и прочность.

## ГЛАВА 6.

### ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД

#### ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД НА ФОРМИРОВАНИЕ ИХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Формирование физико-механических свойств метаморфических пород обусловлено действием двух параллельно идущих процессов — деформацией зерен или кристаллов исходных пород и перекристаллизацией их. В зависимости от условий, а соответственно, и вида метаморфизма преобладает тот или иной процесс. В результате происходит последовательное и закономерное изменение минерального состава, а также структурно-текстурных особенностей пород, что приводит к столь же закономерному изменению физико-механических свойств пород.

*Общие закономерности изменения минерального состава пород в процессе прогрессивного метаморфизма и их влияние на физико-механические свойства пород*

Характер изменения минерального состава пород в процессе метаморфизма изучался многими исследователями. Большой материал, опубликованный по этому вопросу, позволяет отметить некоторые общие закономерности изменения минерального состава метаморфических пород, обуславливающие формирование их физико-механических свойств.

1. Процесс метаморфизма можно рассматривать как процесс дегидратации пород при переходе от низких ступеней метаморфизма к более высоким, так как наблюдается уменьшение относительного количества водных минералов и общего содержания воды (при этом понимается содержание  $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $H_2O$ ,  $H_3O$ ), которая разрыхляла структуру минерала, делала ее химически менее устойчивой. Содержание такой воды в каолините 13,9 %, в хлорите — 11,4 %, в основном плагиоклазе (анортите) — 2 %; изменение количества этих минералов приводит к тому, что породы фации зеленых сланцев содержат воды до 4 %, а более высокометаморфизованные амфиболовые сланцы — до 2 %, гранулиты — 0,35 %.

Дегидратация в данном случае вносит свой вклад в увеличение плотности пород, прочности, устойчивости к вторичным изменениям.

2. Процесс дегидратации по мере увеличения степени метаморфизма от метаморфических сланцев к гнейсам ведет к перестройке структур минералов от слоистых листоватых к каркасным и связанным с ними ленточным и цепочечным структурам. Это приводит к постепенной смене минералов мягких, непрочных, с высокой анизотропией физико-механических свойств на минералы с более жесткой структурой, более прочные, менее анизотропные, что также находит свое отражение в изменении свойств пород.

3. Увеличение степени метаморфизма ведет к увеличению плотности минералов и соответственно пород в связи с приспособлением вещества к росту давления. Достигается это прежде всего увеличением координационного числа. По мнению Н. В. Соболева, повышение координации при метаморфизме всегда связано со значительным уплотнением и выигрышем в объеме. В качестве примера приводятся обычно кварц и стишовит, имеющие одинаковый состав. Изменение координационного числа  $Si^{4+}$  с 4 (в кварце) до 6 (в стишовите) приводит к увеличению плотности от 2,65 до 4,33 т/м<sup>3</sup>. Приспособление минерала к более высокому давлению происходит не только путем перехода в более плотные формы без изменения химического состава, но и путем разложения неустойчивого минерала на ряд более плотных и устойчивых. Например, альбит, где  $Na^+$  в шестерной координации, а  $Al^{3+}$  в четверной ( $\rho_s = 2,60—2,65$  т/м<sup>3</sup>,  $H = 820$ ), с ростом давления распадается на пироксен жадеит ( $\rho_s = 3,03—3,22$  т/м<sup>3</sup>,  $H = 820—1200$ ), где  $Na^+$  в восьмерной координации, а  $Al^{3+}$  в шестерной, и плотный минерал кремнекислоты коэсит ( $\rho_s = 2,93$  т/м<sup>3</sup>). Чем меньше объем катиона, который меняет свою координацию, тем, по мнению В. В. Жданова, резче меняется плотность. Такие переходы приводят в целом к увеличению плотности породы.

4. По представлениям В. И. Лебедева, увеличение координационного числа ионов сопровождается поглощением и аккумуляцией значительных масс энергии, что обуславливает повышение в процессе метаморфизма внутренней энергии метаморфических пород как систем. В этом, по нашему мнению, одна из основных причин

бóльшей прочности пород высокой степени метаморфизма по сравнению с породами низкой степени метаморфизма.

5. Повышение плотности минералов в процессе метаморфизма приводит к тому, что породы низких ступеней метаморфизма отличаются большой плотностной неоднородностью, так как содержат наряду с рыхлыми и средними по плотности минералами и плотные. Это может быть одним из факторов неоднородности показателей свойств пород. С повышением степени метаморфизма плотностная неоднородность уменьшается.

6. Прогрессивный региональный метаморфизм, по современным представлениям, ведет к повышению основности пород в связи с выносом под влиянием давления и температуры части кремнезема и щелочей из области формирования пород гранулитовой фации вверх, в область формирования гнейсов и сланцев амфиболитовой фации. Это также способствует увеличению плотности минералов (например, плагиоклазов) и соответственно пород, хотя не всегда сопровождается увеличением прочности.

Таким образом, почти все отмеченные выше закономерности изменения минерального состава метаморфических пород по мере увеличения степени их метаморфизма ведут к увеличению плотности пород и должны обусловить увеличение показателей их прочностных и деформационных свойств.

### *Изменение структурно-текстурных особенностей пород в процессе метаморфизма*

Формирование структуры и текстуры метаморфических пород происходит в результате деформации зерен или процессов перекристаллизации, которые приводят к изменению формы и размера зерен, к перераспределению материала. Деформации развиваются под влиянием давления и зависят от длительности его воздействия. Они подразделяются на деформации катакластические и пластические. Катакластические деформации происходят при высоких односторонних давлениях и могут осуществляться путем дробления зерен или кристаллов и перемещения их путем межзернового скольжения. Перемещение продолжается до тех пор, пока зерна или их части не займут устойчивого положения по отношению к максимальным касательным напряжениям, т. е. пока длинные стороны кристаллов или направления наиболее легкого дробления в них не установятся параллельно плоскостям скольжения. Катакластические деформации, характерные для верхних зон метаморфизма, приводят к образованию катакластических структур и резко снижают показатели прочностных и деформационных свойств пород.

Пластические деформации происходят при высоком гидростатическом давлении, развиваются вследствие внутризернового скольжения и вызывают искажения в кристаллической решетке. При пластических деформациях происходит переориентировка минералов так, что сетки кристалла с максимальной ретикулярной

плотностью атомов устанавливаются параллельно плоскостям максимальных касательных напряжений, т. е. направления наиболее слабых связей в кристалле устанавливаются перпендикулярно к направлениям действия касательных напряжений. Ориентируются не только пластинчатые минералы, но и изометричные, что можно наблюдать микроскопически по близкой ориентировке их оптических осей. Усиление деформации приводит к увеличению однородности оптической ориентировки минералов одного состава. Все это вызывает развитие сланцеватых текстур, что во всех случаях обуславливает анизотропию физико-механических свойств.

Ориентировка кристаллов в метаморфических породах меняется также под влиянием процессов перекристаллизации, связанной с анизотропией давления, действующего на породу в различных направлениях, в результате чего грани кристаллов, находящиеся под сдавливанием, растворяются, а затем тот же материал кристаллизуется на гранях, находящихся под меньшим давлением (принцип Рикке). В результате кристаллы приобретают вытянутость в направлении меньшего давления, в породе появляются направленные гранобластовые структуры и текстуры, также вызывающие анизотропию физико-механических свойств пород.

В процессе метаморфизма в породе наблюдаются структурные изменения иного рода. При прогрессивном метаморфизме для порообразующих минералов метаморфических пород характерно уменьшение содержания в кристаллической решетке объемных структурных дефектов в виде включений второй фазы. Н. А. Елисеевым отмечалось очищение крупных кристаллов по мере увеличения интенсивности кристаллизации от мелких включений, распределенных ранее по всему минералу. Эти включения перемещаются к краю зерна и могут сконцентрироваться в промежутках между зернами. Значительно реже наблюдаются в минералах метаморфических пород, по сравнению с магматическими, и другие объемные дефекты — такие, как двойники, зональное строение, в плагиоклазах обычно отсутствует пертитовая структура, двойники. По нашим данным, уменьшение в кристаллах такого рода дефектов значительно увеличивает его прочность, снижает хрупкость и тем самым повышает трещиностойкость [20]. Широкое развитие пластических деформаций приводит к накоплению вакансий и дислокаций в кристаллах. Как известно, увеличение до некоторого предела содержания этого типа дефектов снижает прочность кристаллов, но затем может вести к их упрочнению, так как тормозится движение дислокаций.

В процессе метаморфизма, по-видимому, претерпевает изменения характер контакта между зернами. При повышении только давления происходит сближение зерен за счет уменьшения промежутков между ними (ультрапор, ультратрещин и т. д.), начинают проявляться более короткодействующие силы связи между зернами. Дальнейший рост давления обуславливает более интенсивное развитие процессов самодиффузии, сначала на неровностях и выступах границ кристаллов, где концентрируется максимум напря-

жений, а затем по всему контакту. Рост температуры активизирует этот процесс. Междуузельные атомы с повышением температуры могут мигрировать путем обмена с узловыми атомами, перескоком на вакантные места или по междуузлиям к поверхности кристалла, надстраивая ее. Таким образом нивелируются неровности и постепенно заполняются все промежутки между зернами. Такая взаимная диффузия атомов двух соседствующих кристаллов производит как бы их диффузионную сварку. «Сварной шов» или контакт, по видимому, представляет собой сложную систему различного строения в зависимости от степени родства соседствующих минералов. Соседствующие минералы с родственными решетками, способные образовывать твердые растворы, возможно, имеют зону контакта также в виде твердого раствора, при этом она постепенно переходит в соседствующие кристаллы, создавая, очевидно, минимум неоднородности и максимум прочности. Такой контакт может быть между плагиоклазами, пироксенами, амфиболами. При соседстве взаимно нерастворяющихся кристаллов характер контакта должен быть несколько иным. По мнению Д. Д. Саратовкина, при соответствующей температуре на границе кристаллов с решетками различного строения и состава может возникнуть контактное плавление. Обусловлено оно тем, что поверхностный слой таких кристаллов, соприкасающийся с чужеродными атомами соседнего кристалла, оказывается на некоторую глубину искаженным и плавится при более низких температурах, чем сам кристалл. Поверхность обоих кристаллов оплавляется, и на контакте образуются два тонких слоя двух жидкостей, которые взаимно перемешиваются с образованием жидкого эвтектического слоя. Эта жидкость растекается по поверхности кристалла, залечивая неровности и трещины, застывает при понижении температуры в виде кристаллов или аморфной стекловатой массы.

#### **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД**

В процессе регионального метаморфизма формируются метаморфические фации, объединяющие породы с одинаковыми минеральными ассоциациями, устойчивыми в определенных термодинамических условиях, характерных для данной ступени метаморфизма. Эти условия и определяют формирование физико-механических свойств пород через минеральный состав и структурно-текстурные особенности, характерные для пород каждой фации и изменяющиеся с увеличением степени метаморфизма. По схеме Эскола, самой низкой ступени метаморфизма отвечает фация зеленых сланцев, для которой равновесной ассоциацией являются хлорит и серицит. С нарастанием степени метаморфизма эта ассоциация становится неустойчивой, что приводит к образованию биотита. Таким образом, характерные минералы фации зеленых сланцев — гидроксилсодержащие силикаты и алюмосиликаты с листоватыми структурами, непрочные, с низкой твердостью. Прочные минералы

исходных пород, такие, как калиевые полевые шпаты, плагиоклазы, попадая в верхнюю зону метаморфизма, становятся неустойчивыми. Калиевый полевой шпат замещается серицитом или мусковитом, плагиоклаз теряет свою анортитовую составляющую, которая переходит в сосюрит (минералы цоизит — эпидотовой группы), остается альбит. Относительно устойчивым минералом здесь является кварц, который легко растворяется и переотлагается даже в условиях этой фации метаморфизма. Широко развит кальцит.

Характер сочетания минералов определяет и преобладающие типы пород в пределах фации зеленых сланцев, которые последовательно сменяют друг друга по мере увеличения степени метаморфизма: серицито-хлоритовые сланцы — филлиты — слюдяные сланцы. Характер минералов обуславливает преобладание лепидогранобластовых структур (пластинчатых или чешуйчатых). В результате преобладания одностороннего давления возникают четко выраженные сланцеватые текстуры (плоскопараллельные, плейчатые, зигзаговые), которые подчеркиваются расположением чешуек серицита или листочков биотита по плоскостям сланцеватости. Это вызывает четкую анизотропию физико-механических свойств и неустойчивость их к физическому выветриванию.

Физико-механические свойства пород фации зеленых сланцев различных районов (Становая складчатая область, Балтийский щит, долина Верхнего Амура) обусловлены количественным соотношением характерных непрочных минералов — хлорита, серицита, биотита и таких прочных, как кварц и альбит. В целом породы фации зеленых сланцев отличаются наиболее низкими показателями физико-механических свойств по сравнению со всеми другими более высокометаморфизованными породами. Для них характерны плотность 2,73—2,84 т/м<sup>3</sup>, скорости распространения упругих волн в направлении параллельном сланцеватости 5,7 км/с, перпендикулярно к сланцеватости 3,5 км/с. Прочность на одноосное сжатие, как правило, не превышает 100 МПа, причем преобладающие значения изменяются в пределах 45—80 МПа. Увеличение содержания кварца и альбита до 50 % и более может увеличить прочность кварцево-сланцевых сланцев до 120 МПа. Динамический модуль упругости составляет  $2 \div 2,5 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона около 0,20. Характерной особенностью пород фации зеленых сланцев является резко выраженная анизотропия физико-механических свойств, обусловленная сланцеватой текстурой. Коэффициенты анизотропии прочности равны 0,58, а по скоростям упругих волн изменяются от 0,57 до 0,79.

С повышением давления и температуры растет интенсивность метаморфизма, что приводит к смене пород фации зеленых сланцев породами фации эпидотовых амфиболитов. Эпидот появляется уже в высокотемпературных породах фации зеленых сланцев, где он образуется из кварца за счет кальцита, хлорита и кремнезема. Эта реакция сопровождается образованием амфибола (актинолита) и выделением воды. Эпидот может образовываться и при наличии мусковита. В условиях рассматриваемой фации метамор-



Таблица 9

## Физико-механические свойства метаморфических пород

Породы	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Объемная масса, т/м <sup>3</sup>	Порис- тость, %	Скорости распространения упругих волн, км/с		
				по слоистости	перпенди- кулярно к слоистости	
Зеленые сланцы	Хлорит-серицит- товый сланец	—	2,72	0,48	—	—
	Кварц-хлорит- -биотитовый сланец	2,83	2,79	2,0	5,95	3,50
Кристаллические сланцы	Кварц-мускови- товый	2,73—2,84	2,68—2,80	0,5—2,1	4,80—5,80	2,75—5,1
		2,79	2,75	1,8	5,30	4,20
	Гранат-эпидот- биотитовый	2,99	2,94	1,7	—	4,83
		—	2,70—2,84	1,2—4,2	—	2,5—3,2
	2,76		2,4	—	2,65	
	(31)		(27)	—	(30)	
	Биотит-амфибо- ловый и амфи- боловый	—	2,93—3,0	0,1—3,0	4,9—5,0	2,60—3,30
			2,95	0,8	5,0	3,0
	—	2,80	2,66—2,86	0,4—4,2	4,5—5,7	4,1—5,2
			2,79	1,5	5,0	4,7
(28)			(28)	—	—	
Биотит-амфибо- ловый мигмати- тизированный	2,87	2,70—2,82	1,7—5,0	5,30—6,0	4,50—5,35	
		2,78	3,3	5,70	4,80	
—	—	2,70	—	—	—	
		(13)	(13)	—	—	
Гнейсы	Биотитовый	—	2,59—2,73	0,5—5,5	—	2,50—3,56
		—	2,66	2,5	—	3,00
	—	—	2,75—2,92	1,06—6,0	3,25—5,20	—
			2,81	3,5	4,0	—
	—	—	2,75	—	—	—
			2,62—2,75	0,2—3,5	—	2,90—3,50
			2,69	1,8	—	3,25
—	—	(80)	(80)	—	(43)	

Прочность на одноосное сжатие, МПа		Коэффициент анизотропии		Коэффициент Пуассона $\mu$	Динамический модуль упругости, $E_d \cdot 10^4$ МПа
по слоистости	перпендикулярно к слоистости	по скорости распространения упругих волн	по прочности		
—	45—90	—	—	0,20	2,4
—	80	—	—	—	—
—	50	0,59	0,58	—	—
—	45—100	0,57—0,89	—	—	—
—	70	0,79	—	—	—
—	82—158	—	—	—	5,1
—	125	—	—	—	—
—	100—160	0,65—0,96	0,53—0,86	0,10—0,30	—
—	140	0,87	0,61	0,20	—
—	(12)	(30)	—	—	—
115—125	115—180	0,65—0,81	0,69—1,00	—	—
120	145	0,72	0,82	—	—
(2)	(5)	(15)	—	—	—
115—185	78—162	0,91—0,95	0,83	0,18—0,32	3,9—7,0
155	128	0,94	—	0,24	5,4
85	89—150	0,42—0,78	—	0,22—0,29	4,5—8,5
—	126	0,64	—	0,26	5,9
135—155	120—170	—	0,89—0,91	0,09—0,29	1,6—3,4
145	130	—	0,90	0,20	2,5
(4)	(30)	—	—	(44)	(40)
90—130	130—150	—	—	—	—
110	140	—	—	—	—
(3)	(5)	—	—	—	—
135—210	120—210	0,74	0,89—1,00	0,24—0,29	4,2—5,9
165	150	—	0,91	0,27	5,0
(11)	(30)	—	—	—	(60)

Породы	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Объемная масса, т/м <sup>3</sup>	Порис- тость, % <sub>1</sub>	Скорости распространения упругих волн, км/с	
				по слоистости	перпенди- кулярно к слоистости
Гнейсы	Двупироксено- вый	2,69—2,74	2,0—3,0	—	4,8—5,4
		2,72 (4)	2,5		5,1 (4)
	Гранат-биотито- вый диафториро- ванный	2,68—2,90	2,8—5,8	—	2,5—4,5
		2,75 (10)	4,0		3,3

Примечание. В числителе даны предельные значения; в знаменателе — средние, в ско

физма эти реакции широко развиты и приводят к увеличению содержания амфибола. Кроме того, за счет хлорита и кремнезема образуется гранат — альмандин. В пределах этой фации метаморфизма образуется анортит, который вступает в изоморфные смеси с альбитом, в результате появляются плагиоклазы (олигоклаз), отсутствовавшие в породах фации зеленых сланцев.

Рассмотренные новообразования сопровождаются дегидратацией, ростом координации атомов, и это приводит к тому, что все минералы, характерные для фации эпидотовых амфиболитов (эпидот, альмандин, амфиболы) отличаются большей прочностью и плотностью, чем рассмотренные ранее минералы фации зеленых сланцев. Появление граната и эпидота приводит к повышению прочностных и деформационных показателей пород этой фации метаморфизма (табл. 9). Например, гранат-эпидот-биотитовые сланцы архейского возраста Становой складчатой области характеризуются более высокими значениями плотности, скоростей распространения упругих волн, прочности на одноосное сжатие до 125 МПа (с колебаниями значений от 80 до 160 МПа), динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Фации высоких ступеней метаморфизма — амфиболовая и гранулитовая характеризуются образованием кристаллических сланцев, гнейсов и гранулитов. Амфиболовая фация метаморфизма включает гнейсы (биотитовые амфибол-гранат-биотитовые) и сланцы (слюдяно-гранатовые, биотит-амфиболовые, амфиболовые). Основные минеральные ассоциации: роговая обманка, плагиоклаз (андезин), альмандин, эпидот, присутствуют кварц и биотит, содержание последнего значительно уменьшается. Повышается основность плагиоклазов. Преобладание плотных, высокопрочных минералов, дальнейшее уменьшение количества слабопрочных приводит к значительному увеличению показателей прочностных и

Прочность на одноосное сжатие, МПа		Коэффициент анизотропии		Коэффициент Пуассона $\mu$	Динамический модуль упругости, $E_d \cdot 10^4$ МПа
по слоистости	перпендикулярно к слоистости	по скорости распространения упругих волн	по прочности		
—	180	—	—	0,23—0,32	6,2—7,1
				0,26	6,6
				(4)	(4)
—	80—105	0,74	—	—	—
	90				

бках — число определений.

деформационных свойств кристаллических сланцев, прочность которых колеблется от 130 до 170 МПа. Еще более высокой прочностью отличаются гнейсы (см. табл. 9). Для них характерна меньшая анизотропия свойств.

При переходе от амфиболовой фации метаморфизма к гранулитовой в составе пород и соответственно в их свойствах происходят еще более значительные изменения. Здесь почти полностью исчезают, как неустойчивые в новых термодинамических условиях, слюды. Роговая обманка присутствует лишь в низкотемпературной части этой фации, а затем распадается при повышении температуры в результате процессов дегидратации, образуя вместе с кварцем анортит и пироксен. Таким образом, появляются еще более плотные минералы. Плаггиоклазы обогащаются анортитовой составляющей, поэтому для этой фации характерны уже лабрадор и более основные плаггиоклазы.

В результате отмеченных процессов породы гранулитовой фации (кварц-полевошпатовые гнейсы, анортозиты, чарнокиты) содержат вместо слюд кианит или силлиманит и гранат, вместо амфиболов — пироксены: диопсид и гиперстен. Увеличение содержания более прочных минералов приводит к еще большему увеличению показателей прочностных и деформационных свойств. Прочность двупироксеновых гнейсов возрастает до 180 МПа (см. табл. 9), кварц-полевошпатовых гнейсов — до 240 МПа.

Для чарнокитов о-ва Цейлон Б. П. Беликовым и другими приводятся значения объемной массы, равные  $2,95 \text{ т/м}^3$ , скорости распространения упругих волн  $6,10 \text{ км/с}$ , динамический модуль упругости  $8,27 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ .

Таким образом, в процессе регионального метаморфизма неуклонно изменяются физико-механические свойства пород как кристаллических сланцев, так и гнейсов (рис. 13) в сторону увеличения

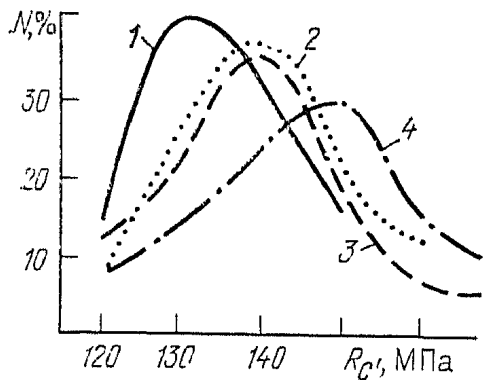


РИС. 13. График распределения значений прочности на одноосное сжатие гнейсов с увеличением степени их метаморфизма.

1 — биотитовые ( $n=27$ ); 2 — эпидот-амфиболовые ( $n=11$ ); 3 — эпидот-биотитовые ( $n=17$ ); 4 — амфиболовые ( $n=21$ );  $N$  — частота встречаемости значений показателя прочности;  $n$  — число определений

их плотности, прочности и модуля упругости. Прочность возрастает для кристаллических сланцев от 100 до 150 МПа, для гнейсов от 120 до 180 и 200 МПа, упругие модули от  $2,5 \cdot 10^4$  до  $6,6 \cdot 10^4$  МПа. Для кристаллических сланцев характерна высокая анизотропия прочности (0,61—0,82), уменьшающаяся с увеличением степени метаморфизма; причем прочность на одноосное сжатие больше при приложении нагрузки перпендикулярно к направлению слоистости. Гнейсы отличаются меньшей анизотропией физико-механических свойств. Коэффициент анизотропии по прочности не снижается более 0,90, причем анизотропия имеет обратный характер — прочность на одноосное сжатие больше при приложении нагрузки параллельно слоистости (см. табл. 9).

Завершением регионального метаморфизма являются породы эклогитовой фации метаморфизма, с которыми в инженерно-геологической практике редко приходится иметь дело, но они представляют интерес с точки зрения путей дальнейшей эволюции состава и свойств пород в процессе метаморфизма. Эклогиты не содержат полевых шпатов, которые неустойчивы в термодинамических условиях этой фации; альбитовая частица входит в состав пироксена, анортитовая — в состав граната, амфибол переходит в пироксен. В результате эклогиты состоят из двух минералов (пироксена и граната), полностью отсутствуют полевые шпаты и амфиболы. Плотность пород резко возрастает до 3,4 и даже 3,6 т/м<sup>3</sup>, пористость уменьшается до 0,45 %. Верхнепротерозойские эклогиты Полярного Урала характеризуются скоростями упругих волн 7,78—7,86 км/с, динамический модуль упругости равен  $18,48 \cdot 10^4$  МПа.

Контактовый метаморфизм происходит на контактах интрузивных пород с вмещающими, осуществляется на меньших глубинах, чем региональный, и при более низких давлениях. Основные изменения приурочены к экзоконтакту, мощность которого зависит от размера интрузии, ее основности и состава вмещающих пород. Контактовый метаморфизм сопровождается интенсивной перекристаллизацией. Полная перекристаллизация приводит к исчезновению реликтовых структур и текстур, приводит к образованию обычно массивной текстуры и гранобластической (роговиковой) структуры.

Минеральные новообразования позволяют выделить фации контактового метаморфизма по мере приближения к поверхности ин-

трузии: альбит-эпидотовые роговики, роговообманковые роговики и санидиниты. По минеральным ассоциациям они перекликаются с фациями регионального метаморфизма, но роговики характеризуются резким увеличением показателей прочностных и деформационных свойств. Обуславливает это не столько состав, сколько структура пород — мелкозернистая, достаточно однородная, часто с зазубренными границами зерен. По данным Г. В. Тохгуева, прочность роговиков колеблется от 175 до 400 МПа.

В приконтактной зоне карбонатных пород (известняки и доломиты) с гранитоидами образуются мраморы — полнокристаллические породы от мелко- до крупнозернистых с гранобластовой структурой, состоящие преимущественно из хорошо раскристаллизованного кальцита. Прочность их в среднем изменяется в пределах 80—100 МПа и примерно равна средней прочности на одноосное сжатие кальцита, динамический модуль упругости равен  $6,2 \cdot 10^{-4}$  МПа. С увеличением степени раскристаллизованности (увеличением размера зерен) прочность мраморов ослабляется, прежде всего из-за уменьшения прочности контакта между зернами. Воздействие на мрамора катаклаза, приводящего к их брекчированию, снижает прочность до 55 МПа.

Таким образом, увеличение интенсивности метаморфизации пород в процессе прогрессивного метаморфизма ведет, как правило, к их уплотнению и упрочнению. При воздействии регрессивного метаморфизма наблюдается обратная картина. Регрессивный метаморфизм (диафторез) заключается в том, что существовавшие в породе минеральные ассоциации оказываются неустойчивыми в условиях более низкого давления и температуры. При регрессивном метаморфизме неустойчивые минералы замещаются устойчивыми. При этом как бы наблюдается обратный ход процессов метаморфизма: роговая обманка замещается смесью хлорита и эпидота, гранат — биотитом, хлоритом, серицитом, основной плагиоклаз — альбитом, цоизитом и т. д. Этим процессам способствуют химически активные растворы, которые циркулируют по тектоническим нарушениям, поэтому диафториты чаще всего приурочены к зонам глубинных разломов.

Обратный ход минералообразования при регрессивном метаморфизме значительно ухудшает прочностные и деформационные свойства пород. Так например, метаморфические породы Становой области, сформировавшиеся в условиях амфиболовой фации метаморфизма, претерпели диафторез в условиях зеленосланцевой фации. Это привело к серицитизации плагиоклазов, к пелитизации калиевых полевых шпатов, к появлению новообразований хлорита, к биотитизации и хлоритизации амфиболов.

По мере увеличения степени диафтореза прочность пород падает. Эпидот-биотит-амфибол-плагиоклазовые кристаллические сланцы позднеархейского возраста, слабо затронутые процессами диафтореза, имеют прочность 170 МПа. В результате серицитизации плагиоклаза, появления новообразований хлорита прочность снизилась на 29 % — до 120 МПа. Для тех же разностей, где про-

цессы диафтореза получили еще более широкое развитие, выразившееся в биотитизации и хлоритизации амфиболов, прочность упала на 68 % — до 55 МПа. Наложение на процессы диафтореза процессов мигматизации и окварцевания увеличило прочность кристаллических сланцев до 150 МПа.

Диафторез в условиях зеленосланцевой фации приводит к полному исчезновению пироксенов и роговой обманки и к увеличению содержания хлорита, актинолита, карбонатов, эпидота. Регрессивный метаморфизм пород гранулитовой фации в условиях амфиболовой фации выражается в амфиболитизации пироксенов, что также ухудшает физико-механические свойства пород. Часто процессы диафтореза сопровождаются дроблением и катаклизмом, что еще больше снижает их прочностные и деформационные показатели.

### **ИЗМЕНЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Физико-механические свойства пород, образовавшихся в результате магматических или метаморфических процессов, не остаются неизменными в течение всей жизни породы. Заметное влияние на них оказывают метасоматические процессы. Метасоматические изменения пород, обусловленные действием гидротермальных растворов магматического происхождения или остаточных постмагматических, могут происходить при контактовом и региональном метаморфизме, при аутометаморфизме. Метасоматические изменения изверженных пород начинаются во время кристаллизации и продолжают после нее при более низкой температуре.

Если нарушается равновесие состава остаточного газового постмагматического раствора с породой, которую он как бы пропитывает, то он начинает растворять магматические минералы, замещая их вторичными. При этом возникают различные структуры замещения, которые могут существенно изменить свойства пород. В полевых шпатах возникают пертитовые структуры, которые в зависимости от масштаба развития пертитов могут как повышать, так и понижать прочность минералов. Пегматитовая структура, обусловленная закономерными срастаниями калиевого полевого шпата с кварцем, обычно повышает прочность пород. Мирмекитовая структура приводит как бы к прошиванию контакта плагиоклаза и калиевого полевого шпата червеобразными вростками кварца, что повышает прочность контакта и породы в целом, а также устойчивость ее к физическому выветриванию. В результате метасоматических процессов образуются реакционные каймы вокруг кристаллов, влияние которых на свойства слабо изучено.

К структурным изменениям относится и эволюция пористости и плотности пород при метасоматозе, которая может вести как в сторону увеличения пористости, так и в сторону ее уменьшения.

Пористость не изменяется, когда образование вторичных минералов происходит в результате одновременного молекулярного процесса растворения и замещения составляющих первичных минералов, т. е. когда один ион удаляется из решетки и на его месте располагается другой. В тех случаях, когда отложение вторичных минералов идет в порах, трещинах, происходит их залечивание, что повышает плотность и монолитность пород и соответственно прочность. Легче всего залечиваются мелкие поры и трещины, где сближены фазовые поверхности, в результате здесь легче адсорбируются ионы и формируются новообразования. Пористость возрастает при условии, если выносятся больше компонентов, чем их приносится. Например, при карбонатизации плагиоклазов пористость может уменьшаться, если кальцит образуется за счет принесенного  $Ca^{2+}$  и, наоборот, увеличится, если  $Ca^{2+}$  выносятся из анортитовой составляющей плагиоклаза.

Значительно изменяет свойства исходных пород такая разновидность метасоматоза, как скарнирование, которое происходит обычно на контакте силикатных (гранитоидных) и карбонатных пород (известняков, мраморов) под воздействием постмагматических растворов, которые обуславливают диффузию  $Ca^{2+}$  в силикатную породу (полевошпатовую), а кремнезем и отчасти глинозем диффундируют в известняк. В результате вкост контакта известняка с гранитоидами образуются реакционные зоны с резкими границами раздела и постепенными изменениями химического состава пород внутри зоны. По направлению от гранитоидов к известнякам возрастает основность плагиоклаза, а пироксен обогащается глиноземом. Из табл. 10 видно, что скарновые породы об-

Таблица 10

Физико-механические свойства скарновых пород. По данным И. П. Тимченко

Порода	Число образцов	Объемная масса, т/м <sup>3</sup>	Общая пористость, %	Предел прочности, МПа		Модуль Юнга, 10 <sup>6</sup> МПа	Коэффициент Пуассона
				при сжатии	при растяжении		
Скарны							
Волластонит-пироксеновые	9—18	3,19	2,00	282	21	14,06	0,20
Пироксен-гранатовые	12—18	3,19	4,02	210	34	11,45	0,16
Родонитовые	12	3,11	3,41	299	19	13,27	0,24
Геденбергитовые	5—9	3,28	1,90	171	22	8,90	0,24
Эпидозиты	12—21	3,06	3,03	188	8	11,40	0,27
Среднее	—	3,15	3,04	235	21	11,82	0,22
Исходные породы							
Известняки PZ <sub>2</sub>	80—130	2,68	1,47	124	9	5,91	0,26
Гранитоиды (гранодиорит-порфиры) PZ <sub>3</sub>	12—18	2,82	1,34	214	17	8,00	0,26



ладают повышенной пористостью (3 %) по сравнению с исходными породами и значительно более высокой прочностью (235 МПа), высокими значениями модуля упругости ( $11 \cdot 10^4$  МПа). С. Е. Могилевский отмечено, что мраморизованные известняки с массивной текстурой, мелко- и среднезернистой структурой и прочностью 53 МПа в результате скарнирования увеличили свою прочность до 150 МПа. Плагиоклазовые порфиристы, имеющие брекчиевидную структуру, характеризовались прочностью 75—90 МПа; после ороговикования она возросла вдвое (до 170 МПа), а после скарнирования в 3 раза (до 250 МПа). Ею же приводится прочность пироксеновых скарнов, равная 290—490 МПа. Таким образом, скарнирование приводит к повышению прочностных и деформационных свойств исходных пород, залечивает следы катаклаза и других деформаций.

К увеличению прочностных и деформационных свойств пород практически всегда приводят такие вторичные процессы, как альбитизация, ороговикование, окварцевание.

Процессы альбитизации могут развиваться в широких масштабах. Для кислых пород они выражаются в замещении альбитом калиевых полевых шпатов, что, как правило, приводит к увеличению прочности пород, если не накапливаются непрочные новообразованные минералы в виде биотита, кальцита и т. д. Изменение физико-механических свойств гранитоидов при натриевометасоматическом преобразовании их, ведущем к альбитизации, исследовались Р. В. Голевой, которая показала, что в результате этого процесса резко изменяются упругие свойства гранитов, возрастают модуль Юнга и коэффициент Пуассона, повышается пористость под действием процессов выщелачивания. Прочность увеличивается в промежуточной зоне (микроклин-плагиоклаз-хлорит-эпидотовая) и особенно во внешней зоне (кварц-микроклин-плагиоклаз-хлорит-мусковитовая) соответственно на 10 и 25 %. Альбитизация основных пород выражается в развитии альбита по основным плагиоклазам, что часто сопровождается превращением пироксена в агрегат зерен амфибола и чешуек серицита. Особенно улучшаются физико-механические свойства в результате альбитизации у гнейсов, при этом уменьшается анизотропия их физико-механических свойств.

Таким образом, формирование физико-механических свойств метаморфических пород идет в сторону их уплотнения и упрочнения по мере увеличения интенсивности процессов прогрессивного регионального метаморфизма. Регрессивный метаморфизм приводит к уменьшению плотности пород, к снижению показателей прочностных и деформационных свойств. Породы упрочняются в результате действия процессов окварцевания, ороговикования, альбитизации, эпидотизации, скарнирования. Снижается прочность в результате дробления и катаклаза пород, процессов серицитизации, хлоритизации.

## ГЛАВА 7.

### **ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ЛИТОГЕНЕЗА**

Литогенез — сложный геологический процесс формирования осадочных пород. Н. М. Страхов включает в него две стадии — седиментогенеза и диагенеза, и считает, что формирование осадочных пород завершается диагенезом осадка, за которым наступает фаза вторичных преобразований. Однако поскольку изменения в составе, строении и свойствах пород на стадии катагенеза не лишают пород облика и особенностей осадочных образований, мы включаем в литогенез и стадию катагенеза.

Стадии литогенеза характеризуются совокупностью физических, химических и биологических процессов (Л. В. Пустовалов, Н. М. Страхов, Л. Б. Рухин). Это приводит к тому, что на каждой стадии литогенеза осадочные породы приобретают определенные, характерные только для этой стадии, инженерно-геологические особенности. Выявление закономерностей формирования этих особенностей осадочных пород в процессе литогенеза — важная задача инженерной геологии.

В процессе седиментации осадков в морских или озерных бассейнах возникает неуплотненный водонасыщенный материал, превращение которого в породу происходит на последующих стадиях. Тем не менее значение седиментогенеза для формирования инженерно-геологических особенностей осадочных пород огромно. Именно эта стадия является определяющей в формировании состава, строения и мощности отложений, т. е. тех признаков, которые ложатся в основу выделения формаций и геолого-генетических комплексов осадочных пород. Кроме того, эта стадия определяет совокупность и интенсивность процессов, которые протекают в отложениях на последующих стадиях. Влияние различных факторов на особенности седиментации осадков рассматривается в гл. 2, 3, 20.

Под диагенезом, согласно работам Л. В. Пустовалова, Н. М. Страхова, Л. Б. Рухина, понимаются «процессы физико-химического урегулирования сложной и многокомпонентной системы веществ за счет внутренних ресурсов самой системы, в тех же термодинамических условиях, в каких создан осадок» (Н. М. Страхов). В настоящей главе рассматривается механизм процессов, происходящих в осадках на стадии диагенеза и формирующих их как осадочные породы, критерии выделения этой стадии и инженерно-геологические особенности пород, проходящих стадию диагенеза.

Сформированная осадочная порода, оказавшись в результате погружения земной коры на значительных глубинах, испытывает влияние возрастающих давления и температуры, что приводит к новым преобразованиям породы: ее состава, структуры, текстуры, а следовательно, и ее инженерно-геологических свойств. Совокуп-

ность этих преобразований принято называть катагенезом. Многие вопросы, связанные с формированием особенностей пород зоны катагенеза, до настоящего времени недостаточно изучены. Спорными остаются вопросы, связанные с определением граничных термодинамических условий, критериев выделения зоны катагенеза.

В ходе формирования осадочных пород не всегда наблюдается последовательная смена одной стадии литогенеза другой. В результате движения земной коры любая из перечисленных выше стадий литогенеза может быть прервана, и породы оказываются либо на поверхности, в зоне гипергенеза, и подвергаются влиянию агентов выветривания, образуя кору выветривания; либо из зоны позднего катагенеза попадают в зону раннего катагенеза; либо не пройдя целиком стадию диагенеза, оказываются на значительных глубинах под влиянием высоких давлений и температур. Все это оказывает большое влияние на формирование инженерно-геологических особенностей осадочных пород.

Формирование континентальных осадочных пород имеет свои особенности, которые определяются спецификой стадий седиментации и диагенеза. Если особенности континентальных осадков, которые приобретаются ими на стадии седиментогенеза, достаточно хорошо изучены и освещены в геологической литературе, то вопросы, связанные с диагенезом континентальных осадков, до сих пор чрезвычайно слабо разработаны.

Закономерности формирования инженерно-геологических особенностей осадочных пород в процессе литогенеза рассматриваются в основном на примере глинистых отложений. Это связано с тем, что среди осадочных пород глинистые породы являются наиболее распространенными (более 70 % осадочных образований) и наиболее изменяющимися в процессе литогенеза.

### **ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТИ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД НА СТАДИИ ДИАГЕНЕЗА**

*Особенности формирования инженерно-геологических свойств глинистых пород \**

Результаты исследований отложений конечных водоемов стока позволили выяснить закономерности формирования инженерно-геологических свойств глинистых осадков на стадии диагенеза. Постседиментационные изменения глинистых отложений выражаются в четких закономерно направленных изменениях плотности, влажности, прочности и деформируемости осадков. Закономерно снижается их пористость, повышается уплотненность, осадки последовательно переходят из скрытотекучего неуплотненного состояния

---

\* Раздел написан И. Г. Коробановой.

в мягкопластичное. А когда они теряют свободную и осмотическую воду (естественная влажность становится близка к величине максимальной молекулярной влагоемкости), осадки приобретают полутвердую консистенцию, достаточно высокий предел прочности (до единиц мегапаскалей), упругость.

Завершением стадии диагенеза предлагается считать такую степень дегидратированности и уплотненности осадков, когда они теряют свободную и слабосвязанную осмотическую воду, что соответствует переходу к новому их качественному состоянию, т. е. изменению характера структурных связей, резкому нарастанию прочности и упругости.

Именно на этом рубеже осуществляется основной качественный скачок в преобразовании физико-механических свойств осадков, когда количественные изменения в содержании в них воды (при нарастании степени дегидратированности и уплотненности) приводят к качественным изменениям видов воды в осадках, их физического состояния, прочностных и деформационных свойств. На этом рубеже молекулярные межчастичные связи коагуляционного характера сменяются атомными конденсационными, что сопровождается резким возрастанием прочности и возникновением упругих свойств в глинистых осадках.

Второй рубеж в преобразовании физико-механических свойств осадков мы предлагаем считать границей, разделяющей этапы раннего и позднего диагенеза. Этот рубеж соответствует более мелкому качественному скачку в преобразовании свойств осадков, когда осуществляется их переход из неуплотненного скрытотекучего состояния в мягкопластичное малоуплотненное с возрастанием прочности от ничтожно малых величин, близких к нулю, до величин, достигающих десятых долей мегапаскалей.

Инженерно-геологический анализ стадии диагенеза позволил охарактеризовать его этапы, соответствующие двум подзонам литификации (табл. 11).

Этап раннего диагенеза (I подзона литификации). В пределах этой подзоны осадки характеризуются предельно слабой степенью уплотнения и литификации, высокой гидратированностью, рыхлостью структуры, слабым межчастичным сцеплением коагуляционного характера, повышенной сжимаемостью, склонностью к разжижению и текучести при весьма малых напряжениях, близких к 0. Естественная влажность осадков этой зоны превышает границу текучести, показатель уплотненности  $\leq 0$ , показатель консистенции  $\geq 1$ , пластическая прочность выражается тысячными или сотыми долями мегапаскалей. В пределах этой подзоны наиболее интенсивно протекают процессы дегидратации и уплотнения осадков. У нижней ее границы величина естественной влажности становится несколько ниже влажности на границе текучести. В процессе дегидратации и уплотнения отжимается большое количество свободной воды, что приводит к изменению состояния осадков от скрытотекучего (неуплотненного) к мягкопластичному (в начальной стадии уплотнения) и к усилению коагуляционных межчастич-

## Показатели физико-механических свойств глинистых и постглинистых отложений Каспийского бассейна района Аляты-море

Зона литификации	Подзоны литификации	Интервал глубин, м	Содержание глинистой фракции, %	Влажность, %		Максимальная молекулярная влагоемкость, %	Пористость, %	Показатель	
				гиперглистическая	естественная			уплотненности	консистенции
Диагенез	I раннего	от 0 до 7-8	$\frac{48-69}{57}$	$\frac{2-3}{2,5}$	$\frac{66-26}{48}$	$\frac{14-18}{16}$	$\frac{65-43}{54}$	$\frac{(-1,13)-(-0,49)}{0,64}$	$\frac{2,10-0,45}{1,25}$
	II позднего	от 7-8 до 70-90	$\frac{36-66}{54}$	$\frac{2-5,5}{3,7}$	$\frac{32-21}{29}$	$\frac{13-18}{16}$	$\frac{48-38}{44}$	$\frac{0,41-0,77}{0,59}$	$\frac{0,55-0,27}{0,38}$
	III переходного	от 70-90 до 550-600	$\frac{53-80}{67}$	$\frac{2-5,5}{3,7}$	$\frac{26-17}{22}$	$\frac{16-21}{19}$	$\frac{43-35}{39}$	$\frac{0,77-1,17}{1,00}$	$\frac{(+0,13)-(-0,14)}{(-0,03)}$
Зоны литификации	Пластическая прочность, МПа	Предел прочности при относительном сжатии, МПа	Степень сжатия слоя, %	Структурно-механические характеристики, МПа			Условно-мгновенный модуль упругости	Физическое состояние и характер разрушения пород	
				Условно статический предел упругости	Прочность связей при разрушении пластичном	хрупком			
									Условно статический предел упругости
Диагенез	$\frac{0,009-0,143}{0,031}$	—	$\frac{(-23,2)-(+17,6)}{(+0,8)}$	0,0008	0,003	—	0,5-1,0	Скрытотекучее, неуплотненное	
Диагенез	$\frac{0,113-0,545}{0,269}$	—	$\frac{7,8-25,1}{15,15}$	$\frac{0,0006-0,0012}{-0,0012}$	0,054-0,135	—	1,0-10 <sup>4</sup>	Мягкопластичное, мало-или среднеуплотненное; разрушение пластичное	
Катагенез	$\frac{0,8-5,0}{2,6}$	$\frac{0,8-3,5}{1,9}$	$\frac{517,0-33,46}{26,97}$	0,0285	—	2,7	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>	Тугопластичное на грани перехода к сильно уплотненному состоянию; разрушение хрупкое	

Примечание. В числителе приведены крайние значения показателя, в знаменателе — средние. Содержание глинистой фракции (с размером частиц менее 0,005 мм) определялось по результатам гранулометрического анализа с обработкой пирофосфатом натрия с расстиранием.

ных связей (у нижней границы подзоны предел прочности выражается десятками долями мегапаскалей).

Этап позднего диагенеза (II подзона литификации). Осадки этой подзоны характеризуются слабой степенью уплотнения и литификации, мягкопластичным малоуплотненным состоянием, слабым межчастичным сцеплением коагуляционного характера, сильной сжимаемостью, склонностью к значительным пластическим деформациям. Естественная влажность осадков этой подзоны значительно превышает максимальную молекулярную влагоемкость и влажность при нижней границе пластичности, показатели уплотненности и консистенции изменяются от 0 до 1, предел прочности изменяется от десятых долей до единиц мегапаскалей. В пределах этой подзоны дегидратация и уплотнение осадков имеют более замедленный характер. Осадки все еще содержат большое количество свободной и осмотической воды. Происходит заметное усиление межчастичных главным образом молекулярных контактных взаимодействий. Дальние коагуляционные контакты сменяются ближними. Осадки заметно упрочняются, однако структурные связи сохраняют коагуляционный характер, что выражается в высокой подвижности и разрушении структуры при малых напряжениях. Область пропорциональности деформаций напряжениям практически не выражена. Осадки этой подзоны имеют пластичный характер разрушения. К нижней границе подзоны степень дегидратированности и уплотненности осадков достигает такого предела, когда их естественная влажность становится близка к величине максимальной молекулярной влагоемкости, породы приобретают тугопластичную консистенцию ( $I_p = 0$ ,  $K_d \approx 1$ ), что выражается в усилении межчастичных контактных взаимодействий, резком возрастании прочности (до единиц мегапаскалей), изменении характера структурных связей (возникают смешанные коагуляционно-конденсационные структурные связи). Наряду с признаками коагуляционных структур (ползучестью), в этих глинах появляются также признаки конденсационных структур (достаточно высокий предел прочности, упругость, хрупкий характер разрушения). Возникает интервал напряжений, в котором деформации пропорциональны или почти пропорциональны напряжениям.

Анализ имеющихся материалов позволяет представить механизм и энергетику процесса ранних постседиментационных изменений инженерно-геологических свойств глинистых осадков в процессах субаквального прогрессивного литогенеза.

Привносимый реками терригенный тонкодисперсный материал, обладая огромными запасами свободной поверхностной энергии, аккумулирует в процессе осадконакопления большие запасы порового раствора.

Если подходить к глинистым осадкам как к фазовым дисперсным системам, то изменение такой системы в процессе диагенеза можно рассматривать следующим образом. С момента аккумуляции на дне бассейна в глинистом осадке происходит формирование весьма слабой структурной сетки преимущественно за счет моле-

кулярных сил Ван-дер-Ваальса (застудневание). Свежесформировавшийся глинистый осадок характеризуется высокой пористостью, сильной обводненностью, скрытотекучим состоянием и весьма слабым межчастичным сцеплением. По мере погружения в результате постепенного и плавного нарастания количественных изменений в степени дегидратированности и уплотненности осадков наступают качественные изменения их физического состояния, характера межчастичных контактных взаимодействий, прочностных свойств и деформационного поведения.

Источником энергии сложных процессов преобразования физико-механических свойств глинистых отложений на стадии диагенеза является главным образом внутренняя энергия коллоидно-дисперсной системы осадков.

Разрешение внутренних противоречий коллоидно-дисперсной системы осадков (глинистые частицы — поровый раствор) проявляется в тенденции к сокращению поверхностной энергии, что выражается в самопроизвольных процессах синерезиса, старения и кристаллизации коллоидов.

По мере погружения осадков в преобразовании их физико-механических свойств возрастает роль гравитационного уплотнения и локальной цементации, обязанной диагенетическому минералообразованию и миграции подвижных аутигенных форм железа, кальцита, гипса, кремнезема и т. д. Литификации осадков зоны диагенеза способствуют медленные вековые процессы осмоса и диффузии, проявляющиеся в противоположно направленных перемещениях поровых растворов (вверх по разрезу) и растворенных в них солей (вниз по разрезу) и сопровождающиеся дегидратацией, уплотнением осадков и возрастанием минерализации поровых растворов по мере увеличения глубины залегания.

Результаты исследований природных геологических объектов, а также экспериментальные исследования, моделирующие процессы природного уплотнения глинистых осадков, показали, что характер и темп аутигенного минералообразования и постседиментационных изменений физико-механических свойств осадков в значительной степени определяются их первичными гранулометрическим и минеральным составами и режимом седиментации, т. е. контролируются формационными и фаціальными условиями.

Более быстрому темпу литификационного уплотнения и упрочнения глинистых осадков способствуют медленный платформенный режим седиментации и высокое содержание первичного органического вещества. В условиях медленного платформенного осадконакопления и длительного диагенеза в присутствии большого количества первичного органического вещества активизируются процессы аутигенного минералообразования и перераспределения вещества, ускоряющие темпы литификационного уплотнения и упрочнения осадков. Создаются наиболее благоприятные условия для геохимических преобразований, сопровождающихся миграцией карбонатов и аморфного кремнезема.

Замедленному темпу аутигенного минералообразования и ли-

тификационного уплотнения и упрочнения глинистых осадков благоприятствуют условия геосинклинального аридного бассейна — высокие скорости осадконакопления, достаточно интенсивная механическая седиментация и небольшое содержание первичного органического вещества.

Установлено отчетливое влияние химико-минерального и гранулометрического состава на скорость уплотнения глинистых осадков и, следовательно, на мощность зон литификации. Отсутствие отчетливых критериев и единой точки зрения на границы отдельных стадий и этапов осадочного породообразования привело к тому, что в литературе встречаются разноречивые мнения по поводу мощности зоны диагенеза.

Так например, Г. Мюллер стадию неглубокого погребения (нижнюю границу стадии диагенеза), когда первичный объем глинистых осадков очень быстро сокращается, выделяет на глубинах до 500 м. Г. Ларсен и Дж. Чилингар предлагают глубины погружения 10 м и 400 м считать границами соответственно раннего и позднего диагенеза. Н. М. Страхов считает, что глубины, на которых протекают процессы диагенеза, колеблются от 10—50 м до 200—300 м.

В изученном нами непрерывном разрезе глинистых отложений Каспийского бассейна, в районе Аляты-море граница диагенетических изменений соответствует глубинам погружения осадков на 70—90 м, т. е. можно считать, что зона диагенеза завершается при давлении порядка 1,5 МПа и повышении температуры менее чем на 3°С [18].

Следует иметь в виду, что установленные закономерности в формировании инженерно-геологических свойств глинистых осадков проявляются в природе в качестве тенденции. Реализация возможности формирования инженерно-геологических свойств осадков по приведенной схеме может осуществиться, превратиться в действительность только для случая глинистых субаквальных отложений, формирующихся в условиях непрерывного опускания земной коры.

Наряду с региональными изменениями существуют изменения осадков, связанные с локальными условиями и факторами, которые могут нарушать нормальный ход постседиментационных изменений и общий характер стадийности для отдельных районов. Эти факторы чаще всего бывают связаны с перерывами в осадконакоплении, с процессами выщелачивания или цементации.

#### *Особенности формирования инженерно-геологических свойств песков \**

Морским и озерным песчаным осадкам свойственны высокая влажность, наличие органического вещества и бактерий, вертикальная неоднородность физико-химической обстановки, в частности кис-

---

\* Раздел написан П. И. Фадеевым.



лотно-щелочного и окислительно-восстановительного режимов, контролируемых соответственно величинами рН и Eh. Эти особенности определяют геохимическую жизнь осадка, особенно в самом верхнем его слое, где наиболее интенсивно протекают процессы дегидратации, минерального новообразования, растворения и разложения неустойчивых составных частей осадка. В результате в осадке образуются минералы, устойчивые в данной физико-химической обстановке, к которым относятся по Л. Б. Рухину: пирит, марказит, сидерит, анкерит, лептохлориты, доломит, монтмориллонит, различные окислы железа, марганца и др. Не все из них одинаково хорошо представлены в песках, что в значительной мере связано с окислительно-восстановительными условиями среды их накопления. Вследствие ничтожного содержания в песках органического вещества, скудности бактериального населения, большой пористости и доступности промыванию водой на значительную глубину, восстановительные процессы в песках выражены слабо, в них сохраняются и накапливаются гидроокисные минералы железа и марганца или в виде отдельных зерен, или как пленочки вокруг песчинок. Одновременно с изменением минерального состава может происходить некоторое уплотнение осадка в результате сближения слагающих его частиц или главным образом цементации с образованием конкрециеобразных тел, сцементированных аутигенными минералами. Однако в большинстве случаев песчаные осадки в диагенезе не претерпевают существенных структурно-текстурных изменений ввиду незначительного литостатического давления и сохраняют рыхлую и сыпучую консистенцию. Следует отметить, что не всегда по внешним признакам можно определить окончание стадии диагенеза и отличить песчаную породу от песчаного осадка. Так, например, современный песок — осадок прибрежной зоны моря и песок — порода палеогенового возраста по внешним признакам могут быть одинаковыми, и провести грань между породой и осадком практически невозможно.

В литературе отсутствуют данные об изменении свойств песков на стадии диагенеза. Некоторые исследователи указывают, однако, что к концу этой стадии в песках происходит незначительное увеличение плотности и уменьшение пористости, которое сопровождается частичным отжатием поровой воды. Исключением являются те случаи, когда отдельные участки песчаной массы оказываются сцементированными окислами железа или другим цементом. Такие лепешкообразные конкрециеобразные песчаные тела резко отличаются по своим водно-физическим свойствам повышенной плотностью и прочностью, малой пористостью и слабой водопроницаемостью.

## ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД НА СТАДИИ КАТАГЕНЕЗА

### *Особенности формирования инженерно-геологических свойств глинистых пород\**

Под катагенезом понимается совокупность процессов, преобразующих осадочные породы по мере их погружения в глубокие зоны земной коры, изменения, происходящие в составе, строении и свойствах пород под действием повышающихся температур и давлений. Однако эти изменения не настолько глубокие, чтобы они могли коренным образом изменить облик осадочных образований.

Зона, в которой протекают процессы катагенеза, имеет значительную мощность. Она распространяется на глубину до 10 км, т. е. охватывает большую часть осадочной оболочки Земли, исключая верхние 50—300 м от дна морей, где идут процессы диагенеза. Давление в этой зоне с глубиной возрастает от 5 до 300 МПа, температура от 20 до 200 °С. Естественно, что породы, залегающие в верхней и нижней частях этой зоны, в силу такой большой разницы в условиях существования должны иметь значительное различие в составе, строении и свойствах.

Проблема изучения и дифференциации процессов катагенеза в последнее время подвергается специальной разработке. При выделении стадии катагенеза на подстадии или этапы наметились три основных направления, развивающиеся параллельно и использующие для этого различные критерии. Однако ни один из этих критериев не является универсальным, так как зависит в каждом случае от определенных условий осадконакопления и тектонического развития данного региона. Поэтому более эффективным является комплексный подход к решению этой проблемы с учетом, по возможности, всех показателей, которые могут служить индикаторами подзон катагенеза: степени метаморфизма органического вещества, ассоциации глинистых минералов, структурно-текстурных особенностей песчаников, а также изменения физико-механических свойств глинистых пород, причем последний критерий имеет ряд преимуществ. Во-первых, это связано с тем, что о характере физико-механических свойств возможно судить более объективно и однозначно, так как показатели этих свойств имеют количественное выражение, их можно непосредственно измерить. Во-вторых, они более чувствительны к изменению внешних условий, отражая всю совокупность перемен, происходящих в породе под действием разнообразных процессов, вызывающих всестороннее изменение как химико-минерального состава, так и строения и состояния пород [34].

Анализ данных полевых и лабораторных исследований показывает, что глинистые породы различного возраста и генезиса, раз-

---

\* Раздел написан З. А. Кривошеевой.

ного первичного состава и строения, залегая в условиях одинаковых температур и близких давлений, приобретают общие характерные особенности, по которым зону катагенеза в диапазоне глубин 300—4000 м можно подразделить на три подзоны раннего, среднего и позднего катагенеза. В этих подзонах происходят различные изменения в составе и строении глинистых пород, увеличиваются их плотность, водостойкость и прочность (табл. 12).

В соответствии с упомянутыми выше критериями, принятыми в настоящее время в литологии для более дробного расчленения зоны катагенеза, граница между выделенными нами подзонами раннего и среднего катагенеза примерно совпадает с уровнем перехода монтмориллонита в смешанослойные образования с содержанием  $>40\%$  лабильных пакетов, а граница подзон среднего и позднего катагенеза — с уровнем преобразования указанных смешанослойных в разности с содержанием  $<40\%$  разбухающих пакетов. Изменения глинистых пород, происходящие в подзоне раннего катагенеза, соответствуют по шкале метаморфизма углей этапу образования бурых углей, среднего катагенеза — длиннопламенных и газовых, и позднего — жирных, коксовых, отощенно-спекающихся и тощих углей.

Границы подзон катагенеза в различных районах располагаются на разной глубине, будучи тесно связанными с определенными температурными условиями.

Нижняя граница подзоны раннего катагенеза обычно не погружается глубже 2000 м, залегая чаще всего в интервале 1400—1700 м. Температуры в этой подзоне катагенеза с глубиной возрастают от 20 до 60 °С.

Состав глинистых пород рассматриваемой подзоны носит облик, сложившийся на предыдущих двух стадиях седиментации и диagenеза. Основные породообразующие минералы аллотигенного происхождения — гидрослюда, монтмориллонит, монтмориллонит-гидрослюдистые смешанослойные образования и каолинит в существующих условиях продолжают оставаться устойчивыми. Уменьшается лишь содержание наименее стабильных триоктаэдрических слюд, за счет которых происходит образование смешанослойных фаз. Лишь в нижней части подзоны раннего катагенеза монтмориллонит начинает испытывать незначительную переработку.

Текстуры глин верхней подзоны отличаются наибольшим разнообразием. Они имеют беспорядочную, слоистую и сгустковую мезотекстуру с различной степенью ориентированности глинистых частиц. Коэффициент ориентированности  $K_{ор}$  в разных прослоях глин, залегающих в толще осадочных пород подзоны раннего катагенеза, может колебаться от 0 до 70 %. Отражением внутреннего строения глин в какой-то степени является форма щебенки, на которую они распадаются после удара. В подзоне раннего катагенеза щебенка глин отличается большим разнообразием, среди них встречаются разновидности с оскольчатой, плитчатой, комковатой, листоватой и скорлуповатой щебенкой. Макро- и мезотекстуры глинистых пород в верхней подзоне не обнаруживают видимых изме-

жений с глубиной, сохраняя основные черты, сформировавшиеся на более ранних стадиях литогенеза. Только микротекстура, а именно степень ориентированности глинистых частиц, судя по средним значениям коэффициента ориентированности, в подзоне раннего катагенеза имеет тенденцию к постепенному возрастанию с глубиной.

Гораздо более чувствительными к перемене условий внешней среды по мере погружения отложений оказываются физические свойства глин в верхней подзоне. Слабо меняется с глубиной только минеральная плотность глин  $\rho_s$ , колеблясь в определенных пределах, характерных для глин каждого района, но близ нижней границы подзоны обычно отмечается явная тенденция к повышению ее значений.

Своеобразие свойств глинистых пород в подзоне раннего катагенеза, начиная с глубин 250—300 м, определяется тем, что большая часть заключенной в них влаги находится в адсорбционно-связанном состоянии. Это следует из того, что влажность пород уже у нижней границы подзоны примерно равна влажности нижнего предела пластичности  $W_p$  гидрослюдисто-каолинитовых глин ( $\sim 19\%$ ) и максимальной гигроскопической влажности  $W_{\text{мг}}$  глин существенно монтмориллонитового состава ( $\sim 25\%$ ).

Подтверждением того, что большая часть воды, заключенной в глинах подзоны раннего катагенеза (250—1500 м), относится к адсорбционно-связанной, является постоянство количественного содержания в них воднорастворимых солей ( $\sim 1,0—1,5\%$ ), что по мере уменьшения влажности приводит к росту концентрации поровых вод вниз по разрезу. Расчеты условной концентрации солей в поровом растворе показывают, что при данных давлении и температуре концентрация солей в поровых водах глин близка к пределу их растворимости в свободной воде. Если принять во внимание, что адсорбционно-связанная вода является худшим растворителем, чем вода в объеме, то значительная часть солей должна находиться в порах породы в твердом состоянии.

Согласно многочисленным экспериментам ван Олфена, В. Д. Ломтадзе, С. С. Полякова, Е. М. Сергеева и др., для удаления адсорбционно-связанной воды необходимы давления, обычно превышающие несколько десятков или сотен мегапаскалей. В природных же условиях в подзоне раннего катагенеза уплотнение происходит при гораздо более низких давлениях, составляющих единицы и первые десятки мегапаскалей. Это связано с влиянием повышающихся температур — важного фактора дегидратации глинистых пород при их погружении в зону катагенеза.

Увеличение способности глин уплотняться под действием данной нагрузки с ростом температуры обусловлено ускорением трансляционного движения молекул воды, уменьшением взаимодействия их с поверхностью и, как следствие этого процесса, разрушением исходной структуры связанной воды и трансформации ее в свободную.

В результате температурной дегидратации и последующего уп-

## Состав, строение и свойства глин и аргиллитов в различных подзонах катагенеза

Подзоны катагенеза	Преобладающие минералы	Средняя глубина, м	$K_{op}$ , %	$\rho_s$	$n$ , %	$W_{ест}$ , %	$H$	$R_c$	$\sigma_p$	$t_{P_{вод}}$ категория
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Западно-Кубанский прогиб 600—4000 м ( $P_3 - N_1^1$ )

Раннего	Монтмориллонит, гидрослюда		—	2,7—2,76	37—18	22—12	18—50	100	2,4—3	III—V <sub>1</sub>
	Гидрослюда, смешанослойные	2050	65	2,76	18—16	12—6	—	185	3,2	VI
Среднего		2450	50	2,71—2,74	22	11	20—30	85—130	2,4—3	III
		2650	65	2,74—2,8	16—14	6	40—55	100—200	3,5—4,2	VI
			0—30	2,72—2,74	24	10	30—35	105—110	3—3,4	V
Позднего	Гидрослюда	3150	20—65	2,72—2,78	15—12	5	65	185—300	3,5—4	VII—VIII

Северо-Крымский прогиб 600—4000 м ( $K - N_1^1$ )

Раннего	Монтмориллонит	1000	20—50	2,74—2,76	26	12	18	35—115	1	I—II
---------	----------------	------	-------	-----------	----	----	----	--------	---	------

	Монтмориллонит, смешанослойные									
АГ—I	Смешанослойные, гидрослюда	60	2,77	26—22	12—8	34	—	2,5	III—IV	
Среднего		35	2,71—2,74	23	10—7	21—35	—	1,2—2,3	II	
АГ—II	Гидрослюда	60	2,73—2,75	16—6	6—3	43—48	90—500	2,3—2,6	V—VI	
Позднего		—	2,7	10—8	4	32	—	2—3	V	
		—	2,72—2,74	4—5	2—1,5	40—97	1200	3—4	VII—VIII	
		1350								
		1950								
		2450								
		3250								

Московская синеклиза 700—3200 м (PR<sub>3</sub>—PZ<sub>1</sub>)

	Гидрослюда, каолинит									
Раннего		40—50	2,79—2,8	24—18	10—8	15—40	250	1,5	I—IV	
Среднего		45—55	2,85—2,87	18—16	8—5	50	350	2	V—VI	
АГ—I		30—45	2,77	18	7	30—40	50—250	1,7—2,7	II—III	
Среднего		45—55	2,81	15—10	5—3	40—50	300—450	2,7	V—VI	
АГ—II		25—30	2,76—2,78	11—10	4	30—60	250—650	1,7—2,7	V	
Позднего		50	2,8—2,83	7—6	2	80	900	3,5—3,7	VII—VIII	
		1350								
		1550								
		1950								
		2450								
		2850								

лотнения возрастающим давлением от веса вышележащих пород пористость глин в подзоне раннего катагенеза постепенно уменьшается до 20 %. Градиент изменения пористости в подзоне раннего катагенеза наибольший и составляет около 2 % на каждые 100 м.

Глины подзоны раннего катагенеза после высушивания размокают в воде. Степень размокания у отдельных разновидностей колеблется от I до IV категории, обнаруживая явную тенденцию к уменьшению с глубиной.

Скорость упругих волн, измеренная в образцах воздушно-сухих глин, увеличивается к нижней границе подзоны от 1 до 2,5 км/с. В направлении, параллельном напластованию, значения скоростей более постоянны, они колеблются в пределах всей подзоны от 3 до 3,5 км/с, т. е. анизотропия упругих свойств глинистых пород уменьшается с глубиной (см. табл. 12).

Прочность глинистых пород в подзоне раннего катагенеза также увеличивается с глубиной. Испытания на одноосное сжатие ( $R_c$ ) воздушно-сухих образцов показывают рост прочности с 5—10 МПа в верхней части подзоны до 20—25 МПа в нижней. Аналогичные результаты получены также при испытании пород на разрыв и микротвердость.

Сопоставление изучения изменений состава, строения и свойств глинистых пород с глубиной позволяет понять и проследить эволюцию структурных связей и характер контактов глинистых пород в процессах катагенеза как основных факторов, определяющих прочностные и деформационные свойства этих пород в разных подзонах.

Характер структурных связей, возникающих между частицами глинистых пород в подзоне раннего катагенеза, определяется соотношением контактов различного типа. Хрупкий характер разрушения, наблюдающийся в опытах по определению прочности пород на одноосное сжатие и разрыв, позволяет утверждать, что в глинистых породах с влажностью менее нижнего предела пластичности, начиная с глубин 500—600 м, молекулярные связи через водно-коагуляционные контакты почти отсутствуют. Полное или частичное размокание этих пород в воздушно-сухом состоянии показывает, что значительная часть структурных связей (~50 %) носит обратимый характер. Видимо, они представлены точечными контактами, возникающими между глинистыми частицами при дегидратации, осуществляемыми через обменные катионы и имеющими электростатическую природу.

С увеличением глубины залегания породы происходит эволюция структурных связей в направлении постоянного возрастания количества фазовых контактов и увеличения прочности последних, что связано с дальнейшей дегидратацией пород под действием температур и давлений, изменением видов связанной воды, состава порообразующих минералов и минералов-примесей, поровых растворов, структуры и текстуры глинистых пород [22]. Соотношение связей, обусловленных фазовыми и точечными обратимыми контактами, в нижней части подзоны раннего катагенеза примерно

одинаково. Фазовые контакты в глинистых породах зоны катагенеза обычно представлены двумя типами. Преобладающим типом являются контакты, создающиеся цементирующими минералами, присутствующими в глинистых породах, — кальцитом, доломитом, гипсом, кремнеземом, сидеритом, гидроокислами железа, гематитом, органическим веществом. Другой тип фазовых контактов возникает непосредственно между самими глинистыми частицами, имеет ионно-ковалентный характер по типу межпакетных соединений через катион, находящийся в необменной позиции (чаще всего калий-ион), как в кристаллической решетке мусковита.

Подзона среднего катагенеза выделяется обычно в интервале глубин от 1400—1500 до 3000—3200 м. Температура здесь постепенно повышается к нижней границе до 100 °С, давление увеличивается до 60 МПа.

Более уплотненные глины подзоны среднего катагенеза по своему облику начинают отличаться от глинистых пород подзоны раннего катагенеза, утрачивая свои первичные признаки. Резко сокращается количество глин, дающих при ударе скорлуповатую, комковатую и оскольчатую отдельности, значительно повышается (до 40 %) содержание глин с плитчатой щебенкой.

Именно во второй подзоне катагенеза происходит значительная перестройка состава ассоциаций глинистых минералов. Почти исчезает неустойчивый в данных условиях монтмориллонит. Он постепенно превращается в монтмориллонит — гидрослюдистую смешанослойную фазу с содержанием менее 40 % разбухающих пакетов, а также хлорит. В свою очередь ранее содержащиеся в отложениях смешанослойные образования, связанные, в основном, с деградацией слюд 1 М, переходят соответственно в разности с меньшим, чем у продуктов аградации монтмориллонита, количеством указанных пакетов.

С погружением пород в подзону среднего катагенеза начинается новый этап их существования, своеобразие которого во многом определяется тем, что большая часть связанной воды в породах переходит в свободное состояние. Именно в температурном интервале 60—70 °С, согласно лабораторным данным многих исследователей (А. М. Блоха, Н. Ф. Бондаренко, П. В. Дерягина, Ю. И. Тарасевича, Н. В. Чураева и др.), наблюдается резкое изменение свойств адсорбционно-связанной воды, вызванное переходом большей ее части в свободную. В виде связанной в породе остается вода, близкая по количеству к условному «монослою», т. е. вода главным образом ближней гидратации обменных катионов Na и Ca. Таким образом, при температуре 60 °С в подзоне среднего катагенеза появляется возможность для дальнейшего уплотнения глинистых пород. Кроме того, несмотря на значительное уменьшение их пористости, глины могут быть даже более проницаемыми, чем в вышележащих толщах, вследствие изменения свойств заключенной в них влаги. Это подтверждается лабораторными работами ряда исследователей (И. А. Брилинг, В. М. Гольдберг, П. В. Дерягин и др.) и полевыми данными по термометрии глинистых пород.



Более высокая проницаемость глинистых пород в подзоне среднего катагенеза подтверждается аномалиями значений геотермического градиента, скачкообразно повышающегося ниже изотермы 60—70 °С.

С переходом адсорбционно-связанной воды в свободную не только изменяется проницаемость глинистых пород по сравнению с толщей, залегающей выше изотермы 60—70 °С, но и появляется новый значительный объем свободной воды, обладающей повышенной способностью к растворению, агрессивность которой увеличивается за счет ее исходной протонизации. Явление протонизации молекул адсорбционно-связанной воды в условиях влияния сильного поляризующего поля поверхности за счет значительной концентрации одноименно заряженных противоионов — обменных катионов двойного электрического слоя (ДЭС) доказано многими исследователями (Р. И. Злочевская, Ю. И. Тарасевич, И. И. Фриппа и др.). Агрессивность такой подкисленной воды может, по-видимому, проявиться лишь при условии перехода ее в свободное состояние в результате повышения температуры и сохранения при этом в течение какого-то времени эффекта диссоциации воды. В результате появления трансформированной связанной воды нарушается равновесие между составом поровых вод и вмещающими их глинистыми породами. В раствор в этом случае возможен переход не только легкорастворимых солей, находящихся в порах пород в твердом состоянии, но и некоторых более трудно растворимых в воде минералов, таких, как кальцит и различные силикаты — кварц, полевые шпаты, а также слоистые, в том числе глинистые, минералы, особенно разности с дефектами в структуре.

Непосредственным указанием на то, что в толще глинистых пород подзоны среднего катагенеза протекают процессы растворения, может служить уменьшение содержания в них воднорастворимых солей по мере перехода ко все более глубоким горизонтам. Наибольшей агрессивностью, по-видимому, обладают поровые воды, заключенные в глинах, залегающих в тех частях подзоны среднего катагенеза, где непосредственно осуществляется трансформация связанной воды в свободную, т. е. ниже изотермы 60—70 °С. Это подтверждается появлением аномальных горизонтов (АГ), прослеживающихся в толще глинистых пород у верхней и нижней границ подзоны среднего катагенеза.

Характер изменения микростроения и физико-механических свойств глинистых пород позволяет разделить подзону среднего катагенеза на три горизонта — верхний, средний и нижний, мощностью 300—500 м каждый (табл. 13; рис. 14). В верхнем и нижнем горизонтах сильно уплотненные глины обладают аномальными свойствами по сравнению с глинистыми породами выше- и нижележащих толщ, в связи с чем они выделяются под названием аномальных горизонтов. Значения показателей свойств, обычно уменьшающиеся с глубиной, в пределах этих горизонтов скачкообразно возрастают, а увеличивающиеся, наоборот, падают. Так, ориентированность глинистых частиц на этих глубинах резко ухудшается,

Таблица 13

Схема изменения состава и свойств глинистых пород в зоне катагенеза (см. рис. 14)

Этапы и подзоны катагенеза	Температура, °С	Глинистые породы	Марки углей	Преобладающие глинистые минералы		Преобладающие формы воды в глинах
				аллотигенные	аутигенные	
Начальные	30	Глины уплотненные, тугопластичные и полутвердые	Б	Гидрослюда 1М и 2М <sub>1</sub> , монтмориллонит, смешанослойные, каолинит, хлорит	—	1. Адсорбционно-связанная $W \ll W_p$
	60—70					
Глубинные	80—90	Глины сильно уплотненные, ввиду с прослоями аргилитоподобных, твердые	Д	Гидрослюда 1М и 2М <sub>1</sub> , монтмориллонит, каолинит, хлорит	Смешанослойные с содержанием > 40% лабильных пакетов, гидрослюда 1М, хлорит	2. Свободная — трансформированная из воды полислоев и связанная «монослоя» $W < W_{mf}$
	Глубинные	160	Аргилиты	Ж	Гидрослюда 2М <sub>1</sub> и 1М, каолинит, хлорит	Гидрослюда 1М, хлорит, смешанослойные с содержанием < 40% лабильных пакетов
200						
Метастаз			ОС			

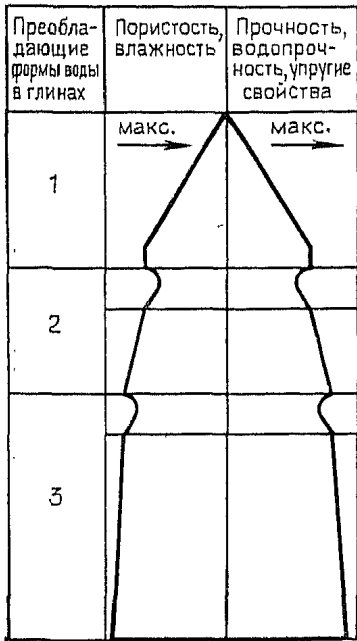


РИС. 14. Изменение свойств пород (см. табл. 13).

пористость, постепенно уменьшавшаяся с глубиной, увеличивается; почти не размокавшие ранее сильно уплотненные глины в пределах этих горизонтов становятся водонеустойчивыми, прочность их значительно понижается. Подобные аномалии отмечаются и для ряда других свойств: минеральной плотности, скоростей упругих волн, состава и минерализации поровых вод, состава обменных катионов и пр. (см. табл. 12). Глинистые породы, залегающие в этих горизонтах, независимо от возраста и генезиса характеризуются пониженными значениями минеральной плотности (на 0,03—0,1) и объемной массы (0,01—0,04 г/см<sup>3</sup>), повышенной общей пористостью (на 1—10 %), более высокой размокаемостью (от I до III категории) и уменьшением скоростей упругих волн (на 0,5—1,0 км/с). Кроме того, значения прочностных характеристик этих пород на разрыв и одноосное сжатие в указанных горизонтах понижаются в 2,5—5 раз. К нижним границам горизонтов все значения свойств выравниваются, вновь приобретая почти прежние значения, отмечавшиеся перед скачком у кровли горизонта.

Большинство изменений, происходящих в глинах аномальных горизонтов, в частности, скачкообразные изменения физико-механических свойств глин, можно объяснить идущими в них процессами растворения воднорастворимых солей, карбонатов и силикатов, обусловленными переходом адсорбционно-связанной воды в свободную [22]. Процессы растворения вызывают ослабление структурных связей между частицами и снижение значений прочностных показателей в результате увеличения в породах доли более слабых точечных обратимых контактов за счет уменьшения количества фазовых.

Средний горизонт второй подзоны катагенеза, располагающийся между горизонтами с аномальными свойствами глин, отличается относительным постоянством свойств пород, слабо изменяющихся с глубиной, за исключением пористости, падающей с 15 до 6 %. Скорость уменьшения пористости в интервале глубин 2000—2500 м значительно ниже, чем в подзоне раннего катагенеза, и составляет в среднем 1,2 % на каждые 100 м.

Градиент уплотнения для разных районов от 0,006 до 0,013. Влажность глин в данном интервале глубин соответственно понижается до 5 %.

Прочность глин также мало отличается от той, которая свойственна нижним частям подзоны раннего катагенеза, увеличиваясь лишь на 5—10 МПа. Максимальные значения прочности на одноосное сжатие редко превышают 40 МПа. В нижней части горизон-

та глины начинают приобретать облик аргиллитов, становясь слабо размокающими.

В среднем горизонте второй подзоны катагенеза количество фазовых контактов уже превышает 60 %, а точечные необратимые контакты имеют более развитый характер, отличающийся предельной прочностью для этого вида связей. Доля более слабых точечных обратимых контактов, преобладающих в подзоне раннего катагенеза, составляет здесь всего 10 %. Прочность фазовых контактов цементационного типа в глинистых породах подзоны среднего катагенеза имеет те же значения, что и в подзоне раннего катагенеза. Этим и объясняется не слишком значительное возрастание прочности глинистых пород в рассматриваемой подзоне по сравнению с нижней частью вышележащей.

В нижней части подзоны среднего катагенеза на глубинах с температурой, превышающей 80—90 °С, начинается заключительный этап обезвоживания глинистых пород, обусловленный переходом в свободное состояние еще одной части адсорбционно-связанной воды, воды ближней гидратации ионов Na и Ca, по количеству близкой условному монослою. Несмотря на малое количество освобождающейся при этом воды (2—3 %), агрессивность ее достаточно велика, так как, согласно прямым определениям методом ЯМР, способность к растворению у воды монослоя, пока она находилась в связанном состоянии, практически отсутствует. Высокой агрессивностью новой порции свободной воды, трансформировавшейся из молекул, наиболее прочно связанных с поверхностью глинистых минералов, объясняется появление в толще глинистых пород второго аномального горизонта между изотермами 90—100 °С на глубинах около 2500—3000 м. Абсолютные значения показателей свойств глинистых пород второго аномального горизонта несколько иные, чем первого, но общая направленность их изменения сохраняется прежней. Растворение карбонатов здесь уже не играет главенствующую роль, так как по мере погружения до 2500—3000 м включения микрозернистых карбонатов в глинах полностью растворяются и в породах присутствуют только рассеянные перекристаллизованные, хорошо огабаритованные более крупные кристаллы, устойчивые в данной подзоне, согласно геохимическим и термодинамическим показателям. Однако судя по максимуму содержания воднорастворимой формы  $\text{SiO}_2$ , приходящемуся именно на этот горизонт, в нем в более интенсивном виде под влиянием высоких температур и давления идет процесс растворения поверхности глинистых частиц и других силикатов, находящихся в породе в виде обломочной примеси.

Если исключить из рассмотрения верхний и нижний горизонты средней подзоны с их аномальными свойствами, то можно отметить, что характер колебаний значений физико-механических свойств, их разброс становится менее значительным по сравнению с верхней подзоной (см. табл. 12). Заметно выравнивается разница между показателями свойств глинистых пород, залегающих в разных районах. Уменьшаются различия в свойствах не только

глин различного минерального и гранулометрического состава, но сближаются свойства разнотипных пород, таких, как глины, алевролиты и мергели. Все это является результатом направленных вторичных преобразований пород с глубиной.

Своеобразно построенная подзона среднего катагенеза по составу, строению и свойствам пород является переходной от подзоны раннего катагенеза к подзоне позднего, где господствуют процессы глубинного катагенеза. Таким образом, залегающие в верхней и нижней частях подзоны среднего катагенеза горизонты с аномальными свойствами глинистых пород служат естественными границами трех подзон с различным уровнем катагенетического преобразования пород (см. табл. 12, 13).

При инженерно-геологических изысканиях для наземного строительства и при горнопроходческих работах необходимо учитывать, что в толще осадочных пород зоны катагенеза встречаются горизонты с аномальными свойствами глинистых пород, имеющих пониженные прочность и водопрочность, что должно служить обстоятельством для более детального изучения этих пород.

Наличие мощных толщ (до 200 м) глин с пониженными для данных глубин прочностными и упругими свойствами, являющихся ослабленными горизонтами, вызывает, согласно расчетам, проведенным Л. Л. Панасьян, перераспределение напряжений в массивах осадочных пород, что не может в свою очередь не отразиться на свойствах как этих пород, так и пород, залегающих выше и ниже.

Подзона позднего катагенеза выделяется обычно ниже глубин 2800—3000 м. Освобождение большей части поверхности частиц от молекул воды, экранировавших контакты между частицами, позволяет в большей мере развиваться фазовым контактам, поэтому ниже второго аномального горизонта, на границе подзон среднего и позднего катагенеза, происходит качественный скачок — сильно уплотненные глины переходят в аргиллиты, появляются структуры, полностью лишенные возможности внутрикристаллического набухания, с жесткими необратимыми водопрочными связями между частицами. Аргиллиты не размокают в воде, представляя массивные породы, с трудом раскалывающиеся на отдельные плитки, иногда в наиболее погруженных частях подзоны обладающие сланцеватостью.

Для ассоциации глинистых минералов аргиллитов наиболее характерны гидрослюда, хлорит и каолинит, реже встречаются смешанослойные образования с малым содержанием лабильных пакетов. Последние в максимальном количестве приурочены только к верхней половине подзоны и полностью исчезают в ее нижней части. То же происходит с каолинитом, становящимся неустойчивым по мере повышения температуры и давления и переходящим в нижней части подзоны в гидрослуду и хлорит. Таким образом, состав ассоциации глинистых минералов в подзоне позднего катагенеза приобретает наибольшее однообразие. Это же относится и к строению аргиллитов. Степень ориентированности глинистых частиц в них к моменту погружения пород в зону, где господствуют процес-

сы глубинного катагенеза, становится довольно постоянной, не превышая в среднем 50—60 %.

Значения минеральной плотности, объемной массы и пористости у аргиллитов третьей подзоны колеблются в близких пределах и обнаруживают слабую тенденцию к изменению с глубиной (см. табл. 13). Средние значения пористости 4—7 %, влажность 1,5—2 %. Аргиллиты становятся очень прочными породами с сопротивлением раздавливанию, превышающим зачастую 100 МПа.

В подзоне позднего катагенеза доля точечных обратимых контактов между частицами глинистых пород сокращается почти вдвое. Они переходят в фазовые контакты мусковитового типа, что хорошо согласуется с наблюдаемым здесь резким переходом сильно уплотненных глин в аргиллиты. С дальнейшим погружением роль этих контактов возрастает за счет укрупнения глинистых частиц, повышения их кристалличности и совершенствования структуры на путях перехода гидрослюд в серицит. Что касается фазовых контактов цементационного типа, то у верхней границы подзоны позднего катагенеза прочность их значительно возрастает, например, для связей, обусловленных кальцитом, почти вдвое, оставаясь, однако, более слабыми, чем силы связи внутри кристаллов кальцита. Вероятно, в более глубоких частях подзоны позднего катагенеза происходит дальнейшее упрочнение этих связей вплоть до величин, характерных для связей внутри кристаллической решетки кристаллов кальцита, что также будет обуславливать рост дальнейшей прочности глинистых пород.

Скорости упругих волн аргиллитов в подзоне позднего катагенеза становятся выше, чем в подзоне среднего катагенеза, достигая в направлении, перпендикулярном к напластованию, значений 3—4 км/с, параллельном напластованию — 3,5—5,5 км/с. Разброс значений скоростей упругих волн в этой подзоне увеличивается, отражая возросшую с глубиной склонность аргиллитов к трещинообразованию за счет приобретения ими хрупкости. Поэтому, несмотря на малую пористость, глинистые породы подзоны позднего катагенеза могут быть достаточно проницаемы из-за повышенной способности к растрескиванию, о чем необходимо помнить при специальных работах, касающихся сооружения подземных хранилищ.

Приведенные выше материалы позволяют считать, что основным фактором в процессе преобразования глинистых пород в зоне катагенеза является температура, роль которой сводится не столько к увеличению скоростей химических реакций, сколько к воздействию на состояние и виды воды, заключенной в глинистых породах. Количество, вязкость, растворяющая способность, подвижность воды, т. е. основные ее свойства, являющиеся наиболее важными в процессах преобразования пород, определяются изменениями температуры в толщах глинистых пород. Роль давления в процессах катагенеза важна при преобразовании глинистых толщ, но это относительно пассивный фактор, обуславливающий в основном уплотнение пород. Более того, при преобладании в породах адсорбционно-связанной воды малые давления, не превышающие несколь-

ко десятков мегапаскалей, не только не способны отжать эту воду, но будут оказывать стабилизирующее влияние на ее структуру, разупорядывающуюся под действием повышающейся температуры в результате ускорения трансляционного движения молекул воды. Иными словами, воздействия температур и давления (не свыше 50—100 МПа), господствующих в тех частях зоны катагенеза, где еще сохраняется связанная вода, являются разнонаправленными.

Таким образом, основным процессом, прямо или косвенно вызывающим преобразования состава, строения и свойств глинистых пород в зоне катагенеза, является их дегидратация, а особенности фазовых переходов воды, изменения ее строения и свойств — скрытыми причинами происходящих изменений, приводящих в конечном счете к возникновению вертикальной катагенетической зональности. При этом наличие различных видов воды в глинистых породах можно считать одним из основных критериев при установлении границ подзон катагенеза.

Дробное подразделение зоны катагенеза на подзоны и горизонты представляет не только научное, но и практическое значение, являясь естественной основой для составления инженерно-геологических классификаций пород, выбора методик изучения и системы опробования пород, подвергшихся катагенетическому преобразованию.

### *Особенности формирования инженерно-геологических свойств песчаников \**

Свойства песчаных пород в зоне катагенеза формируются главным образом под влиянием температуры, давления, состава и концентрации поровых растворов и других гидрохимических факторов. Под действием давления вышележащих толщ происходит уплотнение песчаных пород, частицы их перераспределяются в объеме, сближаясь и все чаще контактируя друг с другом. При этом они более плотно упаковываются, в результате чего увеличивается плотность песчаников, изменяются другие свойства. Пока литостатическое давление сравнительно невелико, уплотнение осуществляется в основном за счет перегруппировки (сближения) частиц, которые стремятся уложиться более плотно и занять минимальный объем. По данным Б. К. Прошлякова, первоначальная пористость нижнемеловых и юрских песчаников Восточного и Центрального Предкавказья уменьшалась на 7—9 % на каждые 1000 м и на глубине 3000—3500 м составляла 8—12 %. На глубинах 3500 м темп уплотнения снижается, а на глубине 5000 м пористость всех литологических разностей выравнивается и составляет 5—7 % при плотностях 2,5—2,58 г/см<sup>3</sup>.

Одновременно с механическими процессами в катагенезе протекают разнообразные физические и физико-химические процессы, приводящие к изменению минерального состава и свойств песча-

---

\* Раздел написан П. И. Фадеевым.

ных пород. Высокое давление при наличии в породе растворов способствует также растворению зерен и внедрению их в другие. Это усложняет контакты между частицами, усиливает их связи друг с другом, а следовательно, и прочность пород в целом. В процессе катагенетических изменений появляются контакты разрастания: конформные, инкорпуляционные, сутурные и др. Химические изменения играют даже более существенную роль, нежели механические, поскольку ими главным образом обусловлены цементация и литификация песчаных образований.

Цементация связана с привнесом цементирующего вещества поровыми растворами, протекающими через них. Если в такой системе, как порода-раствор, нарушается физико-механическое равновесие, то в ней будет идти осаждение или растворение. Осаждение цементирующих веществ из пересыщенных растворов идет до тех пор, пока поровое пространство не будет полностью заполнено. При периодическом поступлении раствора поровое пространство песчаных пород может заполняться лишь частично, что является более обычным явлением.

Чаще, чем другие, цементирующими веществами песчаников являются карбонаты и кремнезем. Карбонатный цемент свойствен обычно более молодым песчаникам, а кремнеземистый — более древним. Объяснение этому находят в различной растворимости, а следовательно, и сохранности карбонатов и кремнезема. Карбонатный цемент представлен чаще кальцитом, реже доломитом, еще реже — другими карбонатными минералами, кремнеземистый — кварцем. Меньшую роль играет глинистый цемент.

Цементация, особенно полная, при любом составе цемента увеличивает плотность пород, уменьшает пористость и проницаемость, находящуюся с ней в корреляционной зависимости. Огромное влияние цементация оказывает на прочность песчаных пород, их водостойкость и другие важнейшие физико-механические свойства. Наиболее прочными в общем случае оказываются песчаники с кварцевым цементом, обычно залегающие в подзоне позднего катагенеза. Прочность их может достигать десятков и даже сотен мегапаскалей. Менее прочными являются песчаники с глинистым цементом, их прочность, как правило, не превышает единиц и десятков мегапаскалей. Прочность карбонатных песчаников имеет промежуточное значение. В том же направлении изменяется и водостойкость пород.

Следует отметить, однако, что такой ход изменений состава и свойств пород при их литификации прослеживается лишь по мере углубления в земную кору, т. е. при переходе от ранней подстадии катагенеза к поздней (межстадиальный катагенез, по Е. Г. Бро). Эти изменения связаны с уплотнением пород и минеральными новообразованиями. Если же песчаные породы испытывают катагенетические изменения на одной глубине или в небольшом интервале глубин (внутристадиальный катагенез, по Е. Г. Бро), свойства их будут отражать неравномерность распределения термобарических факторов, связанную с различием в гранулометрическом составе,



упаковках зерен и т. д. на разных участках развития отложений. Этим в известной мере объясняется тот факт, что в толще литифицированных песчаных пород на одной и той же глубине, но в разных районах можно встретить песчаники, различные по уплотненности и другим свойствам.

На стадии катагенеза значительные изменения происходят и в минеральном составе песчаных пород вследствие растворения обломочных зерен неустойчивых минералов, регенерации кварца, полевых шпатов и т. д., гидратации и набухания, образования цеолитов, глинистых и других минералов. В ходе этих процессов разрушаются основные плагиоклазы, амфиболы, пироксены, оливин и другие и возникают новые минеральные образования, устойчивые в условиях высоких температур и давления. К ним обычно относят кварц, халцедон, кальцит, полевые шпаты, окислы железа, хлорит, ангидрид, глинистые минералы, пирит, глауконит и другие минералы. Отметим, что однозначное суждение о принадлежности тех или иных минеральных новообразований к катагенетическим очень затруднительно вследствие их полигенетичности. Одни и те же минералы (хлорит, полевые шпаты, кварц, гидрослюда, каолинит, диккит и т. д.) могут образовываться на разных стадиях литогенеза.

На интенсивность катагенетических изменений песчаных пород оказывают влияние их структурные особенности и вещественный состав. С увеличением дисперсности (до определенного предела) возрастает реакционная способность породы, повышающая скорость вторичных процессов, которые наиболее интенсивно протекают в мелкозернистых разностях песчаников. В песчаниках с базальным типом цемента кластические зерна изменяются слабее, чем в разностях с другим типом цемента или без него. Аналогичным же образом влияет и минеральный состав пород. Однородные кварцевые песчаники подвергаются меньше катагенетическим преобразованиям по сравнению с полимиктовыми. При этом различия выражаются не только в интенсивности, но и в характере изменений пород, в составе аутигенных минералов, изменениях структуры и т. д.

Иллюстрацией катагенетических преобразований песчаника и связи его литологических особенностей с физико-механическими свойствами могут служить данные (табл. 14), полученные Ю. П. Зубаревым, Б. А. Лыиковым и В. И. Никулиным при исследовании однородного слоя среднезернистого песчаника Донбасса, который находился в зоне катагенеза (угли марки Ж). Данные показывают, что с увеличением глубины почти на 1000 м физико-механические свойства существенно меняются: пористость уменьшается на 90 %, а прочность возрастает на 24—60 %. Одновременно происходят изменения в структуре песчаника, увеличивается его крупность, существенно уменьшается объем цемента, меняются его тип и состав, появляются новообразования, в более глубоких частях песчаника начинает преобладать окварцевание и слабая серицитизация цемента и т. д.

Таблица 14

Изменение состава и свойств песчанника с глубиной. По Ю. П. Зубареву, Б. А. Лыжикову и В. И. Никулину

Глубина, м	Физические свойства		Механические свойства		Состав компонентов, %		Преимущественный тип цементации по взаимоотношению це- мента и зерен	Состав цемента		
	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Абсолют- ная порис- тость, %	Предел прочности при одностороннем сжатии по образцам (в МПа)	Предел прочности при растяжении по методу раскалывания кернов, МПа	обломки породооб- разующих минералов	цемент				
									Правиль- ной формы	неправиль- ной формы
450	2,65	2,44	8,0	87	12,5	5	58—63	37—42	Базальный	Кварц-карбонатно-глинистый
530	2,65	2,48	6,4	88	12,9	5,2	60—67	33—40	Базально-порový	То же
800	2,65	2,50	5,7	90	13,9	5,4	65—70	30—35	Порово-контактový	Кварц-глинистый, местами глинисто-кварцевый
900	2,65	2,50	5,7	91	13,9	5,5	68—72	28—32	То же	То же
1240	2,65	2,54	4,2	102	15,6	7,4	80—85	15—20	Конформный	Глинисто-карбонатно-кварцевый
1430	2,64	2,53	4,2	108	17,5	8	82—85	12—18	Инколорационный	Кварцевый, местами глинисто-карбонатно-кварцевый

## ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ЛИТОГЕНЕЗА

### *Особенности формирования инженерно-геологических свойств глинистых пород\**

Седиментация континентальных осадков происходит в результате деятельности русловых водных потоков, ледников, ветра, склоновых процессов, вулканов и др., что приводит к формированию различных генетических типов осадков. Особенности генетических типов осадков, которые приобретены ими в процессе седиментации, достаточно полно освещены в специальной геологической литературе. Здесь же мы отметим те особенности континентальной седиментации, которые имеют большое значение для формирования состава и свойств континентальных осадков. Разнообразие способов континентальной седиментации способствует формированию большого количества генетических типов осадков — аллювиальных, озерно-аллювиальных, пролювиальных, ледниковых, водно-ледниковых, эоловых и др., каждый из которых характеризуется определенными инженерно-геологическими особенностями, такими, как тип строения толщи, слоистость, гранулометрический состав. В силу особенностей дифференциации веществ, динамики и режима осадконакопления континентальные осадки отличаются от осадков конечных водоемов стока более слабой сортировкой материала, незначительной мощностью, частой фациальной и литологической изменчивостью как по вертикали, так и по латерали, ограниченной площадью распространения.

Вследствие того, что свежееотложенные континентальные осадки в большинстве случаев не перекрыты постоянным покровом воды (как бассейновые) и поэтому являются открытой системой, на них тотчас же начинают воздействовать агенты внешней среды — просачивающаяся вода, несущая чуждые осадку элементы, микроорганизмы, изменения температуры, т. е. агенты выветривания.

Таким образом, процессы преобразования континентальных осадков в породе в начальной своей стадии существенно отличаются от диагенеза бассейновых осадков: они проходят в зоне гипергенеза, под воздействием гипергенных агентов, поэтому, как отмечал Н. М. Страхов, они отвечают стадии гипергенеза.

Процессы диагенетических преобразований континентальных осадков начинаются лишь после того, как они перекрываются толщей вновь образованных осадков, мощность которых достаточна для того, чтобы предохранить их от воздействия гипергенных агентов. Как отмечает Н. М. Страхов, интенсивность собственно диагенетических процессов, т. е. «внутреннего физико-химического уравнивания многокомпонентной системы веществ с противоречивыми свойствами», в данном случае существенно ослаблена,

---

\* Раздел написан А. С. Герасимовой.

так как эти осадки уже изменены под влиянием процессов выветривания.

В результате особенностей геологического развития различных регионов стадию континентального литогенеза в настоящее время проходят породы различного возраста: новейшие континентальные отложения, которые только начинают формироваться как породы, и более древние отложения различного генезиса, уже прошедшие различные стадии лито- и петрогенеза. Будучи выведенными на поверхность последние проходят стадию так называемого регрессивного литогенеза, т. е. формируется кора выветривания.

Мы остановимся на рассмотрении новейших континентальных отложений, которые в настоящее время под влиянием континентального литогенеза формируются как породы.

Новейшие континентальные отложения — это отложения широкого возрастного диапазона (от позднего олигоцена до современного), поэтому фактор времени их существования определенным образом влияет на формирование их свойств. Все новейшие континентальные отложения залегают в верхней части литосферы, но на различной глубине от поверхности земли. Формирование свойств тех отложений, которые залегают непосредственно с поверхности, обуславливается деятельностью гипергенных факторов.

Ф. А. Макаренко глубину зоны современного гипергенеза определяет уровнем местных базисов дренирования, для которой характерны нисходящее движение вод, повышенная их динамичность и ярко выраженный гипергенный характер развития. А. В. Щербаков считает, что местные или даже региональные базисы дренирования не всегда являются нижней границей зоны активных современных процессов. К зоне современного гипергенеза или активного окислительного выветривания он относит верхнюю часть литосферы (~1200 м), которая связана с окислительной средой подземных вод благодаря интенсивному или значительному их обмену с поверхностью.

Учитывая то, что зона гипергенеза — это открытая система, обменивающаяся веществом и энергией с окружающей средой, можно предполагать, что любые изменения физико-географической обстановки оказывают влияние на свойства пород в этой зоне.

Даже краткое рассмотрение особенностей континентального литогенеза показывает, что формирование свойств континентальных пород зависит от целого ряда факторов, главными из которых являются тип палео- и современного литогенеза, возраст и генезис осадка, его литологический состав, мощность, глубина залегания от поверхности, современная тепло- и влагообеспеченность территории. Поэтому именно в силу многофакторности этой системы (континентальных осадков) в целом вопросы континентального литогенеза до настоящего времени разработаны слабо. Однако эти вопросы очень важны, так как континентальные осадки распространены очень широко, особенно на платформах, залегающих в верхней части литосферы, и именно они чаще всего являются объектом строительной деятельности человека.

В этом плане очень интересной является Западно-Сибирская низменность, на примере которой мы и рассмотрим особенности континентального литогенеза. Она представляет собой молодую эпипалеозойскую платформу, для большей части территории которой характерно широкое развитие континентальных условий в различные геологические эпохи, в том числе и в новейшее время. Поэтому практически все новейшие отложения Западно-Сибирской платформы представляют собой континентальные образования. Особенности палеогеографического и тектонического развития Западно-Сибирской плиты в новейшее время определили развитие в ее пределах:

1) различных типов литогенеза — гумидного, аридного, ледового, границы между которыми менялись на различных этапах этого времени, в связи с чем осадки, отложившиеся в условиях одного типа литогенеза (например, ледового), формируются как породы уже в условиях другого типа литогенеза (гумидного);

2) широтной изменчивости в пространственном распространении различных генетических типов отложений (прибрежно-морских, дельтовых, моренных, аллювиально-озерных, аллювиальных, субаэральных), характеризующихся различными площадями распространения, мощностями, литологическим составом, строением толщ;

3) широтной зональности в распределении современной тепло- и влагообеспеченности, что в свою очередь определяет тип гипергенеза.

Эти особенности развития плиты способствовали достаточно сложному формированию свойств новейших пород под влиянием разнообразных факторов, действие каждого из которых трудно выделить, так как они нивелировали друг друга. Поэтому, чтобы лучше понять, как формируются инженерно-геологические особенности континентальных отложений в процессе литогенеза, мы рассмотрим отложения одного петрографического вида, одного генетического типа, но различного возраста, формирующихся в условиях одного типа литогенеза и одинаковой современной тепло- и влагообеспеченности, но залегающих на различной глубине от современной поверхности.

В качестве примера рассмотрим глинистые осадки центральной части Западно-Сибирской плиты, наиболее распространенные среди континентальных отложений аллювиального и аллювиально-озерного генезиса различного возраста — от позднеолигоценового до современного, формирующиеся в условиях гумидного климата, который характеризуется в настоящее время достаточной теплообеспеченностью и избыточным увлажнением. Верхнеолигоценовые отложения залегают на глубинах 10—50 м. Все четвертичные отложения слагают с поверхности разновозрастные, врезанные одна в другую равнины. Инженерно-геологическое изучение этих отложений дало возможность выделить три группы, каждая из которых характеризуется определенными закономерностями в изменении их свойств [5].

К первой группе относятся аллювиальные голоценовые глинистые осадки пойм рек. Свойства отложений этой группы тесно связаны с их фациальной принадлежностью, определяются их гранулометрическим составом и зависят от степени дренированности территории. Для этой группы в целом характерны наиболее высокие значения влажности (25 % у суглинков легких, 45 % у глин), пористости (более 50 %) и очень низкие показатели плотности, прочности и объемной массы скелета (от 1,3 г/см<sup>3</sup> у суглинков легких до 1,11 г/см<sup>3</sup> у глин). Кроме того, высокие показатели верхнего и нижнего пределов пластичности, как правило, не соответствуют содержанию глинистых частиц (обычно превышают). С. И. Черноусов объясняет это «молодостью» осадков поймы и высоким содержанием в них легкоподвижных органических соединений, повышающих активность глинистых частиц. Осадки находятся преимущественно в пластичном состоянии, реже — в скрытотекучем. Коэффициент уплотнения всех глинистых осадков пойменной фации, как правило, не превышает 0,5. Глинистые осадки старичного аллювия отличаются от пойменного более низкими значениями объемной массы скелета (до 0,92 г/см<sup>3</sup>), более высокими значениями пористости (55—58 %).

Изменений свойств глинистых осадков по глубине, как правило, не происходит, и лишь на осушенных дренированных участках в самой верхней части разреза (до глубины 0,5 м) наблюдается уменьшение влажности в летнее время года (до 15 %), и здесь они имеют твердое или полутвердое состояние.

Таким образом, для глинистых осадков поймы характерны: 1) четкое разделение глинистых осадков по совокупности свойств на гранулометрические виды; 2) изменение свойств глинистых осадков в зависимости от их фациальной принадлежности; 3) зависимость их состояния от степени дренированности территории. Эти особенности глинистых осадков поймы свидетельствуют о том, что структурные связи в них только еще начинают формироваться и поэтому их свойства являются чутким индикатором любых изменений обстановки осадконакопления и современного существования. Глинистые осадки, залегающие с поверхности, под влиянием агентов выветривания теряют влажность и «окаменевают».

Ко второй группе относятся глинистые отложения неоген-позднечетвертичного возраста. Это аллювиальные верхнечетвертичные глинистые отложения I, II и III надпойменных террас и аллювиально-озерные глинистые отложения среднечетвертичного и плиоцен-раннечетвертичного возраста. Достаточно близкие условия их осадкообразования, сравнительно небольшие мощности (10—50 м) и современные условия залегания (с поверхности разновозрастных равнин) определили одинаковые или близкие особенности их литогенеза. Они заключаются в том, что породы этой группы на значительную глубину представляют собой открытые системы, обменивающиеся веществом и энергией с окружающей средой; в их толще происходят постоянные изменения температуры, влажности, миграция элементов. Для пород этой группы характерно отсутст-

вие химического равновесия. Все это приводит к тому, что их свойства закономерно изменяются с глубиной. По глубине залегания выделено три подгруппы глинистых отложений: 0—3; 3—6; более 6 м. Для каждой из этих подгрупп характерны определенные закономерности в изменении свойств.

Глинистые отложения первой подгруппы входят в зону гипергенеза. Свойства их формируются под воздействием процессов почвообразования и выветривания. Здесь наиболее активно протекают химические реакции (карбонатизация, окисление и пр.), разложение минералов, вынос химических элементов, процессы агрегации частиц и т. д. Для этой подгруппы характерно отсутствие зависимости свойств отложений от возраста. Свойства зависят от гранулометрического состава и степени дренированности территории. В целом для них отмечаются высокая агрегированность частиц, высокая пористость и макропористость, наличие признаков облёссованности, сезонные изменения их состояния. Это незасоленные отложения с высокой естественной влажностью (30—35 %), низкими значениями объемной массы (1,47—1,69 г/см<sup>3</sup>), мягкопластичной консистенции. На дренированных участках влажность их уменьшается до 20 %, консистенция становится полутвердой, отчетливее видны признаки облёссования. Отложения того же возраста и генезиса, залегающие на этих же глубинах, но формирующиеся в условиях аридного климата (юг Западно-Сибирской плиты), характеризуются высокой карбонатностью и загипсованностью, низкой влажностью (10—15 %), твердой консистенцией и просадочными свойствами. Глинистые отложения второй подгруппы также входят в зону гипергенеза. Свойства их формируются под влиянием процессов выветривания и главным образом под влиянием колебаний температуры и влажности. Для них характерен наиболее широкий разброс свойств, которые связаны и с возрастом отложений, и с их гранулометрическим составом, и с условиями дренированности территории.

Влияние процессов выветривания на породы с глубиной постепенно ослабевает и примерно с 6 м (третья подгруппа) ощущается слабо. С этой глубины, очевидно, и начинают превалировать те процессы «физико-химического уравнивания сложной и многокомпонентной системы реакционноспособных веществ в термодинамических условиях поверхности земной коры», которые Н. М. Страхов называет диагенезом осадка. На этих глубинах отчетливо прослеживается следующая закономерность в изменении свойств глинистых отложений: легкие гранулометрические виды (в основном супеси и легкие суглинки) обладают различными свойствами в зависимости от возраста, свойства же более тяжелых гранулометрических видов достаточно близки и не зависят от их возраста. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что глинистые отложения, залегающие на одинаковых глубинах, независимо от возраста, находятся на одинаковой стадии литогенеза, а именно — начальной.

В тяжелых суглинках и глинах, как более реакционноспособ-

ных разностях, процессы диагенетических преобразований протекают с большей интенсивностью, что и приводит к нивелировке их свойств. Все глинистые отложения рассматриваемой подгруппы характеризуются высокими показателями естественной влажности (20—30 %), высокой пористостью (до 45 %), небольшой плотностью (коэффициент уплотненности 0,44—0,62), высокой гидратированностью. Породы находятся в пластичной или мягкопластичной консистенции. В соответствии с небольшой уплотненностью и высокой гидратированностью находятся и невысокие показатели прочности этих отложений.

Таким образом, для рассматриваемой группы глинистых отложений характерны: резкие изменения свойств пород сверху вниз по разрезу до глубины 6 м, разуплотнение пород в верхней части разреза и образование лёссовых пород, изменение свойств в зависимости от возраста ниже глубины 6 м только у легких гранулометрических видов глинистых отложений.

В группе глинистых пород позднеолигоценового возраста все гранулометрические виды по показателям свойств практически не различаются. Для них характерны высокие значения естественной влажности (34—35 %), пористости (до 45 %), довольно низкие значения объемной массы скелета (1,35—1,39 г/см<sup>3</sup>). Значения влажности нижнего предела пластичности (31—33 %) всегда ниже их естественной влажности, что свидетельствует о высокой гидратированности пород. Несмотря на это в естественном залегании породы имеют полутвердую или тугопластичную консистенцию. Глинистые породы характеризуются довольно высокими значениями коэффициента уплотненности (0,71—2,14), обладают водостойкостью, практически не набухают и не размокают в воде. При нарушении естественной структуры их сжимаемость увеличивается вдвое, и они быстро размокают в воде.

Таким образом, изучение свойств разновозрастных аллювиальных и аллювиально-озерных глинистых отложений, формирующихся в гумидных условиях и залегающих на различных глубинах, дает возможность выявить особенности формирования их свойств в процессе континентального литогенеза.

1. Континентальные осадки (и в том числе аллювиальные) практически сразу же после своего осаждения, как и указывал Н. М. Страхов, находятся под воздействием агентов выветривания и почвообразования и прежде всего колебаний температуры и влажности. Наиболее существенное влияние на осадок оказывают сезонные колебания температуры и влажности. Эти факторы и определяют процессы, происходящие в свежееотложенных осадках: промерзание — протаивание, увлажнение — высыхание, вынос частиц и солей, окисление, карбонатизация и т. д. Поэтому эту стадию преобразования осадков нельзя называть диагенезом. Именно эту стадию Л. Б. Рухин предлагал называть экзодиагенез.

В летний период из осадков интенсивно испаряется вода, происходит быстрая их дегидратация, что приводит к появлению трещин, агрегация минеральных частиц, окисление железистых и



марганцовистых соединений, благодаря чему осадки приобретают бурый цвет и цементируются находящимися в воде солями. Осадки как бы «окаменевают». Промерзание и последующее оттаивание приводит к появлению в них пористости и макропористости. В современных пойменных условиях четко проявляется такая картина. Глубина такого существенного изменения осадка за один сезон не превышает нескольких сантиметров. Если же осадки оказываются на поверхности более длительное время, то мощность осадка, свойства которого формируются под воздействием этих процессов, увеличивается до 0,5 м. На более высоких поверхностях — I, II, III надпойменных террасах, среднеплейстоценовой и плиоцен-нижнеплейстоценовой равнинах, где осадки одновозрастные равнинам, залегают с поверхности десятки, а иногда и сотни тысяч лет; мощность осадков, свойства которых формируются под влиянием процессов выветривания и почвообразования, равняется 3 м, т. е. сопоставима со средней глубиной сезонных колебаний температур, свойственной данной территории.

2. На осадки современной поймы, погребенные на глубину более 0,5 м, влияние факторов выветривания — просачивающейся сверху вниз воды, колебаний температур — продолжает сказываться, но уже в меньшей степени, и в них начинают проявляться процессы «внутреннего физико-химического уравнивания многокомпонентной системы веществ», которые Н. М. Страхов и называет диагенезом осадка. С этой глубины, собственно, осадки и начинают приобретать те особенности, которые присущи аллювиальным отложениям. В силу «молодости» осадков поймы и сравнительной кратковременности действия этих процессов все особенности среды осадконакопления, т. е. фациальные особенности, четко проявляются в свойствах осадка.

Таким образом, глинистые осадки различных фаций аллювия поймы четко различаются по инженерно-геологическим свойствам. Но так как взаимодействие процессов физико-химического уравнивания веществ в осадке и процессов выветривания происходит по всей мощности осадков поймы, а следовательно, их свойства формируются по всей глубине под влиянием этих двух процессов, то изменения свойств глинистых осадков различных фаций поймы по глубине не наблюдается.

В более древних аллювиальных и аллювиально-озерных отложениях взаимное влияние процессов выветривания и физико-химического уравнивания веществ на формирование их свойств наблюдается на глубинах 3—6 м, т. е. совпадает с глубинами годовых колебаний температур. Именно в пределах этих глубин наблюдается наибольший разброс показателей инженерно-геологических свойств глинистых отложений, обусловленный главным образом их возрастом (то есть длительностью воздействия на осадки процессов, формирующих их свойства) и гранулометрическим составом.

3. С глубины 6 м аллювиальные глинистые осадки, пройдя более или менее длительное воздействие процессов выветривания,

вступают в начальную стадию диагенеза. Именно с этой глубины наблюдаются закономерные изменения их свойств с глубиной (уменьшение влажности, пористости, увеличение плотности, прочности). Процессы, происходящие на этой стадии, приводят к тому, что тяжелые гранулометрические разности (тяжелые суглинки — глины) независимо от их возраста обладают близкими инженерно-геологическими свойствами.

4. Более поздние стадии диагенеза континентальных осадков приводят к тому, что инженерно-геологические свойства глинистых отложений не зависят от их гранулометрического состава.

#### *Особенности формирования инженерно-геологических свойств лёссовых пород \**

В последнюю четверть века исследованиями отечественных мерзловедов (И. Д. Данилов, Е. М. Катасонов, А. И. Попов, Н. Н. Романовский, П. А. Шумский) разработана стройная теория континентального криолитогенеза, отчетливо проявившегося в течение плейстоцена, голоцена и современных эпох. Со сложными физико-химическими, химическими, механическими процессами криолитогенеза и связано формирование основных специфических литологических и инженерно-геологических особенностей лёссовых пород.

В вопросе о природе инженерно-геологических свойств лёссовых пород следует особо строго различать две стадии континентального литогенеза: 1) седиментогенез, т. е. накопление минерального осадка различными генетическими путями в разнообразной фациальной и климатической обстановках; 2) превращение осадков в просадочную, лёссовую горную породу в результате сложного комплекса физико-химических, химических и криогенных процессов. Именно вторая стадия литогенеза имеет решающее значение в формировании инженерно-геологических особенностей лёссовых пород, так как дает ключ к познанию природы их просадочных свойств.

Современные научные достижения отечественных четвертичной геологии, палеогеографии, палеопедологии, криолитологии, мерзловедения и грунтоведения дают возможность установить два принципиально важных положения, позволяющих объяснить природу просадочных свойств лёссовых пород.

1. В плейстоценовой истории территории СССР эпохи лёссовобразования связаны с общепланетарными похолоданиями климата и территориально приурочены к перигляциальным зонам оледенений.

2. В своей геологической жизни они неоднократно находились в многолетне- и сезонном мерзлом состоянии, т. е. прошли в процессе формирования стадию криолитогенеза.

Лёссовые толщи на территории СССР, независимо от возраста, способа аккумуляции исходного материала, принадлежности к тек-

---

\* Раздел написан А. В. Минервиным.

тоническим регионам и почвенно-климатическим зонам имеют единую структуру и состоят на 80—90 % из устойчивых при взаимодействии с водой структурных элементов шаровидной и эллипсоидной формы размером 0,1—0,01 мм сложного внутреннего строения. Структурные элементы лёссовых пород представляют собой концентрические агрегаты-глобулы, состоящие из следующих частей: ядро глобулы — элементарные блоки первичных минералов (кварца, реже — полевого шпата) правильной кристаллической формы; ядро окружено тонкой, дырчатой кальцитово-оболочкой, поверх которой располагается поверхностная «рубашка» сложного строения; в составе последней находятся глинистые минералы, окислы железа, аморфная кремнекислота, тонкодисперсные кварц и карбонаты.

По современным кристаллографическим представлениям, кристаллы кварца и полевых шпатов — ядра лёссовых глобул — имеют дефектную структуру и состоят из отдельных блоков в 10—100 мкм, разделенных между собой дислокационными каналами. В суровой климатической обстановке плейстоцена в областях оледенения платформ и горных сооружений, обрамляющих современные лёссовые территории и являющихся для них источниками питания, происходила криогенная дезинтеграция кварца и полевых шпатов в породах до уровня микроблоков за счет их разрушения под действием замерзающей воды в дислокационных каналах. Таким образом формировалась исходная тонкопесчаная и пылеватая фракции лёссовых пород. Криогенное дробление приводило к возникновению сложных поверхностных явлений на образующихся частицах, что в условиях насыщенности природных вод перигляциальных зон ионами  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$  обуславливало образование на поверхности микроблоков кварца и полевых шпатов дырчато-ячеистых оболочек карбонатов [45].

Исследованиями гляциологов и криолитологов в течение последнего десятилетия особое внимание уделяется присутствию в составе талых вод значительного количества растворенной углекислоты, что делает возможным в толщах пород деятельного слоя областей питания лёссовых пород протекания интенсивных процессов химического выветривания с образованием характерных глинистых минералов, аморфной кремнекислоты, продуктов гидрогетитового и гидраргиллитового составов, тонкодисперсных карбонатов. При попеременном промерзании и протаивании в лёссовой толще происходит физико-химическая адсорбция продуктов химического выветривания пород и минералов на кварц-полевошпатовых блоках, что приводит к формированию полиминеральной поверхности «рубашки» глобул. Глобулярная структура лёссовых пород обуславливает специфику их инженерно-геологических свойств и, в первую очередь, просадочность. Последняя является функцией их пористости, влажности и величины действующего на них давления.

Исходя из теоретически возможного размещения идеальных шаров-глобул пористость дисперсной лёссовой системы может из-

меняться от 26 до 47,6 %; просадочной, как правило, равна 46—50 %. Глобулярное строение лёссовых пород свидетельствует о том, что их просадочные разности в условиях естественного залегания находятся в максимально рыхлом состоянии, что подтверждает разуплотняющее воздействие процессов криолитогенеза. Просадочные лёссовые грунты характеризуются высоким (более 80 %) содержанием межагрегатных пор в 0,01—0,05 мм. Незначительное отклонение в сторону увеличения пористости (более 48 %) отмечается у лёссов с высоким содержанием макропор (более 0,1 мм).

Непросадочные разности лёссовых пород имеют значение общей пористости 35—40 % и характеризуются высоким содержанием межагрегатных пор менее 0,01 мм. Таким значениям общей пористости системы и дифференциальному распределению пор по размерам соответствует схема упаковки идеальных шаров-глобул, близкая к наиплотнейшей. Отклонения от теоретически минимальных значений пористости связаны с наличием тонкой внутриагрегатной пористости в пределах сложной полиминеральной «рубашки» глобул.

Структурная прочность лёссовых пород и, как следствие этого, просадочность, существенно зависят от влажности. Они теряют просадочные свойства при влажности, близкой к влажности максимальной молекулярной влагоемкости. По данным Р. И. Злочевской, потеря породой просадочных свойств происходит тогда, когда величина капиллярного давления в углах пор становится соизмерима с силой притяжения двух глобул через моно- и полиадсорбционную влагу, что приводит к разъединению последних.

Результаты многолетних исследований природы просадочности лёссовых пород в геологической истории различных регионов СССР показывают, что просадочные свойства могут формироваться двумя путями:

1) путем сублимации льда из высокопористых распученных пылеватых осадков различного генезиса;

2) в результате геологически быстрой деградации мерзлоты в лёссовых породах с одновременным сильным иссушением толщи. Современные лабораторные исследования влагопереноса в промерзающих и оттаивающих лёссовых и других дисперсных породах свидетельствуют, что при относительно быстром оттаивании происходит ускоренное испарение тонких пленок связанной и капиллярной воды при таянии кристаллов льда в порах; при этом сохраняется высокая пористость и прочность специфических структурных связей ионно-электростатической природы между частицами лёссовых пород. Последнее положение подтверждается полевыми модельными экспериментами сингенетического промерзания в современной климатической обстановке Минусинского межгорного прогиба.

Новейшие исследования (А. В. Минервин, Н. Н. Комиссарова, Э. Д. Ершов и др.) промерзания и оттаивания показали, что картина осложняется наличием в лёссовых породах воднорастворимых солей, когда поровые растворы представляют собой электролиты.

Так, при полном водонасыщении лёссовых грунтов, имеющих сухой остаток около 0,5 %, концентрация порового раствора достигает 10 г/л. При промерзании водонасыщенных лёссовых пород происходит дифференциация порового раствора по концентрации. При 0°C замерзает пресная свободная вода, что приводит к увеличению концентрации солей в еще незамерзшем объеме воды. Последнее вызывает понижение температуры замерзания оставшейся части воды. Так, содержание незамерзшей влаги в лёссовых грунтах в зависимости от исходной дисперсности по данным контактного метода при температуре —5°C достигает 2,5—6,5 %. Существенная роль при этом принадлежит внутриагрегатным порам (в пределах поверхностной «рубашки» глобул).

Следует предположить, что в процессе оттаивания при повышении температуры сначала переходит в жидкое состояние засоленная часть льда в порах. Образующийся при этом электролит испаряется в условиях отрицательных температур. Таким образом, при повышении температуры происходит постепенное вытаивание льда из пор, сопровождающееся непрерывным испарением талой воды, что приводит к дегидратации грунта еще до достижения им положительной температуры. Подобные явления обеспечивают сохранение в процессе оттаивания высокой пористости породы, образующейся за счет криогенного расширения воды при промерзании глобулярной системы.

Изложенный материал дает основание утверждать, что просадочность лёссовых пород сформировалась в результате воздействия комплекса постседиментационных процессов в суровой перигляциальной обстановке временных отрезков плейстоцена при решающей роли процессов криолитогенеза; просадочность формируется и в голоцене, после климатического оптимума, в результате криоэлювиального воздействия на различные породы.

#### *Особенности формирования инженерно-геологических свойств песчаных пород\**

В аллювиальном седиментогенезе песчаные осадки образуются во всех фациях аллювия: русловой, пойменной, старичной, каждая из которых характеризуется своими кислотно-щелочными и окислительно-восстановительными условиями. В хорошо отмытых песках русловой фации (пески пристрежневой зоны и русловых отмелей) ввиду небольшого содержания органического вещества и карбонатов создается ярко выраженная окислительная слабощелочная среда, в которой идут процессы образования гидроокислов железа, преимущественно окисно-растворимого  $Fe^{3+}$ , окрашивающего осадок в бурый цвет. Там, где пески содержат повышенное количество окислительных веществ (заиленные участки русловых отмелей), окислительно-восстановительный потенциал снижается, усиливается деятельность анаэробных бактерий, активизируются восстано-

---

\* Раздел написан П. И. Фадеевым.

вительные процессы, в связи с чем в балансе форм реакционного железа начинает преобладать закисное  $Fe^{2+}$ , а в качестве минеральных новообразований появляются гидроокислы железа (гидротроиллит, мельниковит?, пирит), кальцит, реже вивианит.

В фациальном профиле пойменного аллювия количество органического вещества в песчаных осадках увеличивается в направлении от русла в глубь поймы. Содержание карбонатов, наоборот, падает от десятых долей процента — в песках прирусловых валов до почти полного исчезновения — в песках приречной и внутренней поймы. В том же направлении понижается и pH. Поскольку пойменные песчаные осадки большую часть времени пребывают в субаэральных условиях, то им свойственны наиболее высокие значения Eh, хотя и меняющиеся от увлажнения осадков. В качестве минеральных новообразований в них преобладают гидроокислы железа и марганца.

В старичных заиленных песках, для которых характерно постоянство субаквальных условий (устойчивая восстановительная слабокислая среда, повышенное содержание органического вещества и т. д.), содержится наибольшее количество железа и марганца преимущественно в форме закисных соединений, с которыми связаны такие минеральные новообразования, как лейкоксен, сидерит, кальцит, вивианит, гидротроиллит, пирит, арагонит, опал и др.

Процессы континентального литогенеза в песках слабо освещены, что, видимо, объясняется трудностью их выделения из большой совокупности процессов гипергенеза. К ним с определенной степенью условности можно было бы отнести образование на песчаных частицах кремневых и карбонатных корочек, «пустынного загара», частичную цементацию песков, образование песчаников в условиях пустынь и полупустынь.

## ГЛАВА 8.

### **МАССИВЫ И ТОЛЩИ ГОРНЫХ ПОРОД В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ**

#### **ПОНЯТИЕ О МАССИВЕ И ГРУНТОВОЙ ТОЛЩЕ**

Горные породы слагают массивы различного размера и строения, служащие объектом изучения при инженерных изысканиях. Их инженерно-геологические особенности являются сложной функцией многих параметров горных пород (состав, условия залегания, состояние, свойства и др.), которые их формируют. Проблема изучения этих особенностей, оценка деформируемости и устойчивости массива горных пород всегда занимала одно из центральных мест в инженерной геологии. Особенно большое значение она приобрела в последние десятилетия, когда резко возросли размеры инженерных сооружений, многие из них заглублены в массивы на сотни метров. Однако, несмотря на это, многие вопросы этой проблемы

не получили до сих пор однозначной трактовки. Это относится и к содержанию понятия «массив горных пород».

В инженерно-геологической литературе четко обособились два принципиально различных подхода к рассмотрению содержания понятия «массив горных пород». Представители первого (Л. Д. Белый, Г. А. Голодковская, М. Матула, Л. В. Шаумян и др.) рассматривают его содержание вне конкретной связи с инженерным сооружением. Сторонники второго направления (П. Н. Панюков, Г. А. Марков, Л. Мюллер, М. В. Рац и др.), наоборот, увязывают содержание и объем понятия «массив горных пород» со сферой воздействия инженерного сооружения.

Содержание рассматриваемого понятия, отвечающее взглядам сторонников первого из отмеченных подходов, наиболее четко сформулировали Г. А. Голодковская и Л. В. Шаумян [8]. Они писали: «Под массивом скальных горных пород понимают геологическое тело, образующее геологическую структуру или часть ее, сформировавшееся в определенной геолого-структурной и палеогеографической обстановке и характеризующееся присущими только ему геологическими, гидрогеологическими и инженерно-геологическими закономерностями». Четко видно, что массив определяется как объективно существующее естественное геологическое тело, независимо от того, находится оно во взаимодействии с инженерным сооружением или последнее отсутствует. Это аргументируется следующими положениями: 1) в строении массивов, представленных совокупностью разных горных пород или одной горной породой, наблюдаются различные по своим размерам компоненты, диапазон изменения которых непостоянен и не зависит от инженерных задач, обусловленных конкретным видом строительства, а определяются геологической природой этого массива как физического тела; 2) массив горных пород может всесторонне изучаться и до того, как возник инженерный замысел о возведении в данном месте того или иного сооружения; 3) массив горных пород везде и всегда прежде всего геологический объект, представляющий собой систему с определенным соотношением элементов. Они инвариантны, т. е. сохраняются в системе практически постоянно, и требуют тщательного геологического изучения, не допуская никаких целенаправленных инверсий или подмены их неадекватными аргументами [3].

Все эти аргументы достаточно справедливы. Однако такой подход может быть оправдан лишь на первом этапе изучения объекта. Не имея данных о планируемом объекте, мы не можем четко судить ни о размерах массива, ни о задачах и глубине его изучения, что совершенно необходимо на последующих этапах работ, при проведении инженерно-геологических изысканий.

По-иному определяют рассматриваемое понятие сторонники второго подхода. П. Н. Панюков писал, что 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 ин-

женерно-геологической структурой, отличной от структуры соседних с ним участков земной коры. Л. Мюллер [30] подчеркивал, что под «горным массивом следует подразумевать не географическую или тектоническую единицы, а, согласно разговорной терминологии горняков, строителей тоннелей и др., ту горную породу, в которой производятся работы». М. В. Рац предлагал понимать под массивом горных пород «связную область земной коры, соизмеримую с основанием инженерных сооружений». Близкую позицию занимают Я. Дзеваньский, И. С. Комаров, Л. А. Молоков, Ф. Ройтер. Они понимают «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, тепловыми и др.)». Подчеркивается, что в теоретическом плане массив горных пород можно рассматривать как сложную геологическую систему, обладающую некоторыми общими характеристиками: структурой, вещественным составом, физическим состоянием, определенными свойствами и динамикой.

Все эти определения имеют принципиальное единство: массив горных пород рассматривается как геологический объект, взаимодействующий с конкретным инженерным сооружением или комплексом сооружений. В соответствии с этим его границы определяются не только геолого-структурными (или шире — инженерно-геологическими) особенностями осваиваемой территории (как при первом из описанных подходов), но и типом сооружений, их размерами, характером взаимодействия с природной средой и другими факторами. Это обуславливает большую четкость существа рассматриваемого понятия, его объем, что имеет явные преимущества как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Следует подчеркнуть, что по существу сторонники первого и второго подходов говорят о разных понятиях, о разных объектах исследований. Представители первого направления исследуют массив горных пород с инженерно-геологических позиций как природную геологическую систему, второго — как природно-техническую систему. С этим связаны и различия в употребляемой терминологии. Представляется целесообразным в первом случае говорить о «массиве горных пород», рассматривая это словосочетание как термин свободного пользования, во втором — об «инженерно-геологическом массиве». Объем последнего рационально рассматривать в полном объеме сферы воздействия инженерных сооружений на горные породы. Под сферой воздействия Н. В. Коломенский предложил понимать массу горных пород, в пределах которой могут произойти те или иные изменения естественных условий в процессе строительства и эксплуатации сооружения.

В последние годы в публикациях по вопросам инженерной геологии стал широко использоваться термин «грунтовая толща», вве-



денный в инженерную геологию М. М. Филатовым еще в 1936 г. В большинстве случаев он употребляется как термин свободного пользования для наименования любой совокупности горных пород, характеризуемой в инженерно-геологических целях. Конкретизируя его, П. И. Фадеев в 1963 г. предложил понимать под грунтовой толщей толщу горных пород и почв, находящихся в зоне активного воздействия инженерного сооружения. По существу, аналогичный смысл термину «грунтовая толща» придавали Е. М. Сергеев, А. С. Герасимова, А. В. Груздов и др. При таком понимании содержания этого понятия, он по существу становится логическим синонимом понятия «инженерно-геологический массив».

### **ГРУНТОВЫЕ ТОЛЩИ, ПРИЗНАКИ ИХ ВЫДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ**

При исследованиях в связи с наземным строительством под грунтовой толщей понимают толщу горных пород и почв, слагающую верхнюю часть разреза различных геоморфологических элементов и находящуюся (или в большинстве случаев могущую попасть) в сфере влияния инженерных сооружений. Ее мощность определяется, исходя из задач, стоящих перед исследователем.

Границы грунтовой толщи условны и зависят от цели и признаков, которые используются для ее выделения [10]. Поскольку понятие о грунтовой толще всецело связывается с взаимодействием геологических тел и инженерных сооружений, то верхняя и нижняя границы, а также ее мощность будут зависеть не только от геологического строения территории, но и от типа сооружений, их размеров, массы и других факторов. При строительстве наземных сооружений верхняя граница грунтовой толщи совпадает с «дневной» поверхностью литосферы, а положение нижней границы (и соответственно мощность толщи), определяемое вышеназванными признаками, окажется существенно неодинаковым при решении разных задач.

Латеральные границы грунтовой толщи в процессе инженерно-геологических изысканий определяются размером (площадью) сферы влияния проектируемого инженерного сооружения или его комплекса; при мелко- и среднemasштабном картировании в качестве таких границ выступают естественные границы грунтовых толщ разных иерархических уровней.

Грунтовые толщи могут существенно различаться как по своему генезису, так и по особенностям строения, состава, состояния и свойств. В связи с этим и генетические, и морфологические признаки могут быть использованы для выделения грунтовых толщ и их иерархического подразделения. Выбор признаков определяется целью исследования. Однако одновременное использование этих признаков далеко не всегда является необходимым, а одновременное применение их на одном этапе подразделения грунтовых толщ является ошибочным, ведет к смешению получаемых понятий.

Наибольший научный и особенно практический интерес представляют грунтовые толщи (точнее, иерархическая система грунтовых толщ), обособленные на основе морфологических признаков, поскольку они определяют условия возведения и эксплуатации инженерных сооружений. Среди них важнейшими являются признаки, отражающие особенности состава, строения, современного состояния и свойств грунтовых толщ. Именно они использовались различными исследователями при выделении и классификации грунтовых толщ. Покажем особенности этого подхода на примере разработок, выполненных применительно к территории Нечерноземной зоны европейской части РСФСР.

В этой работе, как и в разработках Е. М. Сергеева, А. С. Герасимовой, А. В. Груздова, Д. Г. Зилинга, для выделения иерархической системы грунтовых толщ использовались признаки двух групп. Первая включает показатели состава и строения толщ, вторая — современное их состояние.

Признаки первой группы позволили обособить грунтовые толщи четырех иерархических (структурных) уровней. Первый уровень представлен толщами, сложенными грунтами одного класса, и разных классов (табл. 15). Их выделение проведено по числу классов грунтов, участвующих в сложении грунтовой толщи\*.

На втором структурном уровне в качестве классификационного признака обособления выступает характер классов грунтов, слагающих толщу. По этому признаку грунтовые толщи, сложенные грунтами одного класса, подразделяются на дисперсные и скальные. Грунтовые толщи, сложенные грунтами разных классов, в свою очередь подразделяются на три категории: а) дисперсные, подстилаемые скальными; б) скальные, подстилаемые дисперсными; в) скальные и дисперсные переслаивающиеся.

Понятия второго структурного уровня по числу пород, слагающих грунтовые толщи, подразделены на однопородные, двухпородные и многопородные (третий уровень). Первые представляют собой толщи, мощности которых не менее чем на 96% \*\* сложены одной литологической разностью. Двухпородные — это толщи, мощности которых также не менее чем на 96% представлены двумя породами, причем мощность каждой из них составляет не менее 5% общей мощности грунтовой толщи. Многопородные толщи сложены тремя и более породами.

Понятия третьего структурного уровня при делении их по литологическим особенностям пород в разрезе образуют четвертый структурный уровень, который соответствует конкретным литологическим типам грунтов (см. табл. 15).

Ряд использованных здесь терминов и положений требует пояснений. Прежде всего это касается значения термина «порода»,

---

\* Классы и типы грунтов выделяются в соответствии с общей классификацией грунтов Е. М. Сергеева и др.

\*\* Эта граничная цифра определяется задачами исследований. При работах в Нечерноземной зоне такое значение было обусловлено стремлением учесть наличие в разрезе грунтовой толщи слоя торфа мощностью не менее 0,4 м.

Таблица 15

Схема подразделения грунтовых толщ. По В. Т. Трофимову и П. И. Фадееву

Грунтовые толщ			С однородным состоя																					
			немерзлые и талые																					
			$t > 3^\circ$			$t = 1-3^\circ$			$t = 0-1^\circ$															
			а	б	в	а	б	в	а	б	в													
Сложенные грунтами одного класса	Скальные	однородные	1																					
			2																					
			3																					
			4																					
			5																					
			6																					
	Дисперсные (рыхлые)	двухпородные	7																					
			8																					
			9																					
			10																					
			11																					
			12																					
			13																					
			14																					
			15																					
			16																					
			17																					
			18																					
			19																					
				многопородные	20																			
	21																							
	22																							
	23																							
	24																							
	25																							
	26																							
	27																							
	28																							
	29																							
	30																							



Грунтовые толщи				С однородным состоя																				
				немерзлые и талые																				
				t > 3°			t = 1—3°			t = 0—1°														
				а	б	в	а	б	в	а	б	в												
Сложенные грунтами различных классов	дисперсные, подстилаемые скальными	двухпородные	31																					
			32																					
			33																					
			34																					
		многopодные	35																					
			36																					
			37																					
			38																					
			39																					
			40																					
			41																					
			42																					
			43																					
			44																					
			45																					

Примечание. 1 — скальные; 2 — крупнообломочные; 3 — песчаные; 4 — 8 — крупнообломочные и песчаные переслаивающиеся, с преобладанием крупнообломочных и крупнообломочные переслаивающиеся, с преобладанием песчаных в верхней части славяющиеся с преобладанием песчаных в верхней части толщи; 13 — лёссовые, песчаными (15); 16 — глинистые и песчаные переслаивающиеся, с преобладанием глинистых ными (18) и глинистыми (19); 20 — преимущественно крупнообломочные; 21—23 — фяным слоем (23) в верхней части толщи; 24 — преимущественно песчаные; 25—26 — толщи; 27 — преимущественно глинистые; 28—29 — преимущественно глинистые, с песчаным 31—34 — подстилаемые скальными крупнообломочные (31), песчаные (32), глинистые (33) и торфяные (34); 35—38 — преимущественно крупнообломочные, подстилаемые скальными 39—41 — преимущественно песчаные, подстилаемые скальными (39) и в верхней части торфяным слоями (44); 45 — преимущественно торфяные, подстилаемые скальными; а — стые; д — сильнольдистые; е — увлажненные, подстилаемые льдистыми; ж — увлажненные, сильноувлажненные, подстилаемые сильнольдистыми.

который используется в ряде словосочетаний. Оно условно. Выделяется шесть разновидностей пород: скальные, грубообломочные, песчаные, лёссовые (лёссы и лёссовидные суглинки, просадочные при нагрузке 0,3 МПа), глинистые и торфяные. Следовательно, «порода» в данном случае — совокупность определенных литологических (или петрографических) разновидностей грунтов, объединяемых общностью ряда свойств, важных в инженерно-геологическом отношении.

нием по разрезу						С неоднородным состоянием по разрезу			
многолетнемерзлые						талые в верхней части, многолетнемерзлые в нижней			
t=0÷-1°		t=-1÷3°		t<-3°		с температурой, близкой к 0 °С			
г	д	г	д	г	д	е	ж	з	и

лёссовые; 5 — глинистые; 6 — торфяные; 7 — крупнообломочные, подстилаемые песчаными; в верхней части разреза; 9 — песчаные, подстилаемые крупнообломочными; 10 — песчаные разреза; 11 — песчаные, подстилаемые глинистыми; 12 — песчаные и глинистые пере- подстилаемые песчаными; 14—15 — глинистые, подстилаемые крупнообломочными (14) и в верхней части толщи: 17—19 — торфяные, подстилаемые крупнообломочными (17), песча- преимущественно крупнообломочные, с песчаным слоем (21), глинистым слоем (22) и тор- преимущественно песчаные с глинистым (25) и торфяным слоями (26) в верхней части (28) и торфяным слоем (29) в верхней части толщи; 30 — преимущественно торфяные; (35) и в верхней части толщи с песчаным (36), глинистым (37) и торфяным слоями (38); толщи с глинистым (40) и торфяным слоями (41); 42—44 — преимущественно глинистые, подстилаемые скальными (42) и в верхней части толщи с песчаным (43) и слабоувлажненные; б — увлажненные; в — сильноувлажненные; г — слабоблистые и льди- подстилаемые сильнольдистыми; з — сильноувлажненные, подстилаемые льдистыми; и —

При определении понятий «одно- и двухпородные грунтовые толщи» мощность пород, участвующих в сложении грунтовой тол- щи, ограничивается определенными рамками (см. выше). Даже в однопородных толщах 4 % их мощности могут быть представлены другой породой. Тем более это очевидно для двухпородных толщ. Части толщ, представленные определенными породами, условно названы слоями. Минимальная их мощность принималась в 0,5 м. Каждый слой отделен от смежных частей толщи четко выражен-

ными качественными и пространственными границами. При таких условиях однородные толщи являются одновременно и однослойными. Двухпородные толщи могут быть двухслойными и многослойными, многопородные — только многослойными.

Деление понятия «грунтовая толща» по совокупности признаков второй группы, отражающих особенности современного состояния грунтов, также выполнено в четырех структурных уровнях (см. табл. 15). На первом из них в качестве классификационного признака использовалась степень однородности состояния пород в разрезе толщи. По этому признаку выделены две категории грунтовых толщ: 1) с однородным состоянием грунтов. Сложена на всю мощность либо талыми и немерзлыми, либо многолетнемерзлыми грунтами; 2) с неоднородным состоянием грунтов. Часть ее представлена талыми и немерзлыми, а другая — многолетнемерзлыми грунтами.

На втором структурном уровне деления в качестве классификационного признака использован конкретный характер состояния грунтов в разрезе толщи. По этому критерию толщи с однородным состоянием грунтов по разрезу делятся на талые (и немерзлые) и многолетнемерзлые. Последние в отличие от первых имеют отрицательную среднегодовую температуру и содержат лед. Грунтовые толщи с неоднородным состоянием грунтов по разрезу подразделяются на: а) талые в верхней части разреза, многолетнемерзлые в нижней, б) многолетнемерзлые в верхней части разреза, талые в нижней, в) переслаивающиеся многолетнемерзлые и талые грунты.

Эти категории грунтовых толщ на следующем этапе подразделяются по среднегодовым температурам грунтов, а затем — по степени увлажненности — льдистости (см. табл. 15). При выделении различных категорий грунтовых толщ по показателю «увлажненность — льдистость» использовались следующие критерии. Грунтовые толщи скальные и дисперсные однопородные грубообломочные и песчаные считались слабоувлажненными при глубине залегания грунтовых вод более 5 м (степень влажности 10-метровой толщи при этом будет равна или менее 0,5); увлажненными — при глубине залегания грунтовых вод от 2 до 5 м включительно (степень влажности толщи составляет 0,5—0,8) и сильноувлажненными — при глубине залегания менее 2 м (степень влажности толщи более 0,8). Эти же критерии условно приняты и для двухпородных и многопородных грунтовых толщ, в которых крупнообломочные и песчаные грунты преобладают или ими сложена верхняя часть разреза.

Грунтовые толщи однопородные глинистые, а также двух- и многопородные, в которых преобладает глинистая составляющая или ею сложена верхняя часть разреза, относятся к слабоувлажненным, если их весовая влажность ниже влажности нижнего предела пластичности; консистенция твердая (среднеарифметическое значение показателя консистенции по разрезу менее 0). Толщи являются увлажненными, если их влажность изменяется от верх-

него до нижнего пределов пластичности; консистенция пластичная. Сильноувлажненными названы толщи, влажность грунтов которых выше верхнего предела пластичности; консистенция скрытотекучая (среднеарифметическое значение показателя консистенции выше 1).

Все толщи однопородные торфяные и двух- и многопородные, в которых верхняя часть разреза сложена торфом, относятся к сильноувлажненным. Грунтовые толщи дисперсные однопородные лёссовые и двухпородные, в которых лёссовая составляющая залегает в верхней части разреза, являются слабоувлажненными.

Выделение слабольдистых, льдистых и сильнольдистых пород проведено на основе следующих признаков. Грунтовые толщи скальные рассматриваются как слабольдистые и льдистые объединенные. Грунтовые толщи крупнообломочные и песчаные делятся на льдистые и сильнольдистые. К льдистым отнесены толщи грунтов с объемной льдистостью меньшей или равной 40 %, содержащие только лед-цемент (поровая разновидность). Суммарная весовая влажность таких пород обычно не превышает 25 %. Толщи с большей величиной этих показателей отнесены к сильнольдистым; в таких породах, как правило, содержатся шлиры льда. Эти же критерии условно приняты для двух- и многопородных толщ, в которых глинистые грунты преобладают или слагают верхнюю часть разреза.

Грунтовые толщи, в которых верхняя часть разреза сложена торфом, как правило, являются сильнольдистыми. Наличие в разрезе многолетнемерзлых толщ любого состава и строения макроледяных тел (повторно-жилых, пластовых и др.) резко увеличивает льдистость. В подавляющем большинстве они относятся к категории сильнольдистых.

Следует подчеркнуть, что при анализе особенностей грунтовых толщ может возникнуть необходимость учета еще ряда признаков, характеризующих их состав и состояние. Среди них — наличие или отсутствие крупнообломочного материала в глинистых грунтовых толщах, растворимость скальных грунтов, степень их трещиноватости, величина потенциальной просадки лёссовых толщ и др. При крупномасштабных исследованиях наряду с охарактеризованными признаками необходимо в достаточно полном объеме учитывать и свойства грунтов. Эта задача становится одной из важнейших.

При разработке классификации грунтовых толщ могут быть использованы построения двух типов: однорядный, последовательный (тип «дерева») и двухрядный, перекрестный (таблицы-решетки, или таблицы-матрицы). Выбор вида графических построений определяется характером и объемом признаков, которые исследователь планирует учесть в данной работе.

Если предполагается анализировать многообразие грунтовых толщ по признакам одного типа (например, показателям состава и строения или только показателям состояния или свойств), то целесообразно использовать построения типа дерева, даже если чис-



ло признаков достаточно велико. Если же необходимо охарактеризовать грунтовые толщи по признакам разных групп (что приходится делать чаще всего), то следует применить второй графический прием построения классификаций. В этом случае всю совокупность признаков разбивают на две группы, учитывая прежде всего их причинную (генетическую) обусловленность, и рассматривают их по двум осям таблицы-матрицы. При использовании этого способа не приходится решать, что важнее — признаки первой или второй группы (например, состав и строение грунтовой толщи или ее состояние). На каждом этапе деления понятия мы автоматически получаем таксоны, которые характеризуются одновременно признаками первой и второй групп.

Следует подчеркнуть, что таблица-матрица может быть основой легенды карты. Ее применение значительно сокращает размер легенды, упрощает ее оформление. При этом совершенно не обязательно все признаки рассматривать в такой двухкоординатной таблице. Очень часто в ней целесообразно рассмотреть признаки наиболее важные или наиболее общие, свойственные большей части грунтовых толщ. Остальные признаки, число которых обычно невелико, могут быть проанализированы вне ее, располагаясь в легенде ниже таблицы [10]. Именно этот способ, по-видимому, окажется наиболее рациональным при необходимости отражения на карте состава, состояния и свойств грунтовых толщ: первые два признака можно «разыграть» в виде таблицы, а показатели свойств рассмотреть в последующей части легенды.

В таблице-матрице различные таксономические единицы грунтовых толщ, обладающих признаками обеих групп, образуются при пересечении разных структурных уровней вертикальной и горизонтальной осей таблицы и представляют собой как бы клетки различного размера. Применительно к территории Нечерноземной зоны европейской части РСФСР выделили при таком подходе суперклассы, классы, группы и типы грунтовых толщ. Первые — наиболее крупные по объему. Классы грунтовых толщ обособляются в их пределах. Группа является частью класса, тип — частью группы. Суперклассы грунтовых толщ обособляются пересечением горизонтальных и вертикальных осей матрицы, отвечающих первому структурному уровню деления понятия «грунтовая толща» по признакам первой и второй групп, классы — второму, группы — третьему, типы — четвертому.

Названия всех этих таксонов формируются путем одновременного учета признаков двух рассмотренных выше групп. Суперклассы делятся на грунтовые толщи, сложенные грунтами: одного класса, с однородным (1) и неоднородным (2) их состоянием; разных классов с однородным (3) и неоднородным (4) их состоянием.

Классы грунтовых толщ подразделяются на скальные немерзлые и талые, скальные многолетнемерзлые и скальные талые в верхней части разреза, многолетнемерзлые в нижней и т. п.

Группы грунтовых толщ представляют собой часть класса, обо-

собленную по числу пород, слагающих толщу, и ее температуре. Названия групп формируются прибавлением слов «одно-, двух- или многопородные» и «с температурой 0—0» к названию класса. Например, грунтовые толщи скальные талые и немерзлые однопородные с температурой выше 3°C или грунтовые толщи дисперсные многолетнемерзлые многопородные с температурой 0 — минус 1°C.

Тип грунтовых толщ — наименьшая таксономическая единица, выделяемая в рассматриваемых построениях. Тип — это по существу грунтовая толща определенного литологического состава и определенной степени увлажнения (льдистости), обособляемая в пределах группы. Его название образуется путем прибавления наименования литологической разности и степени увлажнения (льдистости) к названию группы. Например, «грунтовые толщи дисперсные немерзлые и талые однопородные с температурой 1—3°C крупнообломочные сильноувлажненные».

Описанный подход к классифицированию может быть использован и на последующих этапах работы, когда необходим учет инженерно-геологических свойств грунтов. В названия грунтовых толщ при этом следует вводить названия категории толщ по данному признаку (сильносжимаемые, слабосжимаемые и т. п.) в соответствии с выбранной частной классификацией.

Таким образом, к числу первоочередных задач должна быть отнесена разработка принципиальной классификации (систематики) грунтовых толщ, в которой были бы учтены особенности их состава, строения, состояния и свойств. Она должна быть составлена как классификация логических возможностей. Ее разработка позволила бы более успешно решать вопросы составления региональных классификаций (классификаций региональных возможностей), а затем и классификаций фактических возможностей, которые могли бы составить основу легенд специальных инженерно-геологических карт — карт грунтовых толщ. Опыт составления мелкомасштабных их вариантов уже накоплен (Е. М. Сергеев, А. С. Герасимова, П. И. Фадеев и др.). Необходима разработка методики составления крупномасштабных карт грунтовых толщ, на которых в качестве важнейшей была бы информация о свойствах грунтовых толщ разного состава, строения и состояния.

## **МАССИВЫ СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД**

К массивам скальных горных пород относятся массивы, сложенные магматическими, метаморфическими и осадочными сцементированными породами, характеризующиеся преимущественно кристаллизационными структурными связями, повышенной прочностью и относительно слабой деформируемостью. Такие массивы представляют собой сложно построенные геологические тела, расчлененные поверхностями раздела на структурные (объемные и плоские) элементы различных масштабных уровней и порядков.

Блоковое строение массивов обусловлено рядом геолого-структурных факторов и, в первую очередь, наличием в разрезе различных литологических формаций, геолого-генетических комплек-

сов и типов пород, разрывных нарушений различных порядков и трещиноватостью. Главнейшими отличительными особенностями массивов скальных пород являются их дискретность, неоднородность и сложное напряженное состояние, которые оказывают существенное влияние на их свойства и определяют специфику инженерно-геологического изучения.

### *Инженерно-геологическая классификация массивов*

Вследствие ведущей роли геолого-структурных факторов в формировании инженерно-геологических особенностей скальных массивов, они и положены в основу общей типологической инженерно-геологической классификации (табл. 16).

В приведенной классификации выделяются две группы массивов, отличающиеся по своему генезису. К первой группе отнесены массивы петротектонической и петрогенетической природы, условно названные литолого-структурными. Это геологические тела, образующие пространственно обособленные структуры разных порядков, сложенные магматическими, метаморфическими или осадочными породами. Вторую группу образуют аномально неблагоприятные по своим инженерно-геологическим свойствам массивы дизъюнктивов (тектонической природы). К ним относятся линейные геологические тела, образованные под влиянием разрывных тектонических нарушений, обладающие четко выраженным зональным строением.

В классификационной схеме (см. табл. 16) в пределах каждой группы по вертикали соподчиненно выделяются массивы четырех порядков по размерам геологических структур, их геологическому строению и характеру границ. По горизонтали приводятся классификационные признаки и дается их характеристика. К числу важнейших классификационных признаков отнесены: 1) границы массивов, 2) признаки однородности внутренней структуры массива, 3) размеры массивов, 4) элементы внутренней структуры массива, 5) соотношение структурных элементов.

Литолого-структурные массивы I порядка обособляются границами литологических формаций или крупных тектонических нарушений. Массивы II порядка выделяются внутри массивов I как части геологической структуры, сложенные породами одного геолого-генетического комплекса. Массивы III порядка выделяются внутри массивов II и сложены породами одного литологического (петрологического) типа или их определенными сочетаниями (флиш). Массивы IV порядка выделяются как структурные элементы массива III и сложены породами определенных инженерно-геологических разновидностей.

Массивы дизъюнктивов характеризуются особенно сложными и неблагоприятными инженерно-геологическими условиями и требуют самого пристального изучения.

По размерности и степени нарушенности горных пород различаются массивы дизъюнктивов четырех порядков: I — сложного

Т а б л и ц а 16

Схема инженерно-геологической типологической классификации массивов скальных грунтов.  
Составлена совместно с М. Матулой и Г. А. Голодковской

Классификационные признаки и их характеристики					
Массивы	Границы	Признаки однородности	Размеры (мощность), м	Элементы структуры	Соотношение структурных элементов
<i>Литолого-структурные массивы</i>					
I порядка	Литологических формаций и разрывных нарушений I порядка	Однородность формаций	$n \cdot 1000 - n \cdot 100$	Литологические комплексы	Литологических комплексов
II порядка	Литологических комплексов и тектонических нарушений II порядка	Однородность комплексов	$n \cdot 100 - n \cdot 10$	Литологические типы	Литологических типов
III порядка	Литологических типов	Однородность литологического состава	$n \cdot 10 - n \cdot 1$	Массивы однородной блочности	Однородной блочности
IV порядка	Инженерно-геологических разновидностей	Однородность трещиноватости	$n \cdot 1 - n \cdot 0,1$	Элементарные блоки	Элементарных блоков
<i>Массивы дизъюнктивов</i>					
I порядка	Региональных тектонических нарушений	Сложное зональное строение	$n \cdot 1000 - n \cdot 100$	Массивы простого строения	Региональной модели массивов простого строения
II порядка	Локальных тектонических нарушений	Простое зональное строение	$n \cdot 100 - n \cdot 10$	Зоны тектонических нарушений	Различных тектонических зон
III порядка	Отдельных тектонических зон	Однородность трещиноватости	$n \cdot 10 - n \cdot 1$	Подзоны тектонических нарушений	Пространственное отдельных зон
IV порядка	Подзон (по стелени раздробленности)	Однородность динамометаморфической переработки	$n \cdot 1 - n \cdot 0,1$	Элементарные блоки	Элементарных блоков

строения; II — простого строения; III — отдельных зон тектонических нарушений; IV — отдельных подзон тектонических нарушений.

### Основные характеристики массивов скальных горных пород

К числу важнейших характеристик массивов, обуславливающих их физико-механические свойства и другие инженерно-геологические особенности, относятся: 1) генезис, вещественный состав, структура и текстура горных пород, слагающих массивы; 2) структура самого массива, которая определяется его трещиноватостью, слоистостью, сланцеватостью и характеризуется неоднородностью и анизотропностью; 3) обводненность; 4) напряженное состояние, отражающее особенности строения гравитационного и тектонического полей земной коры и ее морфоструктуру; 5) выветрелость и вторичная измененность. Каждая из этих характеристик по-разному проявляется в различных условиях и является преобладающей в той или иной геолого-структурной обстановке.

На конкретных примерах рассмотрим роль перечисленных характеристик в формировании инженерно-геологических особенностей массивов горных пород и их физико-механических свойств.

Генезис и вещественный состав горных пород являются главнейшими факторами в формировании инженерно-геологических особенностей массивов. Их влияние наиболее отчетливо проявляется в неизмененных массивах с первичной литогенетической трещиноватостью и в нетрещиноватых образцах, отобранных из этих массивов.

В табл. 17 показаны изменения параметров прочности и упругости пород различного генезиса и состава одного из районов Сибирской платформы, выражающиеся в общем уменьшении этих характеристик. Зависимость изменения этих параметров от гене-

Т а б л и ц а 17

Прочностные и упругие характеристики образцов и массивов пород различного генезиса и состава

Порода	Образцы		Массивы	
	$R_c$ , МПа	$E_g$ , тыс. МПа	$R_c$ , МПа	$E_g$ , тыс. МПа
Интрузивные:				
габбро-долериты	180	85	130	78
граниты	150	—	120	—
Эффузивные базальты	180	80	130	70
Метаморфические гнейсы	160	60	120	55
Сульфатно-доломитовые из-вестняки	150	75	90	65
Терригенные песчаники	130	48	80—85	30—35

зиса и состава прослежена по результатам исследований на образцах и собственно на массивах объемом  $10^3-5$  м<sup>3</sup>, соизмеримых с областью воздействия крупных инженерных сооружений.

Существенное изменение показателей физико-механических свойств горных пород наблюдается даже внутри одного петрографического типа при незначительных вариациях минерального состава и структурно-текстурных особенностей. В табл. 18 приведе-

Таблица 18

Состав и физико-механические свойства базальтов

Порода	Основные породообразующие минералы, их состав и содержание, %					Физико-механические свойства		
	Плагиоклаз		Пироксен	Стекло	Рудный минерал	плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	предел прочности на сжатие $R_c$ , МПа	динамический модуль упругости $E_g$ , тыс. МПа
	вкрапленников	основной массы						
Порфиновый базальт	Лабрадор, андезин, 50		Авгит-пироксенит, 30	2—15	1—7	2,83	180	65
Толейтовый базальт	Лабрадор, андезин, 50		Пироксенит, 18	30	3—5	2,68	100	40

ны результаты изучения порфировых и толейтовых базальтов Талнахского месторождения (северо-западная окраина Сибирской платформы). Приведенные данные показывают, что исследованные разновидности базальтов различаются количественным соотношением главных породообразующих минералов и в меньшей степени их составом, а также величиной показателей физико-механических свойств. Самые высокие показатели плотности ( $\rho=2,83$  г/см<sup>3</sup>), прочности ( $R_c=170$  МПа) и модуля упругости ( $E_g=65$  тыс. МПа) характерны для порфировых базальтов. Это, очевидно, связано с низким содержанием вулканического стекла, высоким процентным содержанием пироксена и более основным, чем в толейтовых базальтах (при равных содержаниях), составом плагиоклазов.

Генезисом и составом пород определяются и такие компоненты строения массива, как его первичная литогенетическая трещиноватость, слоистость, сланцеватость, гнейсовидность и обусловленная ими неоднородность и анизотропия физико-механических свойств. Детальные исследования трещиноватости, выполненные на месторождениях Талнахского рудного узла и севера Кольского полуострова (Балтийский щит) показали, что первичная трещиноватость

горных пород различного генезиса: интрузивных, эффузивных, терригенных и карбонатных, существенно отличаясь по форме и размеру первичной отдельности, характеризуется близкими по величине и низкими по абсолютным значениям параметрами первичной трещиноватости. Модуль трещиноватости в среднем не превышает 0,3—5 трещин на 1 м, коэффициент трещинной пустотности — 0,6—2,5 %. Исключение составляют терригенные породы: алевролиты и аргиллиты, которые при незначительном увеличении трещинной пустотности (до 3 %) имеют очень высокие модули трещиноватости (50—100) и, как следствие этого, очень мелкий размер первичной отдельности.

Массивы, сложенные литологически или петрологически однородными толщами и характеризующиеся преимущественным развитием первичной трещиноватости, обладают достаточно высокой однородностью физико-механических свойств. Для количественной оценки неоднородности массивов скальных грунтов А. И. Савичем и др. был применен один из статистических способов, в котором использовано свойство неаддитивности скорости распространения упругих волн.

На рис. 15, *a* приведены масштабные кривые скорости распространения упругих волн для пород различного состава, свидетельствующие об очень незначительном уменьшении (до 2—3,5 %) в диапазоне изменения объемов от  $10^{-3}$  до  $10^5$  м<sup>3</sup> и, следовательно, о высокой однородности среды. Небольшой наклон масштабных кривых в области малых значений  $V=10^{-2}$  м<sup>3</sup> соответствует переходу от размеров образцов к размерам элементарных блоков массива, образованных трещинами первичной отдельности.

Анизотропия физико-механических свойств неизменных массивов обусловлена такими геологическими факторами, как: 1) упорядоченная ориентировка кристаллов в магматических и метаморфических породах; 2) слоистость в осадочных и 3) сланцеватость в метаморфических горных породах. Первый вид анизотропии проявляется обычно на уровне образца. Коэффициент анизотропии  $K_{ан}$  для упругих характеристик составляет 1,2—1,5, а для прочностных 1,8—2.

Анизотропия, связанная со слоистостью и сланцеватостью, проявляется на уровне массива и приводит к существенному изменению физико-механических свойств по разным направлениям (рис. 16, *a, в*). Коэффициент анизотропии для упругих характеристик составляет 1,2—1,5, а для прочностных — 2,5 и более.

Исследованиями установлено, что показатели физико-механических свойств неизменных скальных массивов с первичной трещиноватостью по своим значениям приближаются к характеристикам горных пород, слагающих эти массивы. Различие прочностных свойств в образце и массиве, характеризуемое коэффициентом структурного ослабления, составляет 0,7—0,9.

Все вышесказанное относится к неизменным массивам с преобладающей первичной трещиноватостью. Под влиянием вторичной трещиноватости все основные характеристики скального массива

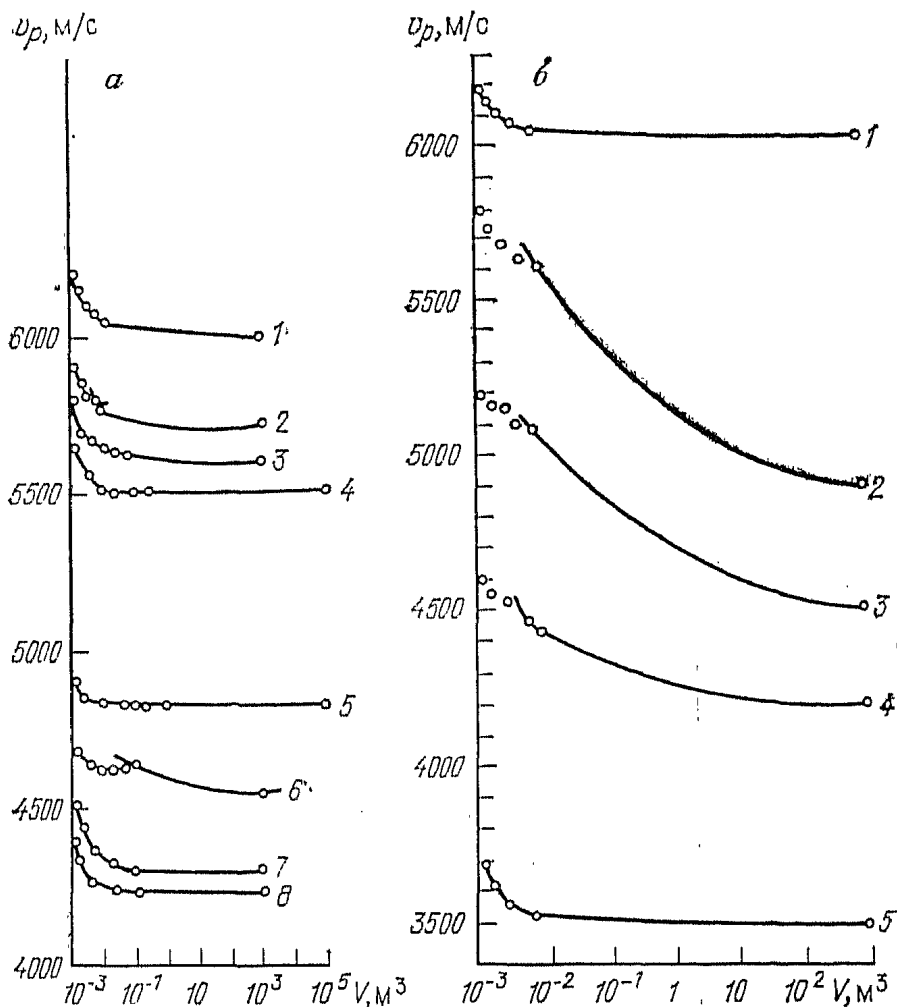


РИС. 15. Масштабные кривые скорости распространения продольных волн.  
*a* — для различных массивов с первичной трещиноватостью: 1 — габбро-долериты; 2 — гранито-гнейсы; 3 — известняки, доломиты; 4 — базальты порфиоровые; 5 — базальты толеитовые; 6 — пирротин-халькопиритовые руды; 7 — песчанки; 8 — алевролиты; *b* — для массивов габбро-долеритов: 1 — с первичной трещиноватостью; 2 — со средней тектонической трещиноватостью; 3 — с повышенной тектонической трещиноватостью; 4 — с сильной тектонической трещиноватостью; 5 — зоны дробления

и показатели физико-механических свойств существенно ухудшаются.

На фоне первичной трещиноватости зоны развития вторичной трещиноватости выделяются аномально высокими значениями трещинной пустотности, достигающими 10 % и более, что приводит к резкому снижению показателей физико-механических свойств горных пород и слагаемых ими массивов, а также к существенному изменению всех важнейших характеристик массива: неоднородности, анизотропности, водопроницаемости, напряженного состояния.

Так, в частности, изучение тектонической трещиноватости показало, что степень тектонической нарушенности массивов определяется положением их по отношению к тектоническим нарушениям. Породы, испытавшие влияние тектонических нарушений, можно разделить на ряд зон: зоны дробления ( $K_{тр} > 10\%$ ); сильной трещиноватости ( $K_{тр} = 5-10\%$ ); средней трещиноватости ( $K_{тр} = 2-5\%$ ). Мощность этих зон является функцией размера



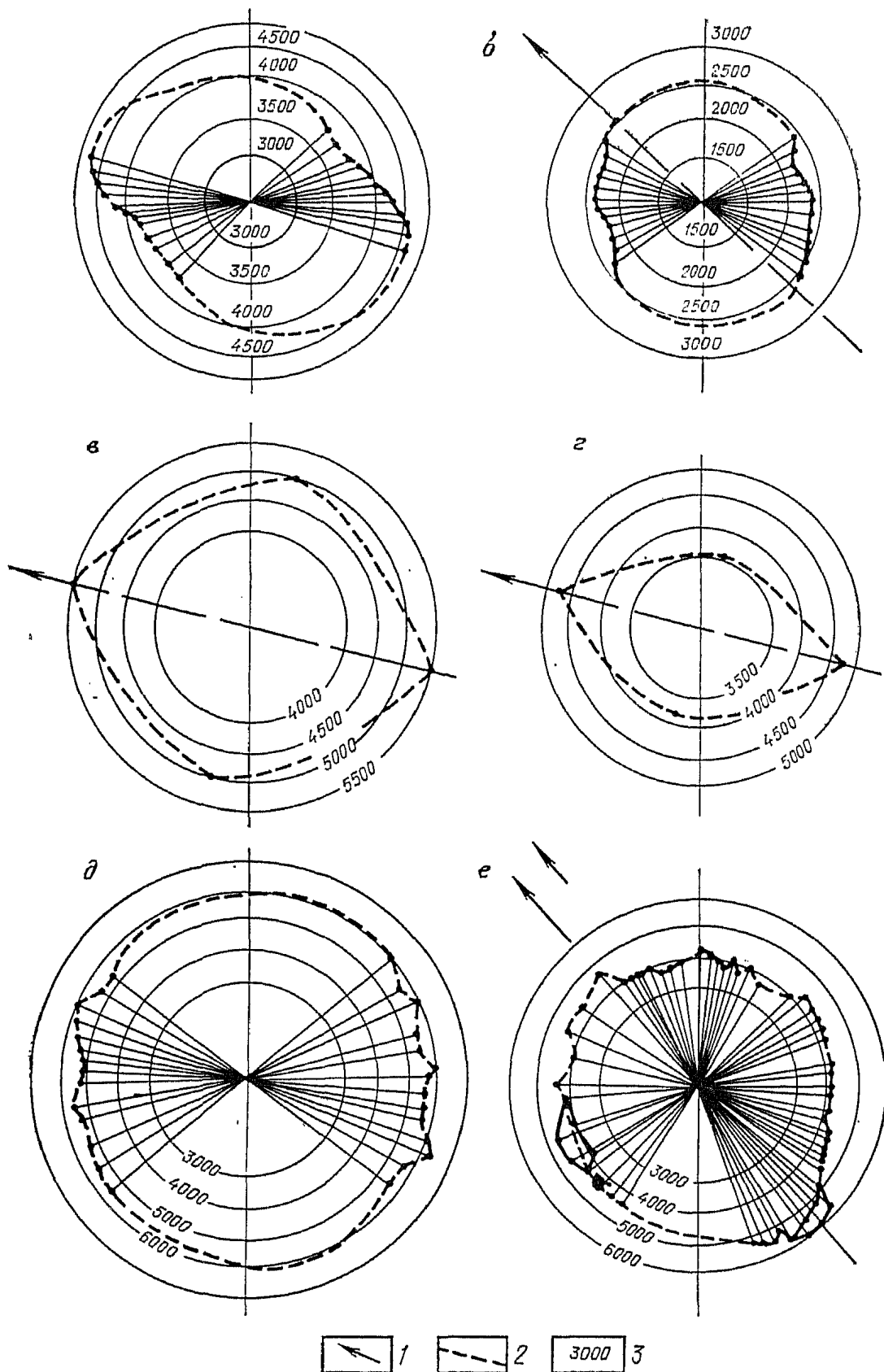


РИС. 16. Диаграммы изменения скорости продольных волн.

Для массивов переслаивания песчаников и алевролитов: а — вне зон тектонических нарушений, б — в зоне сброса; для массивов гнейсов: в — вне зон тектонических нарушений; г — в зоне тектонического нарушения; для массивов порфировых базальтов: д — вне зон тектонических нарушений, е — в зоне сброса. 1 — направление тектонических нарушений; 2 — ориентировка сланцеватости; 3 — значения скоростей упругих волн, м/с

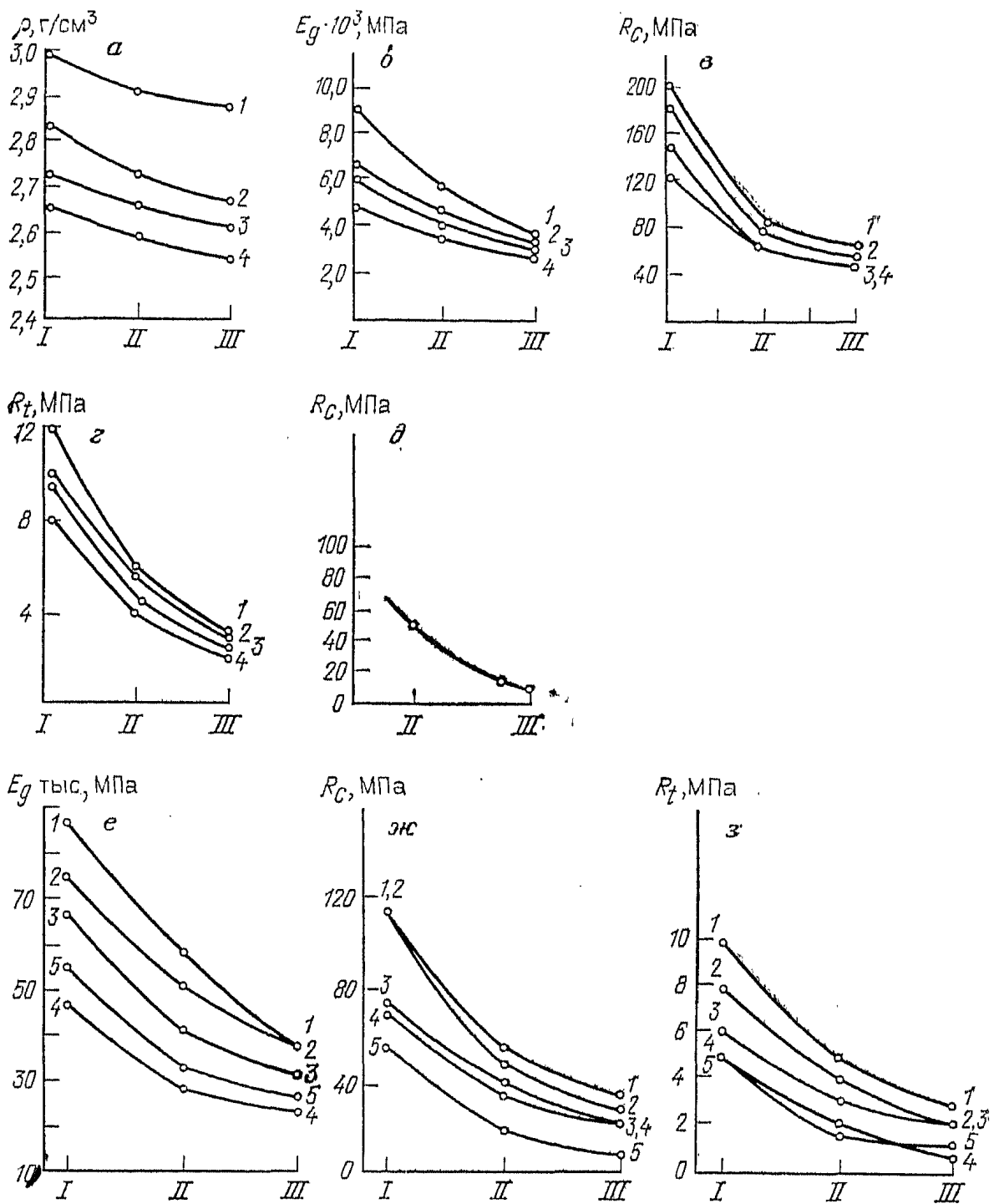


РИС. 17. Изменение показателей физико-механических свойств различных типов пород под влиянием тектонической трещиноватости.

а, б, в, г — в образцах горных пород; д — по результатам натуральных крупномасштабных опытов в пирротин-халькопиритовых рудах (по данным ВНИМИ); е, еж, з — в массивах, объемом  $10^3-5 \text{ м}^3$  (по корреляционной методике). Массивы пород: I — слаботрещинуватые, II — среднетрещиноватые, III — сильнотрещинуватые; 1 — габбро-долериты; 2 — базальты порфиоровые; 3 — известняки; 4 — песчаники; 5 — пирротин-халькопиритовые руды

(порядка) нарушения, величины смещения (амплитуды), а также физико-механических свойств горных пород. Было отмечено, что зоны сильной и средней трещиноватости, приуроченные к одному и тому же нарушению, имеют различную ширину в породах разного состава. Например, трещиноватость, обусловленная глубинным Норильским разломом, в пластичных карбонатных породах ( $R_c/R_t=13-15$ ) затухает на расстоянии всего 30 м от плоскости сместителя, тогда как в хрупких базальтах ( $R_c/R_t=20-35$ ) — на расстоянии 50—100 м.

Мощность трещиноватых зон при этом не связана прямой зависимостью с величиной прочности пород (прочность базальтов почти в два раза выше, чем прочность карбонатных пород), а очевидно, в большей мере определяется их хрупкостью и трещиностойкостью.

Вторичная (тектоническая) трещиноватость оказывает существенное влияние на физико-механические свойства горных пород, слагающих массивы, и самих массивов (рис. 17). Приведенные данные свидетельствуют, что с увеличением степени трещиноватости показатели физико-механических свойств существенно уменьшаются. При этом различия в значениях показателей физико-механических свойств, обусловленные их генезисом и составом, сглаживаются и в сильнотрещиноватых массивах приобретают близкие значения, независимо от состава пород. Причиной этого является увеличение макротрещиноватости в массивах и унаследованная мезо-, микро- и ультратрещиноватость в образцах, отобранных из этих массивов.

Тектоническая нарушенность массивов приводит и к существенному увеличению неоднородности массивов, сложенных литологически и петрологически однородными толщами (см. рис. 15, б). Приведенные результаты свидетельствуют, что самыми однородными являются массивы с первичной трещиноватостью. Уменьшение средних значений скоростей при увеличении объема исследуемых пород от  $10^{-5}$  до  $10^5$  м<sup>3</sup> в них не превышает 2—3 %. Сравнительно однородными являются зоны дробления и массивы сильно- и равномернотрещиноватых пород, приуроченных к крупным тектоническим нарушениям. И, наконец, наибольшую неоднородность и наибольшее изменение скоростей до 15 % обнаруживают массивы со средней и повышенной трещиноватостью, в которых наряду с преобладанием первичной трещиноватости наблюдаются отдельные неравномерно расположенные зоны сгущения тектонических трещин.

С вторичной трещиноватостью связана и вторичная анизотропия, которая обычно обусловлена наличием в массиве одной преобладающей системы трещин. Обычно этот вид анизотропии наиболее отчетливо проявляется в зонах влияния крупных тектонических нарушений или в зонах присклоновой разгрузки. При этом первично изотропные массивы становятся анизотропными.

На рис. 16, д, е приведены результаты оценки вторичной анизотропии методами сейсмоакустики, свидетельствующие, что первич-

но изотропные базальты в зоне влияния крупного сброса становятся анизотропными ( $K_{\text{аниз}}=1,47$ ). В первично анизотропных массивах ориентированная тектоническая трещиноватость (или трещины разгрузки) может приводить как к уменьшению, так и к увеличению степени первичной анизотропии. Так, если оси первичной и вторичной анизотропии не совпадают, как это видно для толщи переслаивания алевролитов, аргиллитов и песчаников (см. рис. 16, а, б), то массив становится практически изотропным. Если же направление тектонического нарушения и первичной анизотропии совпадают, как это видно для гранито-гнейсовой толщи Кольского п-ва, наблюдается существенное увеличение степени анизотропии,  $K_{\text{аниз}}$  увеличивается с 1,2 до 2,0.

Вопрос об обводненности и фильтрационных свойствах трещиноватого скального массива является очень сложным и до настоящего времени недостаточно разработан. Известно, что гидростатическое давление трещинных вод в обводненном скальном массиве приводит к снижению прочности горных массивов. Как показали исследования, влияние обводненности на величину прочности начинает существенно сказываться при заполнении открытых пустот водой на 60—80 % и достигает максимума при полном водонасыщении. При этом прочность на сжатие образцов уменьшается у песчаников с пористостью  $n \sim 10$  % на 70 %, известняков с  $n \sim 15$  % — на 50 %, габбро-долеритов и базальтов с  $n \sim 3—5$  % — на 20 %.

Одной из отличительных особенностей скальных массивов является их напряженное состояние, которое оказывает существенное влияние на их физико-механические свойства и устойчивость. Советскими и зарубежными исследователями установлено, что поле естественных напряжений весьма неоднородно и величины естественных напряжений существенно отличны в разных типах региональных и локальных тектонических структур, в том числе и в пределах тектонических нарушений различных уровней и порядков. Существенная неоднородность поля естественных напряжений обусловлена составом пород, характером и степенью их трещиноватости, физико-механическими свойствами, а также особенностями современной морфоструктуры. Установлено, что во многих районах Земного шара естественные напряжения значительно выше, чем геостатические, обусловленные весом пород.

Экспериментально установлено, что напряженное состояние существенно влияет на показатели физико-механических свойств массивов. Так, упругие характеристики массивов горных пород при напряжении в 40—50 МПа увеличиваются в среднем на 10—20 %, а прочностные — на 30—40 %. Напряженное состояние оказывает существенное влияние и на анизотропию и неоднородность массивов.

С напряженным состоянием массивов непосредственно связаны и процессы свободной разгрузки, широко наблюдаемые как в естественных массивах (зоны присклоновой разгрузки), так и при инженерной деятельности (при вскрытии котлованов, при проходке

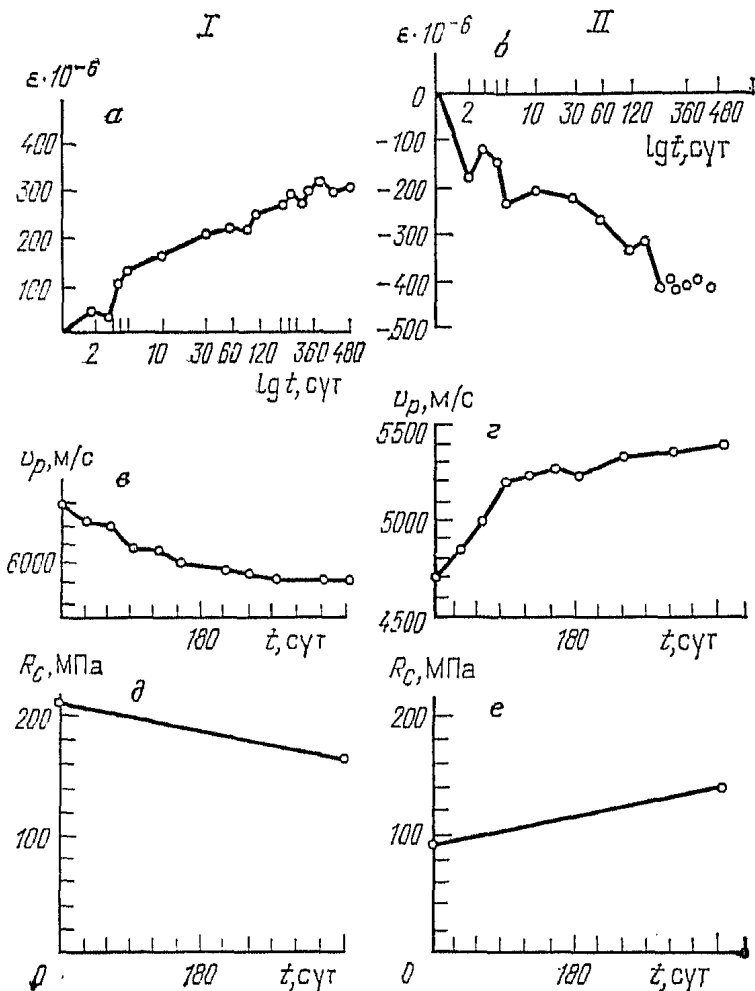


РИС. 18. Изменение свойств и состояния образцов габбро-долеритов под влиянием свободной разгрузки.

I — образцы из структуры Хараелахской мульды с глубины 1752 м; II — образцы на структуре Норильско-Хараелахского разлома с глубины 1570 м; а, б — относительные деформации; в, г — скорости продольных волн; д, е — прочность на сжатие

подземных выработок). На рис. 18 представлены результаты исследования этого процесса, выполненные для образцов габбро-долеритовой интрузии Талнахских месторождений с глубин 1000—2000 м.

Полученные результаты показали, что для большей части образцов (см. рис. 18, а, б, в) характерны деформации расширения, уменьшение показателей упругих (на 10—20 %) и прочностных (на 30—40 %) свойств. Это явление, получившее название «старения», зафиксировано и собственно в массиве при вскрытии котлованов под крупные инженерные сооружения, и в окрестностях горных выработок. Интенсивность этого процесса зависит от состава пород и максимальна в глинистых разностях — аргиллитах и мергелях. Для незначительной части исследованных образцов, территориально приуроченных к зоне регионального разлома, характерна противоположная направленность процесса свободной разгрузки. Для них отмечаются сжатие образцов, увеличение скоростей упру-

гих волн и прочностных характеристик. Природа этого явления, как показали электронно-микроскопические исследования, объясняется расширением и сжатием кристаллов, увеличением, расширением или смыканием микротрещин. Период релаксации напряжений составляет от 1 до 1,5 лет.

Анализ основных характеристик скального массива и факторов, их определяющих, позволил установить, что к числу главных факторов относятся: петрогенетический (генезис и состав пород), тектонический и напряженное состояние.

## ЧАСТЬ II.

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОДИНАМИКИ

---

## ГЛАВА 9.

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОДИНАМИКИ

Содержание и задачи инженерной геодинамики как основного из трех разделов инженерной геологии сформулировал В. А. Приклонский в 1949 г. в статье, развивающей идеи Ф. П. Саваренского. И. В. Попов подчеркивал, что инженерная геология, будучи отраслью геологии, изучает строение и динамику верхней части земной коры в связи с инженерно-строительной деятельностью человека; оценка и прогнозы взаимодействия геологической среды и инженерных сооружений (включая производство строительных работ) являются ее главными задачами. Результатом действия системы геологическая среда — сооружение являются инженерно-геологические процессы, под которыми Г. Н. Каменский понимал геологические процессы, вновь возникшие или существующие, но измененные под влиянием техногенных факторов. Они многообразны, обладают специфическими чертами, механизмами и закономерностями развития и распространения. Каждому природному геологическому процессу имеется инженерно-геологический аналог. В задачу инженерной геодинамики входит обоснование рациональных и эффективных методов управления инженерно-геологическими процессами и защита территории и сооружений, а также предотвращение катастроф, что связано с проблемами охраны окружающей среды.

### ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ КАК ОТРАЖЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЛИТОСФЕРЫ

Геологические процессы, возникшие под влиянием природных факторов, вне воздействия деятельности человека, но имеющие значение или опасные для сооружений и осваиваемых территорий, являются объектами изучения инженерной геодинамики. К подобным современным процессам и явлениям в первую очередь надо отнести: а) грандиозные оползни и обвалы, такие, как Усойский (1911 г.) на Памире или Хаитский (1949 г.) в Таджикистане, трансформировавшийся в селевой поток; Уаскаран (1970 г.) и Ментаро (1974 г.) в Перу и многие другие меньших объемов; б) карстовые провалы в Горьковской и Пермской областях, в Татарии и

Башкирии; в) селевые потоки в Средней Азии, Прибайкалье и в других районах страны. Эти процессы закономерны, в них отражается предшествующая и современная геологическая жизнь региона, проявляются взаимосвязь эндо- и экзогенных процессов, унаследованность их развития и другие особенности.

Совместное изучение эндо- и экзогенных геологических процессов, находящихся в непрерывном развитии, является одним из важных методических положений инженерной геодинамики. Верхняя часть литосферы и ее дневная поверхность, являясь объектами специального инженерно-геологического изучения, находятся во взаимосвязи с другими природными средами — атмосферой, гидросферой, био- и техносферами и с более глубокими зонами Земли. Глубинные (эндогенные) геологические процессы, в том числе землетрясения, различно и существенно сказываются на развитии экзогенных геологических процессов, находящихся в непосредственной взаимосвязи с процессами других сфер. Имеется обратная связь — экзогенные процессы воздействуют на глубинные, как, например, эрозионная и абразионная денудация отражается на режиме тектонических движений. Создание крупных водохранилищ, нагнетания вод на большие глубины и мощные взрывы изменяют естественное поле напряжений и провоцируют возникновение возбужденной (наведенной) сейсмичности, в свою очередь, отражающихся на экзогенных процессах.

Дифференцированные новейшие тектонические движения с надрвигами и перекосами в сочетании с климато-гидрологическими факторами определяют глубину, интенсивность и характер древних и современных эрозионных и абразионных процессов, образование древних, нередко погребенных форм рельефа. В свою очередь, эрозия и абразия влияют на развитие различных склоновых процессов, карста и кор выветривания, на режим грунтовых вод и т. д. Глубинные тектонические процессы и движения обуславливают сложную картину естественных напряжений в верхней части земной коры, где размещаются подземные сооружения и ведутся горные разработки. Закономерности движения напорных подземных вод различны в зависимости от напряженного состояния геологических тел, в которых они содержатся. Приведенными примерами не исчерпывается все многообразие прямых и обратных связей эндо- и экзогенных геологических процессов, но успешное познание их в целях оценки и управления ими для решения разнообразных практических проблем требует направленного глубокого изучения взаимосвязей между ними.

Геологические процессы в верхней части литосферы представляют специфическую форму движения материи с двумя источниками энергии — внешним, из космоса, от Солнца, и внутренним, из недр Земли. Для эндо- и экзогенных геологических процессов характерны неустановившиеся режимы и унаследованность в развитии. Для относительно кратких временных отрезков и для практических целей и расчетов допустимо принимать квазистационарный режим развития процессов при соответствующих их характери-



ках. При исследовании геологических процессов необходимо целенаправленно рассматривать их компоненты — физические, химические, термодинамические и гравитационные. Интенсивность взаимодействия разных сред, результатом которого являются геологические процессы, наибольшая в зоне их сопряжения, где выше градиенты естественных полей. Это взаимодействие можно выразить в виде уравнений массо-энергопереноса. Геологические процессы в целом, ассоциации экзогенных процессов и отдельные их виды представляют собой системы разных уровней, и при их изучении необходимо применение системного подхода.

## **ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ**

Для геологических и инженерно-геологических процессов типичны региональные, генетические и зональные закономерности развития и распространения. В характере и интенсивности процессов отражаются строение, состояние геологической среды и действующие факторы; поэтому процессы являются важными признаками для оценки современной устойчивости территории, прогноза ее изменения при строительстве сооружений или ином освоении и для обоснования мер защиты от негативного их воздействия. Каждый экзогенный геологический процесс приводит к образованию соответствующего генетического типа новых образований и к специфическим формам рельефа, по которым восстанавливается обстановка их формирования и развития.

По И. В. Попову, региональные закономерности процессов и явлений, типичные для больших территорий, определяются: а) геологическим строением (формациями пород и тектоническими структурами); б) геологической историей развития региона, особенно за новейшее время и в) климато-гидрологическими палеоусловиями и современными условиями. Генетические закономерности развития процессов более характерны для локальных участков и отражают их конкретную приуроченность: к комплексам и типам пород, к складчатым и разрывным нарушениям, включая крупные трещины; к геоморфологическим элементам и зонам выветривания; к характеру, степени, режиму обводнения; к силовому воздействию подземных вод на массивы пород; к периодам активизации сейсмичности и к зонам концентрации напряжений, а также к виду, распространению и интенсивности воздействия техногенных факторов.

При познании закономерностей развития геологических процессов необходимо оценивать: а) разрушение массивов пород и рельефа; б) перенос разрушенных масс с учетом действующих сил, механизма перемещения, интенсивности и объемов; в) вновь образованные отложения и формы рельефа, которые являются новым геологическим результатом деятельности процессов. Геологические и инженерно-геологические процессы многофакторны, развиваются в неоднородных средах и в сложной взаимосвязи между собой

и внешними факторами. Однако всегда следует устанавливать главнейшие компоненты среды и действующие факторы.

### *Влияние геологической среды на развитие процессов*

Основные компоненты геологической среды — комплексы пород, преимущественно неоднородные, дискретные, слагающие древние и новейшие структуры, находятся в напряженно-деформированном состоянии и непрерывно изменяются в связи с общим ходом геологической истории развития земной коры и наложенными техногенными факторами. Массивы пород разных уровней, их физико-механические свойства и напряженное состояние существенно преобразовываются в новых термодинамических условиях, возникающих вследствие тектонических движений и изменения режимов: температурного, давления, подземных и поверхностных вод. Эти изменения определяют развитие геологических процессов, неодинаковое в разных комплексах пород.

Оползни формируются практически во всех комплексах пород — в гранитах, известняках, терригенных толщах, лёссах и др., но характерные их типы, объемы, факторы, механизм и интенсивность развития и иные особенности различны даже в одной долине, например, в гранитах и лёссах бассейна р. Варзоб (Таджикистан); аналогично и в других районах [27, 32].

Подземные воды являются также одним из основных компонентов геологической среды, но одновременно их следует рассматривать как важный действующий фактор. Взаимодействие подземных вод с породами, в которых они содержатся и движутся, многообразно. Они оказывают большое влияние на прочностные, деформационные и другие свойства пород путем выщелачивания, размягчения и разрушения структурных связей, особенно при переменном режиме обводнения, что определяет возможность возникновения и интенсивность многих экзогенных процессов. Распространение, химизм и режим подземных вод, нестационарные гидравлические характеристики и другие гидрогеологические особенности являются критериями для оценки возможности возникновения и прогноза развития процессов, для обоснования мер по их регулированию и борьбы с ними. Карст, просадки в лёссах, оползни, суффозия и другие геологические процессы не возникают без влияния подземных вод; для обоснованной их оценки необходимы расчеты водного баланса во времени. Во многих случаях при эксплуатации подпорных сооружений (плотин, водохранилищ) или водопонижении в шахтах, карьерах, котлованах и подземных выемках основное воздействие на вмещающие породы оказывают фильтрационные потоки с высокими градиентами, возникают процессы суффозии, кольматации, взвешивания, выпора и другие деформации, иногда называемыми гидрогеомеханическими [26, 28].

Закономерности возникновения, распространения и интенсивности современных геологических процессов, выраженные посредством показателей, следует использовать для их прогноза и учета

влияния техногенных факторов. Изучение геологической истории района и унаследованности развития процессов также важно для оценки и прогноза процессов. Значение новейшей геологической истории показано в работах Д. С. Соколова и А. Г. Лыкошина при оценке степени и распространения закарстованности массивов карбонатных пород в связи со строительством плотин на реках Уфа, Западная Двина, Неман и др. Сказанное справедливо и в отношении оценки современного состояния оползневых склонов и прогноза оползней в Крыму, в Поволжье, в Средней Азии и в других районах [27].

### *Климат и поверхностные воды как компоненты природной среды и факторы развития геологических процессов*

Климатические факторы и закономерности их проявления обычно косвенно, но нередко значительно влияют на развитие геологических процессов. Воздействие поверхностных вод на дневную поверхность литосферы и на современную геологическую жизнь разнообразно и существенно. При изучении и обосновании мер борьбы важно определить характер влияния и удельное значение отдельных климатических и гидрологических факторов в общей системе геологическая среда — сооружения — процессы — защита.

Климатические особенности — осадки и их распределение, температура, промерзание-оттаивание, снеготаяние, испарение, ветер и др. в сочетании с характером микрорельефа, растительности, почвенного покрова и подстилающих грунтов обуславливают величины инфильтрации или испарения атмосферных вод — важных компонентов водного баланса, режима подземных вод и режима обводненности территории и массивов пород. С этих позиций, через подземные воды, следует анализировать и оценивать роль климатических факторов на развитие карстовых, оползневых, селевых, просадочных и других процессов, возникновение которых связано со степенью и режимом обводнения территории и пород.

Роль климата в процессах выветривания и формирования кор выветривания в любых породах довольно значительна. Колебания температуры, число дней с переходом температуры грунта через нуль, глубина и интенсивность промерзания и оттаивания и связанные с ними степень и режим увлажнения пород, происходящее также и за счет миграции влаги из воздуха, определяют физический характер их выветривания (дезинтеграцию). Наличие воды в разных формах в поверхностном слое обуславливает одновременное возникновение химических и биохимических процессов выветривания пород, их разложение и преобразование в новый генетический тип — элювий. Роль климатических факторов в процессах выветривания существенна, но характер разрушающихся пород влияет значительно на конечный результат их деятельности, на строение и инженерно-геологические характеристики пород кор и зон выветривания. Это подтверждается данными о типах и свойствах элювия на вулканогенно-осадочных породах средней юры долин

р. Ингури, в эоценовых порфиридах г. Батуми, в карбонатных толщах верхнего мела г. Гагры и в литифицированных глинах верхнего палеогена — нижнего миоцена района г. Сухими, находящихся в одинаковой климатической зоне.

Поверхностные воды — озерные, морские, водохранилищ, овражные, речные и склонового стока — играют огромную роль в развитии геологических процессов, в первую очередь, в разнохарактерных эрозионных и абразионных. Движущиеся поверхностные воды обладают гидравлическими характеристиками: скоростями течения, расходами, параметрами волн, энергией, наносодвижущими силами и др., непрерывно изменяющимися во времени и пространстве, в зависимости от образующих их факторов, рельефа дна и др. Они определяют в конкретном геологическом районе интенсивность и величины эрозионных и абразионных размывов, перенос и аккумуляцию наносов.

Механизм воздействия русловых и волновых водных потоков на дно (отмель) и на берега различны; также неодинаковы процессы разрушения структурных связей и размыва песчаных, глинистых, лёссовых, прочных морских осадочных, магматических и других пород. Сопротивление пород размыву, а следовательно, величины и темпы эрозионных и абразионных процессов, наряду с литолого-текстурными особенностями и режимом обводнения, определяются степенью и скоростью их выветривания.

Эрозия и абразия — главные процессы денудации поверхности литосферы и формирования рельефа; с инженерно-геологических позиций они являются факторами нарушения устойчивости склонов, вызывающими оползни и обвалы, изменяющими базисы дренирования подземных вод и, как следствие, влияющими на процессы карста, подтопления и просадочных явлений. Однако не всегда имеется непосредственная зависимость образования склоновых процессов от величины подмыва или углубления русла. Правильнее анализировать изменение во времени перераспределение напряжений в массиве склона, вызванного эрозионными или абразионными размывами, учитывать последующие процессы разуплотнения и выветривания пород на изменение состояния склонов.

### *Техногенные факторы*

Характерной особенностью современности является непрерывно возрастающее воздействие разнообразной деятельности человека — техногенных факторов — на геологическую среду, в первую очередь на развитие оползней, абразии, эрозии, карста, просадок в лёссах, переработки берегов водохранилищ, подтопления, сдвижения и других, а также на изменение сейсмического режима. Полностью оправдались слова, сказанные в 1944 г. В. И. Вернадским: «Человек становится крупнейшей геологической силой». Е. М. Сергеев подчеркивает, что техногенные факторы приобретают региональный характер.

На Южном берегу Крыма на 1980 г. примерно 83 % активных оползней связано с техногенными факторами. Они вызваны застройкой территории и проложением автодорог без предварительного проведения укрепительных мероприятий, неправильным ведением строительства, утечками из водонесущих сетей и т. п. В долине р. Ангрэн (Узбекистан) при разработке углей методами газификации и шахтами возникли грандиозные оползни Атчинский и Загасанский общим объемом более 800 млн. м<sup>3</sup>, для стабилизации которых осуществляются крупные защитные мероприятия [32]. При гидротехническом строительстве немало случаев возникновения оползней, фильтрации, активизации карста и просадок, абразионных и других процессов в районах плотин, ГАЭС и водохранилищ (Вайонт, Мальпасе и др.). Особо интенсивно развиваются процессы подтопления территории, просадок и оползней в лёссах, вторичного засоления и т. п. вследствие фильтрации воды из магистральных ирригационных каналов и при нерегламентируемых поливах.

Взаимодействие разнообразной деятельности человека с геологической средой формирует новые условия и процессы с нестационарным режимом и со специфическими чертами, которые необходимо учитывать в прогнозах и оценках:

— геологическая среда и ее отдельные компоненты различно реагируют на каждый вид воздействия человека; изменение каждого компонента и возникающих процессов происходит не изолированно друг от друга, а во взаимосвязи;

— изменяющейся геологической среде и процессам присущи необратимость и унаследованность в развитии;

— при внешнем воздействии геологическая среда стремится к адаптации, к новому состоянию, соответствующему величине интенсивности и области влияния.

#### **О ПРОГНОЗЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И О «РИСКЕ» ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРАКТИКИ**

Оценка современных геологических процессов, развивающихся независимо от деятельности человека, но оказывающих воздействие на территорию освоения или сооружения, а также прогноз инженерно-геологических процессов является наиболее ответственной задачей и результатом исследований на всех стадиях исследований. Поэтому важны методологические основы прогнозирования, использование системного подхода при инженерно-геологической схематизации карт и разрезов и типизация территорий, при обосновании методики расчетов и прогнозов, при интерпретации результатов и рекомендациях мер защиты.

Прогнозы подразделяются на региональные и локальные, охватывающие территории от геологического региона до конкретного участка или объекта исследований (основания сооружений, склона и т. п.); по степени достоверности на ориентировочные и уточнен-

ные; по времени — на различные сроки в зависимости от поставленной задачи. Возможно классифицирование прогнозов и по другим признакам. Условность расчетных схем по сравнению с реальной геологической средой, механизмом процессов и техногенным воздействием обуславливает, что прогнозы не могут иметь 100% -ную достоверность. Ориентировочные прогнозы основаны преимущественно на материалах инженерно-геологического картирования, с использованием простейших методов расчета, обобщения опыта и наблюдений за процессами; они обычно соответствуют первым стадиям проектирования сооружений и защиты территории. Уточненные прогнозы оползневых, селевых, карстовых и других процессов предполагают использование в сочетании различных методов — сравнительно-геологического анализа, расчетных, экспериментальных на моделях и в натуре, на материалах опыта изучения и управления. Эти прогнозы выполняются применительно к поставленным задачам и чаще — на стадии детального проектирования.

При любых видах и детальности прогнозы должны содержать следующие основные характеристики:

- генетический тип прогнозируемого процесса и механизм его развития;

- место возникновения, протекания и затухания процесса, особенно в тех случаях, когда горные породы перемещаются на значительные расстояния;

- время возникновения и развития процесса с анализом факторов и предшествующей истории, продолжительности, непрерывности или периодичности действия;

- интенсивность (скорость) развития процесса;

- параметры областей действия процесса и возникших явлений — их размеры, объемы, вновь образованные накопления и формы рельефа.

Наиболее трудными вопросами прогноза являются временные характеристики геологических и особенно инженерно-геологических процессов, так как надо располагать данными по механизму и скорости развития процессов в необратимо изменяющейся геологической среде и обычно при нестационарном воздействии техногенных факторов; поэтому нередко приходится ограничиваться аналогиями и экспертными оценками. Знание закономерностей развития геологических и инженерно-геологических процессов позволит составить обоснованные инженерно-геологические модели строения объекта и процессов, выбирать наиболее рациональные методы расчета, экспериментов и геологического анализа. При выборе расчетных схем и методов прогноза неизбежно возникают вопросы о детерминированности и стохастичности геологических и инженерно-геологических процессов. По этому вопросу имеются различные точки зрения. Склоновые, карстовые и селевые процессы, абразия и переработка берегов водохранилищ обусловлены многими факторами, являются необратимыми и унаследованными. Детерминированность оползневых процессов, осложняемых случай-

ными составляющими, показана Е. П. Емельяновой [12]. В равной мере это относится и к другим процессам. При решении конкретных задач по инженерной защите территории и сооружения и для предотвращения катастрофических последствий от инженерно-геологических процессов необходимы прогнозы по возможно детальным детерминированным схемам. Однако не следует полностью отказываться от вероятностно-статистических методов прогноза геологических процессов, несмотря на относительную неопределенность их результатов, так как случайные компоненты среды или факторы могут иметь место. Вопрос заключается в разумном сочетании методов прогноза по детерминированным и стохастическим моделям; при этом, учитывая задачи практики, следует отдавать предпочтение результатам прогнозов и расчетов по детерминированным методам как обеспечивающим более достоверные решения.

В последние годы в зарубежной и отечественной литературе обсуждаются вопросы «риска» в оценках инженерно-геологических процессов при строительстве в сейсмических районах, на побережьях морей и водохранилищ и в других сложных условиях. Термин «риск» в инженерно-геологической литературе не всегда понимается однозначно. Одни считают, что понятия «вероятность оползания» и «оползневый риск» идентичны, другие полагают, что на картах «риска» следует отображать условия возникновения геологических процессов как в природной обстановке, так и при участии техногенных факторов.

Методика расчета «сейсмического риска» разработана в Институте физики Земли АН СССР и предусматривает совместный анализ разнообразных сейсмологических и инженерно-экономических данных с учетом их статистической обоснованности в целях оценки суммарного эффекта (воздействия землетрясения) на объект за определенное время. Под эффектом понимается количественная мера ущерба, а под объектом — совокупная ценность сооружений в сейсмической зоне. Расчет сейсмического риска объединяет три модели: 1 — распределения землетрясений (время, пространство, энергия); 2 — пространственного волнового поля воздействия землетрясения и 3 — ущерба в каждой точке объекта.

Аналогичный подход может быть применен и для оценки оползневых, селевых и карстовых «рисков». Действительно, если сооружение (или территория) выдержит наибольшее воздействие какого-либо процесса и не разрушится, не возникнет катастрофа и не погибнут люди, а произойдет частичная деформация и возможно восстановление объекта, то вопрос должен решаться с экономических позиций, особенно при малой достоверности прогноза развития процесса. Так, например, в практике плотиностроения встретились с медленно движущимся крупным оползнем объемом 20 млн. м<sup>3</sup>, который может дать активную подвижку с серьезными последствиями только в экстремальных условиях при вероятности их возникновения один раз в 100 или более лет. Для завершения строительства требуется не более 10 лет; следовательно, этот слу-

чай можно отнести к «оправданному инженерному риску», ибо для предотвращения активизации оползня необходимы мероприятия, стоимость которых примерно равна и даже выше стоимости основного объекта. Однако в случае принятия варианта «риска» заранее должны быть разработаны организационно-технические и аварийные мероприятия по дальнейшему ведению строительства или восстановлению объекта при условии, исключающем катастрофические последствия.

Исследования в Таджикистане выявили районы, где оползни, обвалы и селевые потоки имеют огромные объемы, предотвращение которых нереально; они угрожают перекрытием речных долин и дальнейшим прорывом временно возникших озер с высокими паводками. Поэтому инженерно-геологическими исследованиями должны быть установлены их типы, объемы и рекомендуемые мероприятия, немедленное осуществление которых при сходе оползня исключит катастрофу. Существуют понятия о «непрерывности» и о «безопасности» эксплуатации сооружения или территории, и второе должно быть обеспечено всегда; в исключительных стихийных ситуациях допустим перерыв в эксплуатации объекта на предельно короткий срок.

Инженерная геодинамика включает в себя изучение природы, закономерностей, распространения, прогноза и других особенностей всех геологических процессов, в том числе эндогенных в специальных целях, с задачами управления, обоснования инженерной защиты от опасного их воздействия на жизнь людей, территорию, сооружения и иные народнохозяйственные объекты. Изучение большинства экзогенных геологических процессов и явлений — карста, оползней и устойчивости склонов и т. д. — неразрывно связано с эндогенными процессами — новейшими и современными движениями, формированием тектонических полей напряжений в верхней части литосферы, вулканизмом, сейсмичностью и другими. Нельзя исследовать и оценивать геологические и инженерно-геологические процессы вне прямых и обратных связей с изменяющимися во времени свойствами и состоянием пород, характером и режимом подземных вод, рассматриваемых на общем фоне геологической истории региона. При решении конкретных задач можно отдельно изучать экзо- и эндогенные геологические процессы; но при этом необходимо учитывать их взаимосвязи, устанавливая главные и способствующие факторы их развития и характерные закономерности и на основе этого разрабатывать соответствующие общие и специальные классификации. Общая теория инженерно-геологических процессов только начала создаваться.



## ГЛАВА 10.

### ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ

Классификациям геологических и инженерно-геологических процессов и явлений посвящена обширная отечественная и зарубежная литература: Ф. П. Саваренский, И. В. Попов, В. А. Приклонский, Ф. И. Котлов, Г. К. Бондарик, В. Пенк, С. Шарп, Д. Варнес и др. Классификации, их принципы, содержание и значение неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах.

Многочисленность инженерно-геологических классификаций процессов и явлений объясняется разнообразием процессов, среды и факторов их развития, практической направленностью и задачами исследований, научными интересами и методическими подходами авторов, геологическими особенностями районов, где они проводили исследования. Это создает определенные затруднения при их использовании. Многообразие геологических процессов, научных и практических задач их изучения обуславливают целесообразность составления различных инженерно-геологических классификаций, но построенных на единых методических принципах. Классифицирование является сложной задачей, но оно необходимо для единой трактовки природы процессов, взаимопонимания среди инженер-геологов и для совместной деятельности с инженерами и строителями. Классификация совершенствуется по мере развития исследований, накопления опыта изысканий, проверки прогнозов и эффективности борьбы с опасными геологическими процессами; в них отражается уровень научной разработанности общих проблем инженерной геологии.

При совершенствовании существующих инженерно-геологических классификаций процессов необходимо исходить из следующих методических положений и учитывать:

— цели и задачи классифицирования, согласно которым каждый выделенный класс, тип и вид должны содержать данные для инженерной оценки процессов и рекомендации защитных мероприятий соответствующей детальности;

— единовременное рассмотрение геологических и инженерно-геологических процессов с объединением их в группы по главным действующим факторам и механизмам развития процессов;

— целесообразность выделения среди многих взаимосвязанных действующих факторов главных (одного или двух), определяющих развитие процессов в типичной для них геологической обстановке;

— единство признаков при разделении процессов на классы, типы и виды на каждом таксономическом уровне;

— использование общих классификаций как основы при разработке более детальных — региональных и специальных;

— обязательность приближенно-количественных показателей,

характеризующих интенсивность процессов, их распространение по площади и в массиве, объемы (параметры) явлений, возникших в результате деятельности процессов, и другие данные, позволяющие судить об изменении геологической среды.

В. А. Приклонский выделяет четыре вида классификаций: общие, региональные, частные и специальные (отраслевые, по Е. М. Сергееву). Первые имеют в основном методологическое значение, определяют мышление и подходы к анализу действующих факторов и компонентов среды развития процессов. Классификации Ф. П. Саваренского, Н. И. Николаева, И. В. Попова и других являются общими и характеризуют процессы по тем или иным признакам. В практическом отношении большего внимания заслуживают региональные классификации процессов как более конкретные и базирующиеся на тех же принципах, что и общие. Они относятся к определенному региону: а) в котором распространены соответствующие стратиграфо-литологические комплексы пород; б) обладающему конкретными чертами геологической истории, включая новейшую; в) с присущими ему палео- и современными климато-гидрологическими условиями. Классификация Ф. В. Котлова [19] рассматривает только инженерно-геологические процессы и явления.

Частные классификации широко применяются и характеризуют особенности и распространение какого-либо геологического процесса в одном или нескольких геологических регионах, например оползней, карста, селевых потоков, переработки берегов и т. д. Специальные классификации предполагают оценку современных или прогнозируемых инженерно-геологических процессов применительно к задачам проектируемого строительства, обоснования инженерных мероприятий по защите сооружений и территорий с учетом ее использования; они могут быть предназначены для обоснования иных проектных и строительных решений. Таким образом, на основе общей классификации создается региональная, охватывающая процессы, распространенные на данной территории; в ее развитие разрабатываются классификации для отдельных процессов и для обоснования мероприятий по управлению или защите от них.

Признаком для общей классификации геологических процессов и их техногенных аналогов, по которому выделяются классы, могут быть главные действующие факторы (силы, вызывающие процессы): тектонические движения в литосфере; подземные и поверхностные воды; гравитационные силы, обусловленные массой пород, и т. п. Важным признаком для составления классификаций является механизм развития процесса, который отражает особенности среды его возникновения и действующие факторы. Это позволяет считать механизм процесса генетическим признаком, применимым для всех классификаций, и по нему выделяются типы процессов. По другим признакам — интенсивности, периодичности и непрерывности развития, площадям распространения, форме, объемам и т. п. — устанавливаются виды и разновидности процессов.

Для склоновых процессов ведущим признаком при разработке всех видов классификаций, но раскрываемых с разной детальностью, является преобладающий механизм движения масс пород: скатывание (обвалы и осыпи), выдавливание, скольжение (оползни чаще блокового строения) и вязко-пластические течения (оползни-потоки, солифлюкция, сплывы). В природе преобладают переходные и сложные формы движения пород на склонах, существующие одновременно или сменяющие друг друга, в зависимости от обстановки, механических свойств смещающихся пород, действующих напряжений и внешних сил. Это существенно затрудняет выделение «чистых» форм и усложняет классифицирование процессов.

В инженерно-геологической практике наибольшее значение имеют экзогенные геологические процессы и их техногенные аналоги, которые возникают и развиваются под воздействием:

- глубинных тектонических процессов;
- изменения термического режима в верхней части земной коры и на ее поверхности;
- преобразования напряженно-деформированного состояния массивов пород;
- изменения степени обводненности массивов пород, режима подземных вод и их гидравлических характеристик;
- поверхностных вод — речных, морских, водохранилищ и других водоемов и сбросных.

В каждом случае возникновение, тип и режим геологических и инженерно-геологических процессов обусловлены конкретным совместным действием разнообразных природных и техногенных факторов и зависят от особенностей среды. С учетом указанного должны классифицироваться как природные геологические, так и инженерно-геологические процессы и явления, с сопоставлением по образующим факторам, режиму и параметрам. На основании сформулированных выше положений разработана схема общей классификации геологических и инженерно-геологических процессов и явлений с указанием характерных показателей их интенсивности и развития [14]. Эта схема предполагает разделение процессов и явлений на две главные группы: эндогенные и экзогенные, взаимодействующие между собой, которые в свою очередь разбиваются на классы по совокупности действующих факторов. В классификации обособляются семь классов экзогенных геологических процессов и один класс эндогенных, каждый из которых включает несколько основных типов явлений и их техногенных аналогов. В общей классификации следует выделять только главные типы процессов и явлений. При составлении на основе предлагаемой схемы региональных и других детальных классификаций, используя системный подход, следует обособлять подтипы и виды с конкретными характеристиками геологической среды и факторов их развития, с показателями интенсивности процессов. Составление единой инженерно-геологической классификации процессов, полностью отвечающей разным целям, — трудная задача, и важно по-

казать методические подходы, правильно определить факторы, характеристики и закономерности их развития. Предлагаемая схема общей классификации геологических и инженерно-геологических процессов и явлений направлена на решение этой задачи.

## ГЛАВА 11.

### **ТИПЫ И МЕХАНИЗМЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗНЫХ КОМПЛЕКСАХ ПОРОД И ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

Представление о механизме геологических процессов необходимо для понимания обстановки, факторов и закономерностей их формирования, прогноза развития процессов во времени и возможности возникновения их новых форм; обоснованного составления расчетных схем, с целью количественной их характеристики, используемой для оценки условий строительства и разработки мероприятий по предупреждению процессов, вызывающих неблагоприятные последствия, и борьбы с ними. Проникновение в сущность механизма геологических процессов дает возможность обосновать методику управления этими процессами, что является одной из основных задач инженерной геодинамики.

### **ТИПЫ И МЕХАНИЗМЫ ПРОЦЕССОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД**

Деятельность поверхностных вод является причиной формирования разнообразных как природных, так и инженерно-геологических процессов. На берегах морей и озер протекает абразия, инженерно-геологическим аналогом которой является переработка берегов водохранилищ. Эрозия широко развита на берегах рек, в оврагах и на склонах. Процессы эрозионного размыва могут наблюдаться также в магистральных ирригационных, водоводных и судоходных каналах. Нередко процессы смыва со склонов и оврагообразование усиливаются в результате хозяйственной деятельности человека. С поверхностными водами связано формирование селей и заболачивание территорий.

В основе всех процессов, обусловленных деятельностью поверхностных вод, за исключением заболачивания, лежит процесс размыва горных пород. От того, как и с какой скоростью размываются горные породы, существенно зависят характер и интенсивность геологического процесса. Сопротивление пород размыву определяется составом горной породы, характером и величиной структурных связей, формирующихся в процессе ее генезиса и последующего преобразования, состоянием породы, способностью к выветриванию и другими факторами. По размываемости породы могут быть разделены на несколько групп. Так, на основании работ

Г. С. Золотарева, С. Д. Воронкевича, Е. М. Сергеева [39] породы были разделены: на очень легкоразмываемые (тонко-, мелко- и среднезернистые пески и супеси); легкоразмываемые (лёссовые породы); среднеразмываемые (мелкие галечники, слабосцементированные пески и различные глинистые породы); трудноразмываемые (крупные галечники, суглинки, мел, гипсы, ангидриты, соли); очень трудноразмываемые (аргиллиты, песчаники, мергели, древние глины и др.); исключительно трудноразмываемые или практически неразмываемые магматические, метаморфические и осадочные породы (известняки, доломиты, опоки и т. д.).

Размывание — процесс сложный и протекает по-разному для различных по размываемости групп пород. Так, начало и интенсивность размыва рыхлых, несвязных пород определяется размерами слагающих их частиц и средней скоростью потока. Размыв связных пород в значительно бóльшей степени определяется характером и величиной структурных связей, от которых зависит водопрочность пород. Наиболее легко размываются лёссовые породы, которые быстро разрушаются уже в спокойной воде, что приводит к интенсивному размыву берегов. Наиболее яркими примерами размыва лёссовых берегов являются процессы переработки берегов Кара-Кумского водохранилища в Средней Азии, Цимлянского водохранилища на юге Русской платформы, где отступление бровки склона происходило независимо от волнового воздействия.

Большинство горных пород, имеющих прочные структурные связи, подвергается размыву вследствие разуплотнения и дезинтеграции породы в результате попеременного увлажнения, растворения, действия агентов выветривания и других причин.

Кроме того, размыв может происходить под воздействием движущейся воды. В зависимости от характера воздействия различают абразию, эрозию, плоскостной смыв, оврагообразование, сели. Основной причиной разрушения берегов морей и озер и переноса образовавшегося материала является волнение, которое развивается на водной поверхности главным образом под воздействием ветра. В этом случае разрушительная сила волн определяется их энергией, зависящей от размеров и скорости перемещения волн, что в свою очередь определяется размерами водной поверхности (длиной разгона), скоростью и продолжительностью действия ветра, глубиной водоема в прибрежной зоне.

Размыв берегов и русла рек производится водным потоком, размывающая сила которого возрастает с увеличением расходов и скорости, что обусловлено геоморфологией долины (величиной продольного уклона) и уровенным режимом реки, зависящим от климатических особенностей речного бассейна, которые определяют условия питания реки.

Плоскостной смыв и оврагообразование осуществляются стекающими со склонов дождевыми и талыми водами. Чем больше уклоны, относительная высота и протяженность склонов, количество стекающей со склонов воды, зависящее от количества, вида,

интенсивности и распределения в течение года осадков, тем более интенсивно будут происходить плоскостной смыв и оврагообразование. Провести границу между плоскостным смывом и оврагообразованием трудно. В случае умеренных, равномерно выпадающих дождей, при медленном снеготаянии, значительной инфильтрации и испарении на относительно пологих склонах, сложенных однородными породами, преобладает плоскостной смыв. Овраги развиваются на склонах средней крутизны при выпадении ливневых осадков и быстрого снеготаяния или в результате затяжных дождей, быстро насыщающих приповерхностные горизонты рыхлых отложений, что препятствует инфильтрации.

Специфическим является селевой процесс. Сели происходят только в горных странах в результате паводков на реках или временных водотоках, возникших при обильном выпадении осадков, таянии снега и ледников или прорыве вод из расположенных высоко в горах водоемов, которые приводят к интенсивному размыву накоплений рыхлого материала и переносу его к подножью гор. Отличительными чертами селей являются внезапность их возникновения, очень высокое содержание твердого материала (до 40—60 %), большие скорости перемещения, пульсирующий режим и непродолжительность действия. Вследствие того что сели несут большое количество обломочного материала, они обладают огромной разрушительной силой.

Характерной особенностью процессов, обусловленных деятельностью поверхностных вод, является их стадийность. В результате разрушения берега в волноприбойной полосе формируется аккумулятивная часть береговой отмели, которая может гасить энергию волн и тем самым приводить к ослаблению абразионной деятельности. Эрозия на берегах также затухает по мере выработки рекой профиля равновесия. В оврагообразовании различают стадии образования промоины, роста оврага, выработки профиля равновесия и затухания. Для селевых потоков характерна периодичность, так как для образования нового селя необходимо время, в течение которого должно произойти накопление необходимого количества рыхлого материала.

Процессы, обусловленные деятельностью поверхностных вод, тесным образом связаны с другими геологическими процессами. С одной стороны, процессом, способствующим размыву пород поверхностными водами, является выветривание, с другой — абразия, речная эрозия, смыв со склонов резко активизируют такие гравитационные процессы, как обвалы, оползни и осыпи.

## **ПРОЦЕССЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Основными процессами, которые вызываются деятельностью подземных вод, являются выщелачивание, карст и суффозия. Параллельно с процессами растворения и механического выноса проис-

ходит кольматаж — вмывание переносимых подземными водами тонкозернистых и глинистых частиц в поры горной породы, вызывающее уменьшение ее водопроницаемости. При определенных условиях — снижении скорости фильтрации, изменении температуры и т. п. — возможно выпадение в осадок растворенных в подземных водах солей с образованием в пустотах и трещинах горной породы различных минеральных агрегатов. Эти процессы могут существенно активизироваться при изменении гидрогеологического режима и химического состава подземных вод в связи со строительством гидротехнических сооружений, созданием карьеров и котлованов, при откачках и нагнетаниях. С деятельностью подземных вод связано также подтопление территорий и сооружений, которое происходит как в естественных условиях, так и в результате подпора подземных вод при создании водохранилищ и утечек воды из водоводных сетей и при поливах.

В основе выщелачивания и карстового процесса лежит растворение, которое происходит при взаимодействии пород, способных растворяться (карбонатных, сульфатных, галоидных) или содержащих водорастворимые соединения, с подземными водами, обладающими определенной агрессивностью. Для того чтобы породы могли взаимодействовать с подземными водами, необходимо, чтобы они были водопроницаемыми, а для того чтобы процесс растворения был непрерывным, подземные воды должны постоянно обмениваться, т. е. находиться в движении.

Наиболее легко растворимыми породами являются каменная и калийная соли (более 320 г/л), среднерастворимыми являются гипс и ангидрит (2,1—2,6 г/л), карбонатные породы — известняки, доломиты, мрамор, мел — в дистиллированной воде практически нерастворимы. Однако в природе наиболее распространен карбонатный карст. Это обусловлено тем, что карбонатные породы широко распространены и именно они способствуют созданию условий для развития карстового процесса. Одной из основных геохимических причин возникновения и развития карста является агрессивность поверхностных и подземных вод, которая обусловлена прежде всего присутствием в их составе свободной углекислоты. Ее источником являются биохимические процессы, происходящие на поверхности земли, углекислота атмосферы и углекислота, образующаяся при выветривании пород, и из недр Земли. Агрессивность природных вод по отношению к карбонатным породам обусловлена присутствием в них таких минеральных и органических соединений, как хлористый натрий и магний, сернистый натрий и магний, сероводород и т. д. Наблюдения показывают, что водные растворы различных солей могут повысить растворимость карбонатов до определенного предела минерализации, неодинакового у растворов разного состава, выше которого растворимость начнет снижаться. Агрессивность природных вод резко возрастает в районах хозяйственной деятельности человека, где подземные воды обогащаются новыми минеральными компонентами, газами, увеличиваются их температура, кислотность и т. д.

На скорость растворения и выщелачивания растворимых горных пород и, следовательно, на скорость развития карста влияет интенсивность водообмена. Она находится в прямой зависимости от геологических условий, определяющих проницаемость пород, таких, как петрографические и текстурные особенности, залегание пород, степень тектонической раздробленности и трещиноватости, новейшие тектонические движения, и условий, влияющих на динамические характеристики потока подземных вод (рельеф местности, климат) и хозяйственной деятельности человека.

Особенностью карстового процесса является его зональность. Распределение участков с большей или меньшей закарстованностью, отличающихся образованием различных карстовых форм, определяется в основном характером движения и режима подзем-

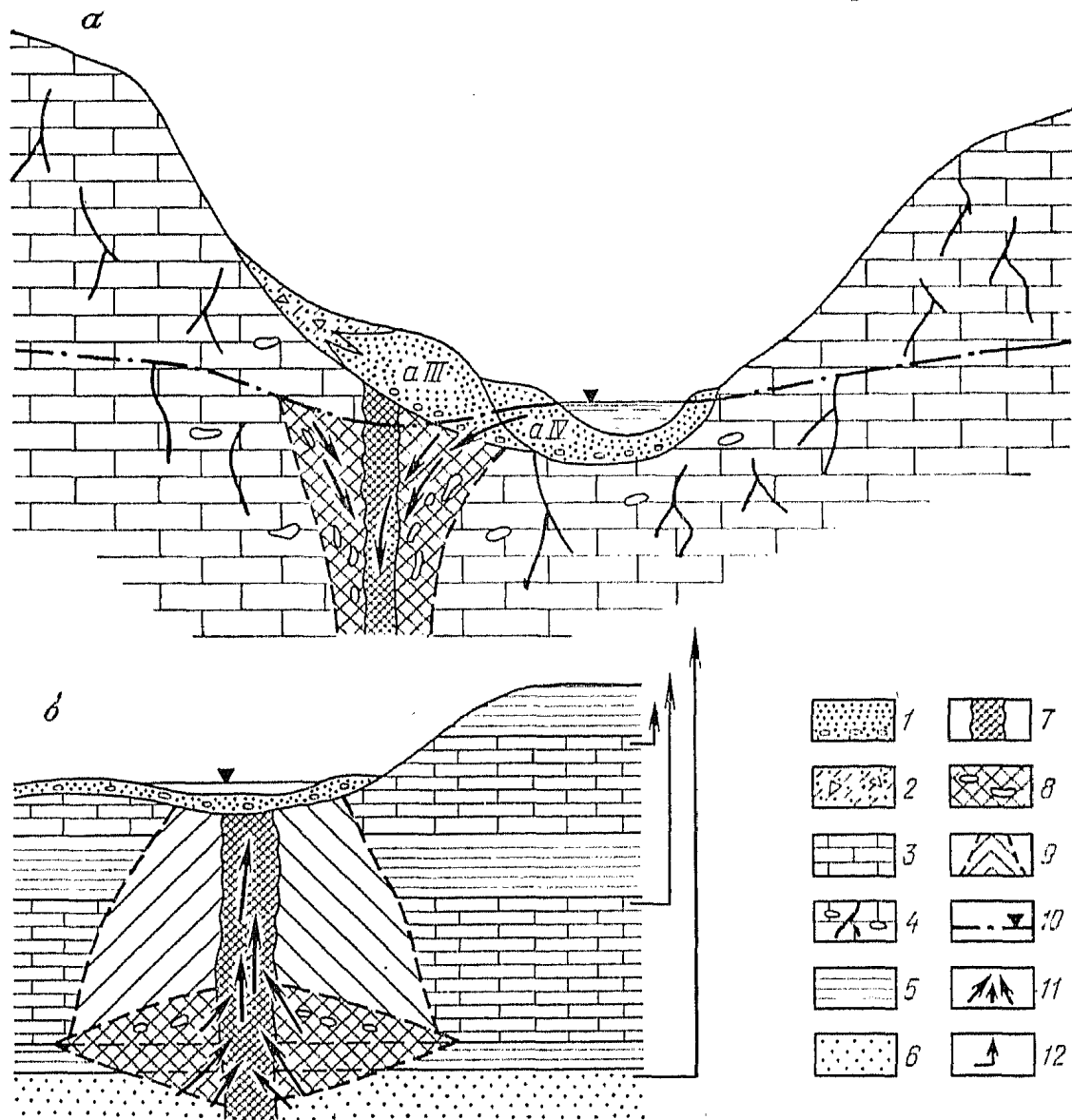


РИС. 19. Схемы формирования зон повышенной закарстованности пород при дренировании грунтовых вод тектоническим разрывом (а) и разгрузке напорных вод по разлому (б).

1 — аллювиальные пески; 2 — делювиальные суглинки; 3 — известняки; 4 — трещиноватые закарстованные известняки; 5 — глины; 6 — пески; 7—9 — зоны (7 — тектонических нарушений, 8 — повышенной закарстованности известняков, 9 — сдвижения); 10 — уровень грунтовых вод; 11 — направление движения подземных вод; 12 — напоры подземных вод



ных вод, которые зависят от геологического строения, рельефа и климата. Наиболее известной является схема вертикальной зональности развития карста вблизи речных долин Д. С. Соколова, по которой выделяются (сверху вниз) зоны аэрации, сезонных колебаний, полного водонасыщения с обособлением подзоны разгрузки у дренирующего водотока и глубинной замедленной циркуляции подземных вод. А. Г. Лыкошиным для равнинных платформенных областей выделяются горизонтальные гидродинамические зоны: присклоновая, придолинная и приводораздельная [25, 26]. Определенная зональность закарстованности наблюдается и там, где тектонические нарушения обуславливают движение подземных вод. На рис. 19, а показана зона тектонической трещиноватости в известняках на участке Павловской ГЭС на р. Уфа, которая дренирует трещинно-карстовые воды, что приводит к повышенной закарстованности пород вблизи этой зоны. Из рис. 19, б видно, что сосредоточенный восходящий поток напорных вод по разлому формирует вблизи него повышенную карстовую пустотность, а затем, вследствие суффозионного выноса песков из нижнего слоя, происходит сдвиг пород.

Для определения возможности развития карстового процесса необходимо оценить состояние химического равновесия в системе подземные воды — карстующиеся горные породы. Масштаб развития карстового процесса может быть оценен косвенными показателями, такими, как пораженность территории карстовыми формами, относительным объемом карстовых пустот и т. п. Большое значение для оценки карстового процесса имеет его скорость, которая может быть охарактеризована показателем активности карстового процесса (по Н. В. Родионову), представляющим собой относительное приращение объема растворенной породы за 1000 лет. Однако следует иметь в виду, что количество растворенных пород определяется по данным режимных наблюдений за минерализацией родников оцениваемого массива в ограниченное время, а распространяется полученная величина на тысячелетие, в течение которого интенсивность карстового процесса могла существенно измениться, и поэтому подсчитанный таким образом показатель активности карстового процесса является условным.

Суффозией называется процесс выноса мелких частиц, находящихся в составе обломочных пород (песков, галечников и др.) или заполнителя трещин, пустот или карстовых полостей, фильтрационным потоком. К суффозионным можно также отнести процесс размыва и образования полостей в лёссовых и глинистых породах.

Основными причинами развития суффозии являются, с одной стороны, большие скорости движения фильтрационного потока, с другой — определенная неоднородность подвергающейся размыву горной породы. Суффозия наблюдается главным образом в неоднородных по гранулометрическому составу породах, на контакте двух слоев, различающихся по гранулометрическому составу, в неоднородном по составу заполнителе трещин и карстовых поло-

стей, на контакте породы с заполнителем фильтров, дренажей и других искусственных сооружений.

Установлено, что суффозия в песках происходит преимущественно тогда, когда коэффициент неоднородности гранулометрического состава больше 20. Суффозия на контакте двух слоев также зависит от соотношения размеров частиц двух смежных слоев, т. е. чем больше разница диаметров частиц, тем при меньших скоростях начинается процесс. Вынос мелких частиц из песчаных пород возможен при значительных гидравлических градиентах. В. С. Истомина в 1957 г. установила, что чем больше неоднородность  $\eta$  породы, тем при меньших градиентах  $I$  начинается суффозия (рис. 20).

Иначе протекает суффозия в заполненных трещинах и пустотах. Вынос заполнителя из трещин начинается только после достижения фильтрационным потоком критических градиентов, при которых происходят прорыв и прогрессирующий размыв заполнителя.

Выщелачивание, карст и суффозия тесно связаны между собой. Обычно процесс начинается с выщелачивания растворимых компонентов породы, затем переходит в начальные и зрелые стадии образования карста и нередко сопровождается или сменяется суффозией и размывом. Процессы растворения и размыва существенно изменяют свойства горных пород — увеличивают их водопроницаемость и уменьшают плотность и прочность. Карст и суффозия являются причиной различных деформаций на поверхности и в глубине земли (воронки проседания, провалов, обрушения сводов карстовых пустот и др.), а также могут служить причиной развития оползней, обвалов и других процессов.

## ПРОЯВЛЕНИЯ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ПОРОДАХ И ТЕКТОНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

К склоновым или гравитационным процессам относятся обвалы, осыпи, оползни различных типов, солифлюкционные и десерпционные процессы и др.

Основная причина возникновения и развития этих процессов — превышение напряжений, действующих в склоне, над прочностью пород, слагающих его. Главной силой, определяющей напряженное состояние склона, является сила гравитации или собственный вес пород, зависящий от их объемной массы. Кроме того, изменяют напряженное состояние сейсмические силы, играющие существенную роль в горноскладчатых областях, взвешивание при затоплении нижней части склона и гидродинамическое давление, возни-

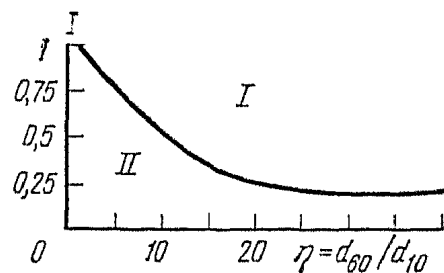


РИС. 20. Оценка возможности развития суффозии в области разрушающих градиентов фильтрационного потока (I) и безопасных градиентов (II)

кающее при движении подземных вод в сторону склона, гидростатическое давление в результате заполнения вертикальных трещин в водонепроницаемых породах, а также нагружение склона различными сооружениями. Распределение напряжений зависит от геологического строения и деформационных свойств пород, слагающих склон. Если он сложен различными по деформационным свойствам породами, то перераспределение напряжений тем значительнее, чем резче разница в деформационных свойствах. На распределение напряжений влияют условия залегания пород, наличие трещин и конфигурация поверхности склона.

Прочность пород, слагающих склон, определяется их составом и состоянием. При увлажнении поверхностными и подземными водами и в результате развития неблагоприятных процессов (суффозии, выщелачивания, выветривания и др.) происходит снижение прочности пород. При длительном воздействии внешней нагрузки уменьшение прочности происходит вследствие явления ползучести.

При воздействии на породы различных факторов происходит не только уменьшение их прочности, но возможно и преобразование их деформационных свойств и плотности, что изменяет напряженное состояние склона. Так, увеличение объемов массы пород склона (например, при увлажнении) вызывает возрастание напряжений, обусловленных действием гравитационных сил, изменение модуля деформации (или коэффициента Пуассона) приводит к перераспределению напряжений.

Некоторые факторы, приводящие к нарушению устойчивости склона, имеют двойственный характер. С одной стороны, они влияют на увеличение напряжений в породах склона, с другой — являются причиной уменьшения прочности пород. Например, движущиеся в породах склона подземные воды создают гидродинамическое давление, и одновременно под влиянием вод породы размокают, или набухают, или происходит вынос из пород мелких частиц и растворимых солей, что влечет за собой уменьшение их прочности. Сейсмическое сотрясение одновременно выступает в роли силового фактора и приводит к растрескиванию породы, что уменьшает ее прочность.

Существенным является вопрос о том, как происходит потеря устойчивости: в результате нарушения равновесия одновременно во всех точках склона либо при нарушении равновесия в отдельных его точках, а затем вдоль некоторых поверхностей, по которым и осуществляется разрушение. Моделированием на эквивалентных и материалах установлено, что потеря склоном устойчивости и, как следствие этого, возникновение и развитие оползневого процесса происходит при нарушении равновесия сначала в отдельных точках, где в породе образуются трещины, которые в свою очередь являются очагами концентрации напряжений (что приводит к еще большему нарушению равновесия и дальнейшему росту трещин) и впоследствии, объединяясь, формируют поверхность, вдоль которой и происходит смещение пород на склоне. Изложенная схема разрушения в основном отвечает случаю, когда склон

является однородным и сложен хрупкими горными породами: скальными, полускальными, плотными глинами и т. д.

По механизму склоновые процессы можно разделить на три группы: при которых смещение пород со склона осуществляется путем качения; когда смещающиеся породы скользят по склону и, наконец, процессы, в основе которых лежит вязкое течение. К первой группе относятся обвалы и осыпи, ко второй — оползни и к третьей можно отнести солифлюкционные процессы.

Обвалы и осыпи формируются на крутых, сложенных достаточно прочными породами склонах, характерных для горноскладчатых областей. Обвалы образуются в результате отчленения от склона по поверхностям ослабления крупных блоков пород, опрокидывания и скатывания образовавшихся обломков вниз по склону. В отличие от обвалов осыпи формируются на склонах, сложенных породами, которые легче подвергаются выветриванию с поверхности, а образующаяся осыпь обладает способностью к медленному перемещению вниз по склону. Основным признаком оползней является наличие хорошо выраженной зоны скольжения, отделяющей оползневое тело от остального массива склона. Нередко эта зона совпадает с менее прочными, часто глинистыми прослоями, с напластованием пород, трещинами и другими поверхностями ослабления, но может быть и новообразованием. Оползни характерны для разнообразных в тектоническом отношении районов, где сформировались склоны. Наиболее ярким примером вязкого течения пород являются солифлюкционные процессы, когда оттаявшие с поверхности отложения смещаются вниз по породам, находящимся в мерзлом состоянии. При вязком течении, которое может развиваться на очень пологих склонах, в отличие от остальных видов смещения пород происходит перемешивание материала в пределах самого оползающего тела.

Для описания отчленения пород от склонов при обвалах может служить модель хрупкого разрушения, происходящего по плоским поверхностям, ограничивающим практически абсолютно жесткое тело, которое, отделившись, под воздействием силы тяжести смещается вниз по склону с тем большей скоростью, чем круче склон. В случае оползания смещение оползневого тела рассматривается как скольжение целого или состоящего из отдельных жестких фрагментов блока по наклонным плоским или криволинейным поверхностям, вдоль которых сдвигающие силы превышают силы трения и сцепления. Моделью течения пород на склоне может служить модель вязкой жидкости.

Для развития склоновых процессов характерна стадийность. Наиболее продолжительной является стадия подготовки, в течение которой происходит постепенное уменьшение устойчивости пород под влиянием естественных и искусственных факторов. На этой стадии в породах склона практически не наблюдается внешних признаков происходящих процессов. Вторая стадия — это стадия смещения, которая начинается с нарушения равновесия склона. Для обвалов она протекает практически мгновенно, в случае

оползневого процесса смещение может быть разовым и многократным, быстрым и медленным, непрерывным и периодическим, кратковременным и долгосрочным, с неизменным или с увеличивающимся во времени объемом оползневых пород. Вязкое течение является продолжительным и непрерывным. Наконец, третья стадия — это стабилизация и восстановление устойчивости пород на склоне, когда склон вновь приобретает состояние равновесия.

Гравитационные процессы тесно связаны и с такими геологическими процессами, как выветривание и обводнение (уменьшающие прочность пород), которые играют решающую роль в подготовке обвалов и оползней. Абразия и эрозия, а также искусственная подрезка увеличивают крутизну склонов, что является причиной потери ими устойчивости. Кроме того, склоновые процессы являются источником обломочного материала для селей, нарушают поверхностный сток и режим подземных вод и т. д.

### **ПОДЗЕМНЫЕ И НАЗЕМНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЕМ ИХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Подземные и наземные деформации горных пород возникают как в природных условиях, так и в результате горных разработок, строительства, откачек и т. д.

Подземные деформации заключаются в разрушении или деформировании стенок подземных выработок или естественных полостей, образующихся при растворении и суффозии. К подземным деформациям относятся горные удары и стреляние пород, обрушение, вывалы и пучение. На поверхности земли происходит формирование мульд проседания, образующихся в результате сдвижения пород над выработанными пространствами, провалов и воронок, которые возникают над горными выработками, карстовыми и суффозионными пустотами. Деформации поверхности земли наблюдаются при уплотнении пород под весом сооружений (осадка) или вышележащих толщ пород, а также при откачках воды, нефти и газа.

Основной причиной деформаций горных пород является изменение их напряженного состояния. Естественное поле напряжений верхних горизонтов земной коры формируется под влиянием гравитационных сил, действующих вертикально вниз и возрастающих с глубиной, тектонических сил различной интенсивности, имеющих, как правило, горизонтальное направление, а также под воздействием гидростатических и гидродинамических сил, обусловленных движущимися подземными водами, и инерционных, возникающих при землетрясениях. Действие всех этих сил приводит к тому, что породы, находящиеся на достаточной глубине, испытывают главным образом всестороннее сжатие, вызывающее их уплотнение. При образовании в сплошном массиве пород естественных полостей или при проходке выработок вокруг пустот существенно изменяется напряженное состояние, которое выражается в концент-

рации, или резком возрастании напряжений и увеличении их градиента. Например, вертикальные напряжения на боковых стенках выработки увеличиваются в 2—3 раза по сравнению с напряжениями в нетронутом массиве. Еще больше возрастают скалывающие напряжения, которые пропорциональны полуразности главных напряжений. Под воздействием возросших напряжений порода получает возможность деформироваться вплоть до разрушения в сторону образовавшейся пустоты.

В зависимости от свойств и состояния горной породы в подземных выработках и полостях наблюдаются различные виды деформаций. Горные удары или стреляние пород происходит в прочных нетрещиноватых породах в выработках, пройденных на достаточно большой глубине. Горные удары наблюдаются в том случае, когда напряжения в породах, окружающих горную выработку, становятся соизмеримыми с прочностью пород на одноосное сжатие  $R_c$ . Например, по данным И. А. Турчанинова и др., при наблюдениях на Хибинских рудниках установлено, что горные удары реализуются при условии, когда действующие в породах вблизи выработки напряжения превышают величину  $0,8 R_c$ . Однако горные удары возможны только тогда, когда породы, в которых пройдена выработка, практически не проявляют пластических свойств и обладают способностью хрупко разрушаться или когда скорость деформации, обусловленная нарастанием напряжений, превысит максимально возможную скорость пластического деформирования пород. Таким образом, горный удар — это явление мгновенного хрупкого разрушения предельно напряженного участка массива на контуре выработки, сопровождающееся дроблением и выбросом породы в выработку. Если хрупкое разрушение пород на контуре выработки выражается в отскакивании отдельных кусков породы, то такое явление называется стрелянием горных пород. Постепенное хрупкое разрушение пород под действием высоких напряжений может проявляться в виде шелушения и отслаивания пород на поверхности горной выработки.

Если породы, в которых пройдена выработка, сильно трещиноваты, раздроблены или слабо сцементированы, то основными процессами в выработках будут обрушения и вывалы. В этом случае максимальные значения напряжений, обусловленные контурным эффектом (зона опорного давления), наблюдаются не на контуре выработки, а на некотором расстоянии от него. Поэтому напряжения вблизи контура невелики, что позволяет отдельным кускам и глыбам породы под действием силы тяжести обрушаться в сторону свободного пространства. По мере удаления от контура выработки напряжения растут, и поэтому разрушение и условия выпадения отдельных блоков будут определяться соотношением их веса и сил трения по тем боковым граням блоков, на которые действуют сжимающие напряжения. Наконец, на некотором расстоянии будет зона, в пределах которой напряжения достаточно большие, чтобы удерживать раздробленную породу, но не настолько велики, чтобы ее разрушить.

В случае, когда горная выработка пройдена в пластичных породах — глинах, солях и т. п., увеличение напряжений вблизи ее контура до значений, превышающих предел текучести, приводит к выдавливанию породы в выработанное пространство или к пучению.

Образование пустот в массиве пород является причиной деформаций поверхности: ее проседания, образования воронок и провалов. Наличие пустот на глубине лишает опоры вышележащие толщи, они прогибаются в сторону выработанного пространства, что приводит к перераспределению в них напряжений. Непосредственно над пустотами в породах формируется зона растягивающих напряжений. Это приводит к растрескиванию пород и, как следствие, к вывалам и обрушению кровли подземных выработок или карстовых полостей. Если глубина расположения пустот невелика, то зона обрушения может достигнуть поверхности земли, на которой образуются различной формы провалы и воронки. При глубоком расположении выработанных пространств на поверхности земли формируется мульда проседания или сдвижения, размеры и амплитуда которой зависят от глубины разработок, мощности вынимаемого пласта, геологического строения (состава пород, условий залегания и т. д.) и других факторов.

Интенсивные откачки подземных вод, нефти и газа приводят к образованию на поверхности земли мульд оседания с максимальной осадкой в несколько метров. В результате длительных и интенсивных откачек пьезометрические уровни подземных вод на территориях ряда городов значительно понизились, что привело к образованию мульд оседания с максимальной величиной понижения поверхности (в Лондоне на 0,3 м, в Токио на 7,0 м и в Мехико на 9,0 м). Механизм оседания земной поверхности при откачках подземных вод сводится к следующему. В процессе снижения уровня грунтовых вод лишённые воды слои вследствие отсутствия ее взвешивающего действия становятся тяжелей и оказывают дополнительное давление на нижележащие толщи пород, что приводит к их уплотнению. При откачках напорных вод в результате водопонижения происходит снижение напоров, которое при практически неизменном общем давлении вызывает рост эффективных напряжений и, следовательно, уменьшение пористости пород, т. е. их сжатие. Процесс уплотнения пород в результате откачек подземных вод является сложным, протекает во времени и трудно поддается прогнозу.

## ГЛАВА 12.

### **НЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ТИПОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ**

Роль неотектонических движений в формировании типов геодинамической обстановки (геодинамических условий) выражается, во-

первых, в строении тектогенного рельефа, во-вторых, в неотектонической нарушенности массивов пород и, в-третьих, в современном напряженном состоянии приповерхностной части земной коры. Закономерности строения тектогенного рельефа и неотектонической нарушенности массивов пород определяются типами неоструктур, а напряженного состояния — изменением средней величины градиента скорости глубинных современных и новейших движений, измеренных на верхней поверхности коры. Существует 8 главных типов континентальных неоструктур высшего ранга, сформировавшихся на определенных формационных комплексах пород субстрата. Это — эпигеосинклинальные и эпиплатформенные орогены, рифтогены, сводовые структуры щитов и срединных массивов, активизированные платформы, сложенные дислоцированными породами магматических, метаморфических и осадочных формаций, плиты, компенсированные прогибы и впадины, сложенные слабодислоцированными породами осадочных формаций.

Изучение М. В. Гзовским [6] закономерностей изменения верхнего предела градиента скорости новейших вертикальных тектонических движений и наибольшего среднегодового потребления энергии на тектоническое деформирование всей толщи коры в пределах территории СССР позволило выделить 4 типа областей разной тектонической подвижности, отличающихся друг от друга по среднему значению градиента скорости новейших движений на половину десятичного порядка. Каждый из типов области разной тектонической подвижности характеризуется определенным уровнем тектонической напряженности. Напряженное состояние земной коры бывает одинаковым в разных типа неоструктур и разным в неоструктурах одного типа. Сочетание типов неоструктур с присущими им геодинамическими особенностями и типов областей разной тектонической подвижности, отличающихся по величине напряженности земной коры, определяет выделение типов геодинамического режима в приповерхностной части земной коры. Под типом геодинамического режима понимается сочетание эндогенных процессов на определенном уровне напряженности земной коры, характеризующее геодинамическое состояние пород — неотектонической нарушенности, сжатия — растяжения, частоту сотрясаемости, подверженности разному воздействию теплового потока. Геодинамические режимы характеризуют региональные закономерности совокупного проявления эндогенных процессов, имеющих один энергетический источник — процесс восходящих движений. Выделение геодинамических режимов является основой для изучения сейсмичности и напряженного состояния массивов пород при оценке того или иного региона в целях его народнохозяйственного освоения.

Совокупность и характер экзогенных процессов в пределах разных типов геодинамических режимов определяют типы геодинамической обстановки в целом.



## ТИПЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

По данным В. Е. Хаина и Е. В. Артюшкова, геодинамические режимы формируются движениями, зарождающимися на всех уровнях глубинного строения Земли, но наибольшую роль играют движения, начиная с уровня коровых, где зарождаются землетрясения. Собственно тектонические напряжения создаются поверхностными (покровными), экзотектоническими, а также изостатическими движениями.

В инженерной геологии геодинамические режимы могут рассматриваться только для определенного объема пород, т. е. неоструктур. Наибольшая интенсивность движений характерна для неоструктур горных стран и выражается как в их максимальных амплитудах и скоростях, так и в градиентах вертикальной составляющей и скорости деформаций. Амплитуды максимальных поднятий ограничиваются изостатической некомпенсированностью, которая развивается в первых сотнях метров при высокогорном рельефе на разной высоте в различных регионах орогенов, рифтогенов, сводовых структурах древних платформ. Послеледниковые изостатические поднятия захватывают обширные пространства щитов, платформ, плит, испытавших покровное оледенение. Изостатические движения разной природы вызывают перераспределение напряжений в приповерхностной части земной коры.

Сейсмические процессы проявляются на поверхности вдоль зон с большими значениями среднего градиента скорости вертикальных движений, будь то граница континента или отдельной элементарной структуры. Внутри сейсмических поясов наиболее опасными являются пограничные зоны дифференцированно развивающихся неоструктур, а в центральных частях орогенов сейсмичность ослабевает. Мало дифференцированные неоструктуры платформ, плит, прогибов испытывают воздействие землетрясений из других регионов. Высокая сейсмичность свойственна зонам наиболее молодой вулканической деятельности как активно развивающейся, так и потухшей.

Специфика сочетания изостатических движений, сейсмичности и вулканической деятельности на фоне высокого напряженного состояния неоструктур горных стран позволяет выделить их в класс сложных геодинамических режимов, а неоструктуры равнинных стран — в класс простых геодинамических режимов. В пределах СССР последние составляют более  $\frac{2}{3}$  территории (табл. 19).

Как видно из таблицы, при современном уровне изученности можно выделить 20 типов геодинамических режимов высшего ранга, из которых 14 относятся к классу сложных. Они составляют около одной трети территории нашей страны. В соответствии с уровнями тектонической напряженности геодинамические режимы составляют 4 типологических ряда с разными типами неоструктур. По совокупности режимов разной напряженности неоструктуры составляют 5 групп. К первой относятся рифтогены, имеющие только интенсивно напряженный режим 1-го типологического ряда; ко

Таблица 19

## Геодинамические режимы разных типов неоструктур

Типы континентальных неоструктур	Рельеф	Средний уровень тектонической напряженности земной коры в областях разной тектонической подвижности на территориях СССР (по М. В. Гзовскому) для типологических рядов (в МПа)				Класс геодинамических режимов
		интенсивных (100±50)	напряженных (70±35)	умеренных (40±20)	слабых (10±5)	
Орогены: эпигеосинклинальные эпиplatformенные	Высоко- и средне- горный	+	+	+	-	Сложный
		+	+	+	-	
Рифтогены		+	-	-	-	
Сводовые структуры щитов и срединных массивов	Низкогорно- равнинный	+	+	+	+	
Активизированные платформы		-	+	+	+	
Платформы, плиты	Холмисто- равнинный и низменный	-	-	+	+	Простой
Компенсированные: прогибы впадины		-	-	+	+	
		-	-	+	+	

второй — орогены (эпигеосинклинальные и эпиplatformенные), характеризующиеся режимами трех типологических рядов; к третьей — сводовые структуры щитов и срединных массивов, в пределах которых развиты режимы всех четырех типологических рядов; к четвертой — активизированные платформы, для которых характерны режимы трех типологических рядов; к пятой — платформы, плиты, компенсированные прогибы и впадины, для которых характерны режимы двух типологических рядов.

На природные типы геодинамических режимов накладываются воздействия технической деятельности человека, которые по своим масштабам и глубине проникновения в земную кору соизмеримы с природными. Техногенные (возбужденные) движения проявля-

ются как пликативные с преобладанием отрицательной вертикальной составляющей. Одновременно они вызывают возбужденную сейсмичность. Для участков с активным развитием горизонтальных сжимающих напряжений отмечаются дислокации со сдвиговой составляющей. По классификации В. Е. Хаина [46] они могут относиться не только к экзотектоническим, но и к коровым.

Рассмотрим особенности геодинамических режимов четырех типологических рядов.

1. Интенсивно напряженные геодинамические режимы, определяемые высокой сейсмичностью, изостатической некомпенсированностью верхних частей горных сооружений высотой в несколько сотен метров. В высоких частях орогенов вероятно многократное разуплотнение массивов и преобладание напряжений растяжения. Для рифтогенов характерно проявление вулканизма, более резкая смена изостатически компенсированных и некомпенсированных частей массивов. Это районы верхних частей высокогорного крутосклонного рельефа (Тянь-Шаня, Кавказа, Памира, Забайкалья, Камчатки) с большой глубиной расчленения («энергией рельефа»), с возможными провалами вершин. В изостатически некомпенсированных частях горных сооружений с увеличением высоты плотность одних и тех же пород закономерно уменьшается. В интенсивно поднимающихся неоструктурах происходит частичное снятие глубинных напряжений, энергия сжимаемых напряжений переходит в работу расширения всего массива. Устойчивость поднятий определяет сохранность поля растягивающих горизонтальных напряжений на современном этапе. Геодинамическое состояние пород в массивах этого типологического ряда определяется высокими горизонтальными напряжениями.

2. Напряженные геодинамические режимы, определяемые сейсмичностью, в том числе под действием транзитных землетрясений, изостатической компенсированностью, активным развитием напряжений растяжения-сжатия в соответствии с особенностями неоструктурного плана. Эпигеосинклиналильные области характеризуются развитием потухшего вулканизма, который был активен в исторический период. Для рифтогенов характерно проявление современного вулканизма. Сюда относятся горные районы Верхоянья, Карпат, Крыма, Восточного Забайкалья и др. Рельеф в этих районах имеет меньшую, чем в районах 1-го типологического ряда, глубину расчленения, более пологие склоны. Геодинамическое состояние пород в целом аналогично предыдущему рангу.

3. Умеренные геодинамические режимы, преимущественно асейсмичные, с изостатической компенсированностью, определяемые напряжениями дифференцированных поднятий и некомпенсированных опусканий. К нему относятся средне- и низкогорные части горных сооружений двух первых типологических рядов и горы типа Алтая, Бырранга, Урала с широкими водораздельными поверхностями и небольшой глубиной расчленения. Сюда же относятся части платформ и плит, испытывающие послеледниковые изостатические поднятия.

Различия геодинамического состояния пород одного состава в пределах неоструктур с разными уровнями напряженности геодинамических режимов выражаются в разной степени их трещиноватости. Как было установлено для архей-протерозойских метаморфических и магматических пород Удокано-Становой горной области, относящейся к 1-му, 2-му и 3-му типологическим рядам геодинамического режима, трещиноватость одних и тех же пород уменьшается со снижением напряженности.

4. Слабые геодинамические режимы, определяемые слабой сейсмичностью и асейсмичностью территорий, развитием локальных деформаций; с концентрацией напряжений на границах горста и грабена, флексурных изгибах и крыльях куполов (внеледниковые части платформ, плиты, Закарпатские впадины, Прикаспийская впадина и др.).

Выделенные классы и типологические ряды геодинамических режимов служат основой для выявления типов геодинамической обстановки (условий), которые создаются сочетанием специфических наборов (комплексов) экзогенных процессов.

#### **СВЯЗЬ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ТИПАМИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И ВЫДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ**

Связь экзогенных процессов с особенностями геодинамического режима неоструктур можно проследить по признакам и показателям, которые по своему значению отражают эту связь. Такими признаками, характеризующими влияние геодинамических режимов неоструктур на активность экзогенных процессов, являются интенсивность и экстенсивность проявления процессов.

Показателями интенсивности проявления экзогенных процессов служат: категории скорости протекания, объемы возможных смещений, размывов, провалов земляных масс, постоянство воздействия или частота повторяемости. Скорости протекания процессов выражаются в следующих градациях — свободного падения, высокие, средние, малые. При этом у разных генетических групп процессов общеприняты для них величины этих градаций различны и должны выражаться в соответствующих физических единицах измерений. Объемы возможных смещений характеризуются как грандиозные, крупные, средние, малые, отдельные камни. Они оцениваются по одной шкале величин для всех генетических групп. По характеру проявления процессов во времени выделяются 4 категории — внезапные, циклические в зависимости от пульсации современных движений, приливно-отливных явлений и солнечной радиации; ежегодные в определенные сезоны; постоянно развивающиеся, но неравномерные. Эти показатели интенсивности отражают связь с рельефом, геодинамическим состоянием и нарушением пород, определяемых как эндогенными, так и климатическими зональными факторами. Сочетание этих показателей позволяет предложить шкалу относительной интенсивности про-

цессов. Так, сочетание скоростей свободного падения или высоких с грандиозными или крупными объемами смещений и внезапным проявлением во времени определяет катастрофический (I) характер интенсивности процесса. При любом характере проявления во времени сочетание высоких или средних скоростей с грандиозными или крупными объемами смещений определяет высокую (II) интенсивность процессов. При любом характере проявления во времени, кроме внезапного, сочетание средних скоростей со средними и малыми объемами смещений определяет среднюю (III) интенсивность процессов. Малые скорости в сочетании с малыми объемами при любом характере проявления во времени определяют слабую (IV) интенсивность.

Процессы, которые развиваются геологически длительное время и характеризуются перемещением малых объемов земляных масс, следует оценивать по экстенсивности их развития — характеру распространения по площади и проценту занятости территории процессом. По характеру распространения процессов по площади выделяются: сплошные, прерывистые, спорадические, единичные. Занятость территории процессом целесообразно оценивать по следующим градациям (в %): 100, 100—50; менее 50, но более 10; менее 10. Сочетание показателей, характеризующих экстенсивность проявления процессов, также определяет ее относительную шкалу (максимальная — 1, средняя — 2, слабая — 3). Максимальная экстенсивность проявления процессов определяется сплошным или прерывистым их распространением при занятости территории не менее 50 %; слабая — при спорадическом или единичном их развитии и занятости территории менее 10 %. Высшие и низшие степени интенсивности и экстенсивности имеют различные вероятные области проявления. Катастрофическая и высокая степень интенсивности процессов характерна для высоко- и среднегорного рельефа и морских побережий. Максимальная экстенсивность большинства процессов характерна для холмисто-равнинного и низменного рельефа.

Оценку активности процессов по интенсивности можно выразить в коэффициентах наименьшего кратного объема или скорости смещения генетического типа процесса, являющегося ведущим. Соотношение активности процессов экстенсивной группы по отношению к интенсивной предлагается принять с постоянным множителем  $10^{-4}$ , соответствующим кратности годовых циклов второй группы по отношению к длительности развития процессов первой группы за 10 000 лет послеледниковой эпохи. Эндогенные процессы, внезапно проявляющиеся, и вызванные ими явления и процессы на поверхности должны быть вне шкалы сравнения, обозначаться индексом «катастрофические». Предлагаемый подход позволяет предложить систему качественных оценок опасности проявления современных процессов и пораженности территории, которую в конкретно-региональных условиях можно выразить в относительных баллах, а на локальных участках — в прямой количественной оценке.

Многие процессы требуют оценки как по интенсивности, так и по экстенсивности. Предлагаемая система оценок позволит учитывать зональные изменения аazonальных процессов (растворения, размывания, некоторых типов гравитационной группы), что выразится в изменении их скоростей, объемов смещений, временном характере проявления.

На основе предложенной системы оценок рассмотрим связь экзогенных процессов с геодинамическими режимами неоструктур (табл. 20). Как видно из таблицы, влияние геодинамических режимов сказывается на наборе процессов и степени их интенсивности и экстенсивности. Но при этом не везде есть полное совпа-

Т а б л и ц а 20

**Связь современных геологических процессов с типологическими рядами геодинамических режимов**

Процессы	Режимы типологических рядов			
	Интенсивный	Напряженный	Умеренный	Слабый
Вулканические	A—I+II	—	—	—
Сейсмологические:				
сейсмодислокации	A—I+II	—	—	—
сейсмогравитационные	A—I+II	A—IV	—	—
Гравитационные:				
смещение пород	A—I+III	—	—	—
сход лавины	A—I—III B—I—2	A—I—III B—2	A—I—IV B—3	—
Размывание:				
на склонах	B—3 <sup>1</sup>	B—3	B—2—3	B—2—3
по руслу	A—IV	A—I—III	A—II—III	A—IV
абразионное	—	A—II	A—III	A—IV
Растворение:				
карст	A—II B—I	A—III B—I	A—III B—2—3	B—3
суффозия	—	—	B—3	B—1—2
Заболачивание	—	—	B—3	B—1—2
Эоловые	B—1 <sup>2</sup>	—	B—2—3	B—1—2
Рузуплотнение и выветривание	B—1	B—1 <sup>5</sup>	B—2 <sup>4</sup>	B—2—3
Криогенные и посткриогенные	B—3 <sup>3</sup>	B—3	B—2—3	B—1
Нивальные	A—II	A—III	—	—

П р и м е ч а н и е. А — интенсивность, I—IV — ее шкала; Б — экстенсивность, 1—3 — ее шкала (см. с. 180).

<sup>1</sup> Размывание склонов на больших высотах не выражено активно из-за нивальных процессов и морозного выветривания.

<sup>2</sup> Ветровое воздействие оказывается везде, но формы выдувания не успевают формироваться.

<sup>3</sup> Криогенные воздействия связаны с вертикальной климатической зональностью.

<sup>4</sup> Появление лесной зоны снижает активность рузуплотнения и морозного выветривания и способствует равновесию между сносом и выветриванием.

<sup>5</sup> Выветривание максимально активно в субтропических и тропических климатических зонах.

дение геодинамической обстановки на поверхности с напряженностью земной коры.

Из пяти групп выделенных неоструктур орогены и рифтогены характеризуются преобладанием интенсивно напряженных и напряженных режимов, активной сейсмичностью, и поэтому для них характерны экзогенные процессы максимальной интенсивности. Ведущими по интенсивности являются гравитационные процессы. Это позволяет орогены и рифтогены объединить в один тип геодинамической обстановки.

Сводовые структуры щитов и срединных массивов, составляющие отдельную группу неоструктур по набору геодинамических режимов, отличаются от орогенов и рифтогенов отсутствием вулканической деятельности, меньшей сейсмичностью, большой изостатической компенсированностью и стабильностью в целом. От платформ, плит и прогибов они отличаются горным рельефом. Все это позволяет выделить эту группу неоструктур со всеми типологическими рядами геодинамических режимов в отдельный тип геодинамической обстановки.

Активизированные платформы по типам элементарных неоструктур и рельефу большей частью являются аналогичными частям и структурам стабильно развивающимися, характеризующимися простыми геодинамическими режимами. Как видно из табл. 20, процессы, характерные для 3-го типологического ряда геодинамических режимов, по величине интенсивности и экстенсивности близки к 4-му и поэтому могут быть объединены в один тип геодинамической обстановки. Таким образом, условия формирования процессов и их активность в зависимости от типологического ряда геодинамических режимов и специфики неоструктур позволяют выделить три типа природной геодинамической обстановки высшего ранга (табл. 21).

При дальнейшей детализации типов геодинамической обстановки более низкие таксономические единицы ее могут зависеть только от состояния пород или форм рельефа в случаях, если они принадлежат к одному типу развивающихся неотектонических элементов.

Таким образом, большинство процессов развито во всех типологических рядах геодинамического режима (см. табл. 20), но с разной активностью (как по интенсивности, так и по экстенсивности проявления). Поэтому, только познавая состояние процесса по предложенной системе оценок, мы познаем само движение — сам процесс, его динамику, что имеет фундаментальное методологическое значение для проблемы управляемости процессов, создания системы охранных мероприятий, геолого-экономической оценки территории с целью обеспечения ее безопасности.

Т а б л и ц а 21

Типы природной геодинамической обстановки высшего ранга

Характеристика типов геодинамической обстановки	Массивы пород субстрата и их состояние	Типы рельефа	Ведущие экзогенные процессы по:	
			интенсивности	экстенсивности
Орогены и рифтогены с напряженным и интенсивно напряженным геодинамическим режимом и максимальным развитием экзогенных процессов высокой интенсивности	Интенсивно трещиноватые и разуплотненные в сводовых частях неоструктур. Прочные и высокопрочные, сложно дислоцированные	Высоко- и среднегорный крутосклонный, с большой глубиной, небольшой густотой расчленения	Гравитационные	Разуплотнения
Сводовые поднятия щитов и срединных массивов с разными геодинамическими режимами и максимальным развитием экзогенных процессов средней и слабой интенсивности			Гравитационные, размывания	Размывания и медленные гравитационные движения по склонам
Платформы, плиты, прогибы впадины с умеренным и слабым геодинамическим режимом и наименьшим развитием экзогенных процессов, экстенсивно проявляющихся	Трещиноватые и разуплотненные в соответствии с хрупкостью пород. Недостаточно и мало прочные	Холмисто-равнинный и низменный	Аккумуляции разного генезиса	Выветривания, заболачивания



## ГЛАВА 13.

### РОЛЬ КЛИМАТА И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В ФОРМИРОВАНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Формирование геологических процессов в определенной мере зависит от климата. Баланс, режим и соотношение тепла и влаги и, следовательно, гидрогеологические и гидрологические условия территорий, развитие и типы кор выветривания, характер растительности и четвертичного покрова связаны с климатом. Климатические условия определяют многовековые, вековые, многолетние, сезонные и суточные изменения температуры, влажности и состояние пород в приповерхностной зоне, обеспечивают термодинамически и геохимически их гипергенные изменения. Наконец, круговорот воды в природе энергетически определяет размыв пород и их переотложение, т. е. плиоцен-четвертичное осадконакопление и континентальный литогенез в целом. Эти аспекты важны в инженерной геодинамике, прежде всего в плане выявления типов и парагенетических ассоциаций геологических процессов, тенденций и интенсивности их развития.

Изучая влияние климата на геологические процессы, инженерная геодинамика в основном использует:

а) климатические закономерности, выражающие термодинамическое взаимодействие атмо-, гидро- и литосферы, вызванное влиянием Солнца и, вероятно, космоса; они реализуются взаимосвязанно, но по-разному на глобальном, региональном и локальном уровнях;

б) глобальные геодинамические закономерности, отображающие механизм и результаты длительного кумулятивного взаимодействия атмосферы и приповерхностной части литосферы, что выражено в существовании различных региональных геодинамических обстановок и ландшафтно-климатических зон;

в) гидрологические и гидрогеологические закономерности формирования поверхностного и подземного стока, от режима и динамики которого зависят интенсивность смыва и эрозии, подмыва склонов, развитие карста и других процессов; в случае абразии эти закономерности характеризуют динамику волнений при различных ветровых режимах;

г) физические и химические закономерности, присущие разнообразным совместным изменениям конкретных компонентов метеогидрологических условий (атмосферных осадков, температуры и влажности воздуха, ветрового режима, скорости и расходов водотоков и т. п.) и управляющие гипергенезом, переотложением масс, их литогенезом в зонах аккумуляции.

## КЛИМАТ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ КАК ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Каждый регион или крупная его часть характеризуются своими парагенетическими ассоциациями и интенсивностью геологических процессов, что определяется главным образом комплексами пород, энергией рельефа, климатом, гидрологическими факторами. Два первых фактора в определенной мере зависят от климата, поскольку плиоцен-четвертичное осадконакопление и рельефообразующие функции климата зональны. Это прослеживается на примере развития оледенений, пустынь, тропиков, что рассмотрено в работах К. К. Маркова, Н. И. Николаева, Н. П. Костенко и др. Е. М. Сергеев, А. В. Минервин и др. показали, например, что образование лёссов связано с морозным выветриванием, характерным для субарктических условий.

Климатическими условиями в основном определяется талое или мерзлое, влажное или сухое состояние пород, а вместе с комплексами пород и рельефом — особенности гидрогеологических и гидрологических условий, характер растительного покрова и, как следствие, области развития тех или иных процессов, их масштабы. Климатические и гидрологические факторы, их изменения влияют на характер и интенсивность выветривания пород, с чем связано формирование делювия, осыпей, оползней, обвалов, селей и других процессов: определяют склоновую, овражную и речную эрозию, абразию речных, озерных и морских берегов, склоновый сток и формирование селей, инфильтрацию атмосферных вод, которая может сопровождаться не только уменьшением прочности пород, но и выщелачиванием или засолением в зоне гипергенеза.

Климат и его компоненты, гидрологические условия влияют на развитие геологических процессов и формирование склонов в основном через другие факторы (изменение обводнения массивов пород, подмывы склонов и т. п.). В создании среды для возникновения процессов и явлений разных типов, преимущественно приповерхностных, климат участвует непосредственно. Прямое воздействие прежде всего состоит в изменении температуры и влажности пород; его следствие — появление температурных напряжений, трещин, снижение прочности пород, возникновение криогенных текстур. От климатических условий зависят скорость и степень выветривания пород, мощности кор выветривания и их горизонтов. По Н. Тханю [43], в СРВ суточный максимум осадков равен 570—1000 мм, а годовой — 4880 мм (на высоте более 1500 м). Там, где круглый год высокие температуры и влажность, мощность кор выветривания достигает 20—50 м (например, на сланцах района Бакуан и Енбай); если преобладает испарение, коры малой мощности и нередко без верхнего глинистого горизонта. Сочетание высоких температур и влажности обуславливает в СРВ возрастание скорости гидролиза силикатов в 4 раза, выщелачивания горных пород и разложения растительного опада в 5 раз больше, чем в умеренных широтах. На характер выветри-

вания влияет также большое содержание нитратов в дождевых водах. В Ханое, например, на 1 га в год выпадает с дождями от 15,5 до 70 кг нитратов, что в десятки раз выше, чем в умеренных широтах.

Обычно выветривание завершается формированием менее прочных, чем исходные, пород. Однако в семиаридном климате при определенных условиях образуется упрочненный элювий в виде кремневых и карбонатных «корок» (по данным И. А. Парабучева).

Роль поверхностных вод в формировании геологических процессов огромна. Например, чем больше количество осадков и доля стока, прежде всего ливневого, тем интенсивнее смыв кор выветривания и овражная эрозия. От расхода, скорости и энергии паводков зависят интенсивность речной эрозии, возможность формирования селей. При подмывах склонов, изменении их профиля перераспределяются напряжения, уменьшается устойчивость массивов.

Взаимодействие поверхностных вод и территорий сложное; оно не ограничивается контактом между ними и распространяется на ту или иную глубину в зависимости от свойств пород и их проницаемости. Водный поток действует на массив пород не только механически, но и физико-химически, обуславливая его увлажнение, растворение цементирующих компонентов или самих пород и т. д. От степени и скорости такого воздействия потока зависит объем среды, которая подготавливается им самим для эрозии или абразии или же вовлекается в карстообразование, суффозию и т. д. Важен и другой аспект этого воздействия — зависимость интенсивности эрозии и абразии от размера фракций или отдельностей, которые определяют формирование отмытки и величины размывающих скоростей.

Изложенное иллюстрирует важное методологическое положение о необходимости комплексного и всестороннего анализа различных климатических факторов при решении инженерно-геологических задач.

### **ШИРОТНАЯ И ВЫСОТНАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПАРАГЕНЕЗИС И ИНТЕНСИВНОСТЬ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Природная (ландшафтно-климатическая) зональность впервые обоснована В. В. Докучаевым; солнечная радиация, степень общей увлажненности территории и соотношение количества тепла и влаги определяются географической широтой местности и закономерностями макроциркуляции атмосферы. Для методологически правильного анализа природной обстановки и уяснения роли в их формировании климатического фактора необходимо глубокое понимание климатической зональности и ее влияния на парагенез геологических процессов.

По В. В. Шулейкину, макроциркуляция атмосферы управляется в основном двумя тепловыми процессами, порождаемыми конт-

растом температур между экватором и полюсами, сушей и океанами. С первым эффектом связан восточный перенос атмосферных масс в низких широтах и западный — в умеренных и высоких, а также меридиональная макроциркуляция атмосферы; со вторым — временные нарушения этой основной закономерности. В известной мере и широтная, и меридиональная макроциркуляция атмосферы локализована на планете наличием материков и океанов, их неравномерным распределением между северным и южным полушариями, основными гипсометрическими различиями на материках и на дне океанов. В соответствии с этими закономерностями находится широтная и высотная климатическая зональность. По данным Г. В. Витвицкого, меридиональные составляющие создают долготные различия климатов в пределах широтных зон, и поэтому можно говорить и о долготной климатической зональности.

Широтная зональность более четко проявлена в средних и высоких широтах, особенно на платформах. Так, на Западно-Сибирской плите с севера на юг уменьшается относительное количество тепла, расходуемого на испарение, и возрастают тепловые затраты на нагрев пород. Это определяет состояние горных пород в верхней части разреза, глубину залегания и минерализацию грунтовых вод, гидролого-климатическую зональность, парагенетические ассоциации геологических процессов в разных широтах, т. е. существенные широтные отличия инженерно-геологических условий в пределах одинаковой в структурно-геологическом отношении территории. Значение этих зональных геологических различий велико, и они были положены В. Т. Трофимовым в основу инженерно-геологического районирования наравне с региональными геологическими факторами и получили отображение на карте в ранге инженерно-геологических зон (зонально-геологического фактора).

Учитывая характер колебаний условий устойчивости склонов в течение года, Е. П. Емельянова обосновала климатическую зональность современного оползнеобразования, выделила на земном шаре шесть климатических зон, различных по зависимости оползневых процессов от климатических условий и, следовательно, требующих различных мероприятий для повышения устойчивости склонов. Например, в зоне бореальных климатов, находящейся вне области многолетней мерзлоты, «... мероприятия по регулированию поверхностного стока уменьшают насыщение грунтов склона в период выпадения осадков в жидком виде, но в наиболее неблагоприятный для устойчивости склонов период снеготаяния их эффект очень мал». В борьбе с поверхностными смещениями основную роль здесь должны играть мероприятия по регулированию термического режима грунтов. По Ю. А. Мещерякову, в средних и тропических широтах максимум интенсивности эрозионных процессов приходится на пояс умеренно-недостаточного увлажнения с индексом сухости 1—2. По мере приближения к субтропикам усиливается карстовый процесс.

Высотная и долготная зональности по существу вторичны. Высотная зональность вызвана главным образом стратификацией

атмосферы по температуре и влагозапасам, долготная — нарушениями макроциркуляции из-за влияния рельефа, теплых океанических течений и размеров континентов. Развитие геологических процессов в значительной мере зависит от высотной зональности. По П. Ф. Швецову, в высоких горах тридцатых и сороковых широт амплитуда суточных колебаний температуры приповерхностной части скальных пород, не прикрытой ледяным или снежным покровом, больше амплитуды годовых колебаний температуры Якутии и даже Верхоянья. Поэтому в горах этих широт физическое выветривание особенно интенсивное. В горно-складчатых областях геологические процессы верхних климатических зон влияют на ход процессов в нижних зонах. По В. П. Солоненко, А. М. Лехатинову и др., высотная поясность подготовки очагов к селеобразованию согласуется с последовательностью оттаивания пород. Зональное развитие характерно также для курумов.

В Гиссаро-Алае оползни-потоки и солифлюкация шире развиты в интервале высот 2800—3500 м. Там, где горные хребты трансформируют западные и южные атмосферные фронты, оползни-потоки встречаются и гипсометрически ниже. Локальные влияния орографии, экспозиции склонов и ветров усиливают или ослабляют контрасты температур, влажности, сказываются на снеготаянии, перераспределении снегозапасов и т. п., что отражается на характере парагенетических ассоциаций и режиме протекания геологических процессов.

При техногенных воздействиях — создании водохранилищ, значительных поливных площадей и других — возможны изменения метеорологического режима в прилегающих районах. Например, по данным В. С. Кусковского, Ю. В. Титовой и др., на Красноярском водохранилище в прибрежной полосе наблюдалось уменьшение годовых амплитуд температуры воздуха на 5—6 °С, повышение среднегодовой температуры воздуха на 1—2 °С. В пределах нескольких километров от уреза водохранилища безморозный период увеличился на 10—15 дней. Количество осадков возросло на 10—20 %, скорость ветров — на 10—40 %. Изменения температурного режима в нижнем бьефе препятствуют образованию льда на значительном расстоянии ниже плотины, вызывают формирование мощных туманов испарения. Все это вызвало активизацию процессов выветривания, эрозии, оползнеобразования.

#### **КЛИМАТИЧЕСКИЕ РИТМЫ И ИХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ**

В последние десятилетия А. В. Шнитниковым, М. С. Эйгенсоном, М. И. Будыко, Е. В. Максимовым и другими исследователями уточнена климатическая ритмичность, которую можно использовать для прогнозов геологических процессов. Данные о тенденциях в климатических изменениях важны для долгосрочных прогнозов геологических процессов, корректировки программ и усиления службы стационарных исследований.

Климатическая ритмичность находит конкретное выражение в смене широтных и меридиональных макроформ атмосферной циркуляции. Для северного полушария они типизированы В. Я. Вангенгеймом и А. А. Гирсом. В классификации Б. Л. Дзердзевского выделены 13 типов и 41 разновидность элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ). Для периода с 1861 по 1968 г. А. А. Гирсом установлено пять эпох развития макроформ атмосферной циркуляции. Применительно к этим типизациям составлены длинные ряды климатических изменений, что является предпосылкой для их использования при региональных прогнозах эрозионных, селевых, оползневых и других геологических процессов.

В отношении малых оползней и селей такая попытка предпринята В. В. Кюнтцелем [23] и А. И. Шеко [50]. При ориентировочных региональных прогнозах ими подмечена связь периодов активизации этих процессов с многовековыми, вековыми, внутривековыми и многолетними ритмами, а также с макроформами атмосферной циркуляции. К сожалению, при этом неполно учтены типы явлений и продолжительность их циклов, направленность в развитии геологической среды, влияние землетрясений.

Геологические процессы многофакторны, поэтому изучение климатических факторов и ритмичности не может служить универсальным критерием для их прогнозов. Используя данные о ритмах, можно наметить лишь тенденции пространственно-временной изменчивости геологических процессов, тем более, что даже долгосрочные прогнозы погоды пока не часто оправдываются, а сами ритмы смещаются и накладываются. В особенности это относится к чередованию мало- и многоводных лет, которое для развития геологических процессов имеет основное значение. Следует считать и с тем, что климатический фактор может быть ведущим лишь в изменчивости приповерхностных процессов (эрозии, выветривания, неглубоких оползней и т. п.). Так, например, в многоводном 1969 г. в Средней Азии возникли неглубокие (осовы, малые оползни-потоки, солифлюкция) и активизировались отдельные глубокие действующие и приостановившиеся оползни. Новые глубокие оползни и обвалы не возникли, так как здесь они формируются главным образом вследствие сейсмических воздействий, изменения гидрогеологических условий, подмыва и подрезок склонов.

Для дальнейшего развития этого направления прогнозов геологических процессов важно, чтобы данные о ритмах использовались с учетом особенностей конкретных геологических обстановок и развитых в их пределах геологических процессов, их подверженности климатическим изменениям разного ранга, унаследованности и необратимости. Воздействие ритмичных климатических изменений на геологические процессы неоднаково в разных геологических средах и зависит не только от кумулятивного влияния ритмов, но и от степени ответной реакции среды, от ее способности к саморегулированию. При региональных прогнозах геологических процессов надо совместно использовать данные о климатических ритмах, присущих большой территории, и о тех типичных и экстре-

мальных метеогидрологических обстановках, которые возникают в конкретных условиях, т. е. на характерных детально изученных участках. Значительное влияние местных геологических и климатических условий лежит в основе недостаточно тесных связей между макроформами циркуляции и геологическими процессами.

Для долговременных региональных прогнозов геологических процессов необходима более детальная типизация возможных метеогидрологических условий, вызывающих формирование тех или иных геологических процессов при конкретных, присущих данному району элементарных циркуляционных механизмах, притом с учетом орографической трансформации атмосферных фронтов и указанием характерных предвестников формирования неблагоприятных метеорологических ситуаций.

### **ОЛЕДЕНЕНИЯ И АКТИВИЗАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Знание закономерностей развития древних оледенений важно для оценки в настоящее время их последствий и в связи с прогнозами возможных изменений климата. Изучение динамики современного оледенения, прежде всего горного, имеет более близкое практическое значение.

Основными инженерно-геологическими следствиями существования на платформах ледниковых покровов являются: формирование мощных толщ многолетнемерзлых пород; сглаживание рельефа, его экзарация и переотложение масс; уплотнение слабо литифицированных пород и гляциодислокации; выпаживание в долинах с образованием локальных западин и переуглублений; изменение поверхностного стока с интенсивным локальным размывом и образованием приледниковых озер; подпор подземных вод в долинах, иногда с подтоплением придолинных пространств.

На платформах при мощности ледникового покрова в 1—2 км и более статические давления на подстилающие породы достигали 10—20 МПа, влияние которых надо рассматривать с учетом масштабного эффекта. При этом в одних местах возрастали плотность и прочность пород, в других они подвергались деформациям с образованием зон ослабления до глубин в несколько десятков метров. При вскрытии таких толщ эрозией или искусственным путем интенсивнее идет избирательное выветривание, их размыв, появляются оползни, приуроченные к нарушенным зонам, что наблюдалось, например, в нижнекаменноугольных песчано-глинистых отложениях при открытой разработке Тихвинского месторождения. Неблагоприятны участки разрывно-складчатых гляциодислокаций.

По данным Б. Гутенберга, М. Е. Артемьева, Е. В. Артюшкова, мощные ледниковые покровы вызывают изменения в астеносфере, влияют на неотектонический и сейсмический режимы. Литосфера не может выдерживать длительное давление, превышающее несколько МПа, если последняя занимает область радиусом в несколько сот километров и больше. Гляциоизостатические прогибы

сравнительно быстро восстанавливаются (примерно за 10 тыс. лет при скорости поднятия 10—13 см/год), что превышает темп движений, характерный для платформ. В области древнего оледенения он и сейчас остается повышенным, например, в Фенноскандии, где поднятия достигают 1 см/год. После установления прогибания чаш крупных водохранилищ, их влияния на напряженное состояние в верхней части земной коры, а вслед за этим и на сейсмический режим достоверность существования гляциоизостатических движений не подлежит сомнению. Анализ сейсмодислокаций горных районов, например Гиссаро-Алая, также указывает, что сейсмичность была наиболее высокой после отступления позднеплейстоценового оледенения.

Гляциоизостатические движения надо учитывать при анализе неотектоники в инженерно-геологических целях, например, в районах четвертичных трансгрессий северных морей, при изучении региональных полей напряжений и эрозионных процессов. Ю. А. Мещеряковым доказано, например, что область валдайского оледенения Восточно-Европейской платформы отличается общим усиленным врезанием рек по сравнению с внеледниковой областью.

Последствия древних оледенений сохранились на значительных площадях. В Якутии, например, есть толщи, промерзшие в позднем и даже в среднем и раннем плейстоцене. На основании недавних возрастных датировок палеонтологическими, люминесцентными и другими методами установлено, что в северо-западной части Якутии толщи пород мощностью до 1450 м ни разу не оттаивали полностью по крайней мере за последние 300 тыс. лет. Возрастное расчленение толщ и палеогеографические реконструкции содействуют более полному изучению пространственной изменчивости строения и мощностей древних толщ многолетнемерзлых пород, формирование которых контролировалось иными геоморфологическими, климатическими, гидрологическими, гидрогеологическими условиями. Без реконструкции приледниковых водоемов нельзя, например, учесть особенности деградации древней мерзлоты, которая произошла при их отепляющем воздействии, выявить последствия катастрофических прорывов. По Дж. Райсу, с последними связано, например, формирование в лёссовом покрове Колумбийского плато (США) «изрезанных земель» на площади свыше 1000 км<sup>2</sup>.

Не только приледниковые подпрудные озера, но и сами ледники создают подпор подземных вод и тем самым изменяют состояние массивов пород, условия формирования гравитационных и эрозионных процессов, карста, просадок. У боковых границ горнодолинных ледников появляется сосредоточенный поверхностный сток, происходит эрозионная подрезка на более высоких уровнях нижних, наиболее напряженных оснований высоких склонов. Все это приводит к активизации оползне-обвальнo-осыпных процессов, и они распространяются на верхние части склонов.

Горнодолинные ледники удаляют из долин выветрелые породы, увеличивают крутизну нижних частей склонов и приводят к процессам донного и бортового отпора в породах при снятии нагруз-



ки, что усиливает русловой размыв, суффозию, формирование карста и более крупных оползней и обвалов.

Современные ледники опасны своими пульсациями, при которых возрастает вероятность прорыва емкостей объемом в несколько тысяч кубических метров воды, имеющих внутри и под ледником; возможностью прорыва моренных озер, что не раз наблюдалось под Алма-Атой, и образованием перекрытий долин и временных озер, что характерно, например, для ледника Медвежьего на Памире. Возможность обрушения ледниковых и ледово-скальных обвалов, способных синдинамично трансформироваться на протяженных и крутых путях своего движения в обломочные, а затем и селевые потоки, подтверждается уаскаранскими и аляскинскими катастрофами 60—70-х годов. Совокупность этих фактов дает основание утверждать, что инженерная защита территорий горных областей не может рассматриваться надежно обеспеченной, если не изучен гляциальный пояс, венчающий осваиваемые территории.

Региональное изучение зонально-климатического и зонально-геологического факторов практически стало возможным в последние 20—30 лет при применении методов аэрофотосъемки, аэровизуальных наблюдений и космических. На их основе можно изучать большие территории через необходимые промежутки времени и тем самым получать качественные и количественные данные о динамике процессов, их активизации, появлении новых, изменениях в парагенетических ассоциациях и т. п. Принципиально важно, что эти результаты можно сопоставить с конкретными климатическими изменениями или техногенными воздействиями на природную среду, особенно при освоении районов с многолетнемерзлыми породами, заболоченных и пустынных.

Рассматривая значение климатических факторов с инженерно-геологических позиций, необходимо исходить из следующих основных положений.

1. Климатические условия имеют большое, однако не самостоятельное и не универсальное значение в формировании геологических процессов, так как последние многофакторны, а влияние климата чаще всего является косвенным.

2. Климатическая ритмичность глобального, регионального и локального уровней имеет определенное значение для прогноза геологических процессов. Однако надо учитывать, что геологические процессы необратимы, а динамическое состояние массивов пород и территорий испытывает неоднородные, но направленные изменения. Поэтому последствия очередного климатического ритма не могут быть во всем такими же, как раньше. Имеет значение наложение ритмов разного ранга. Отсюда следует, что при ретроспективном анализе и прогнозе геологических процессов метод аналогий должен применяться осмотрительно.

3. Имея определенный тренд, климатическая ритмичность конкретно выражается главным образом в чередовании мало-, средне- и многоводных лет или периодов. Оценка типичных и экстремальных метеогидрологических условий имеет наибольшее значение

для прогноза геологических процессов. Она должна отражаться в моделях процессов.

4. Следует различать современные зонально-климатические условия, влияющие на парагенез и интенсивность геологических процессов, и кумулятивное отображение в геологической среде древних климатов (в осадках, мерзлых породах и т. д.). Оба фактора (зонально-климатический и зонально-геологический) сложно сочетаются и взаимодействуют, что требует исторического подхода к их изучению, тем более, что климатические условия Земли — категория естественно-историческая. Реликты древних климатических воздействий важны в следующих аспектах: а) как объекты с особыми инженерно-геологическими условиями, в которых имеются или возможны неблагоприятные геологические процессы, как правило, более частые и крупные; б) как свидетели экстремальных климатических условий и их геодинамических последствий, что необходимо знать в связи с долгосрочными прогнозами процессов; в) как аналоги процессов, которые могут быть вызваны крупными техногенными воздействиями на геологическую среду.

5. Зонально-геологический фактор характеризуется меньшей пространственно-временной изменчивостью, чем зонально-климатический, вследствие чего может служить признаком при инженерно-геологическом районировании территорий.

## ГЛАВА 14.

### ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ И ИХ РЕЖИМ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Подземные воды играют большую роль в формировании геологических процессов. Деятельностью подземных вод обусловлено развитие процессов выщелачивания и карста в растворимых породах, механической суффозии в малопрочных породах и просадочных явлений в лёссах. Роль подземных вод в формировании большинства геологических процессов проявляется в двух направлениях: во-первых, подземные воды могут существенно изменять физико-механические свойства пород, такие, как прочность, деформируемость, быть причиной размокания, набухания грунтов и т. д., и, во-вторых, подземные воды оказывают силовое воздействие, изменяющее напряженное состояние массива пород, что имеет большое значение при образовании оползней и обвалов, в развитии деформаций в подземных выработках и откосах карьеров, в оседании поверхности земли и в других случаях.

Подземные воды чутко реагируют на хозяйственную деятельность человека и являются причиной или действующим фактором большинства инженерно-геологических процессов. На территориях крупных промышленных объектов, горнодобывающих предприятий, городов, гидротехнических сооружений происходит резкое увеличение скоростей фильтрации, повышение температуры и раство-

ряющей способности подземных вод, что, несомненно, приводит как к интенсификации природных геологических процессов (карста, суффозии, оползней и др.), так и к развитию инженерно-геологических — деформациям поверхности земли, осадкам сооружений и т. д.

### **РАСТВОРЕНИЕ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ ГОРНЫХ ПОРОД КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Исследование подземных вод как основного фактора растворения пород является трудным и мало разработанным вопросом. Особенно большие трудности возникают при количественной оценке основных условий растворения.

Растворение лежит в основе карстового процесса, который представляет собой обмен массой растворенного и диспергированного вещества между относительно легкорастворимыми породами и подземными водами, находящимися и движущимися в пористом и трещинном пространстве, а также в переносе этой массы подземными водами. По данным А. В. Лехова, для большинства карстующихся пород трещинная проницаемость значительно превосходит проницаемость отдельных блоков, и поэтому поток растворенных компонентов в трещинах намного больше, чем в блоках пород, а скорость выноса растворенных компонентов из блоков в трещины значительно меньше скорости растворения стенок трещины. Таким образом, процессы растворения в основном происходят по трещинам, и карстовые пустоты являются результатом растворения стенок трещин и в меньшей степени пор карстующихся пород.

Переход компонентов породы в подземные воды и наоборот возможен вследствие растворения, осаждения, ионного обмена, жизнедеятельности микроорганизмов и других процессов. Наиболее распространенными процессами образования карста являются растворение и осаждение, которые протекают совместно, но с преобладанием одного над другим. Эти два процесса кинетически не эквивалентны друг другу, так как при растворении участки стенок трещин, сложенные относительно нерастворимыми минералами, не участвуют в реакции, а осаждение происходит по всей поверхности стенок трещин.

Характер и скорость растворения горной породы определяются геометрическими размерами трещин, скоростью движения воды в них, текущей и равновесной концентрацией растворенной породы, параметрами диффузионного переноса и кинетики растворения. Проведенные исследования позволяют учитывать роль отдельных факторов, но задача изучения растворения горной породы под влиянием всего многообразия факторов, как это происходит в природе, остается нерешенной.

Представляется очевидным, что количество и скорость выноса массы растворившейся горной породы зависят от длины трещины, ее раскрытия, количества и скорости движения подземных вод по

трещинам, расположения систем трещин по отношению к направлению движения потока и других причин. Однако количественно такие зависимости изучены крайне недостаточно. Больше того, существуют прямо противоположные утверждения относительно влияния того или другого фактора. Например, по данным экспериментальных работ А. В. Лехова, коэффициент массоотдачи зависит от скорости потока, а в результате теоретического исследования модели массоотдачи трещин карстующихся пород получено, что его можно считать постоянным, не зависящим от длины трещин и скорости течения воды в них.

Растворяющая способность подземных вод определяется разностью равновесной и текущей концентраций растворенной в подземной воде породы, химическим составом и величиной минерализации, содержанием в воде углекислоты, сероводорода, температурой, наличием микроорганизмов и другими факторами. На скорость растворения оказывают также влияние состав и структура породы, наличие нерастворимых примесей и т. д. Известно, например, что содержание в воде свободной углекислоты существенно увеличивает растворимость карбонатных пород; растворяющая способность водных растворов по отношению к большинству пород повышается с ростом их температуры; растворимость пород существенно зависит от концентрации водного раствора, причем при малых концентрациях его растворяющая способность быстро растет, а по достижении максимума (разного у различных солей) начинает снижаться. Агрессивность подземных вод по отношению к горным породам возрастает при обогащении ее органическими кислотами.

Изучение закономерностей растворения горных пород подземными водами имеет большое практическое значение. Хозяйственная деятельность человека — строительство городов, гидротехнических сооружений, проходка горных выработок, разработка месторождений полезных ископаемых, строительство глубоких карьеров, откачки подземных вод, добыча нефти и газа и т. д. — приводит к существенному изменению режима подземных вод, их состава, температуры и других параметров. При этом изменение режима и состава подземных вод происходит, как правило, в направлении возрастания их агрессивности по отношению к горным породам, так как на территориях хозяйственного освоения резко возрастают скорости движения подземных вод, их температура, подземные воды обогащаются новыми компонентами и повышается их минерализация и т. д.

### **ДЕФОРМАЦИИ ПОРОД ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИХ С ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ КАК ПРИЧИНА ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Подземные воды являются причиной механического выноса, сноса, привноса или так называемых фильтрационных деформаций, которые развиваются на склонах речных долин, особенно на участ-

ках возведения плотин, на бортах открытых горных выработок, на откосах насыпей, дамб и плотин, в подземных горных выработках, в карстовых полостях и т. д. Наиболее ярко они проявляются в зернистых или слабосцементированных породах и трещинах. Среди фильтрационных деформаций выделяют механическую суффозию, выпор и обрушение в зоне выхода фильтрационного потока на склон или откос, оплывание, прорыв плывунов в горные выработки, фильтрационный вынос вдоль трещин и другие. При уменьшении скоростей фильтрации подземных вод переносимый ими взвешенный материал осаждается в порах и трещинах породы, колюматрируя последние.

В результате механической суффозии происходит вынос мелких частиц через поры крупнозернистого скелета, который может носить или ограниченный характер, или при интенсивном развитии процесса приводить к разрушению пород. Величина суффозии зависит от неоднородности горной породы и градиента фильтрации. Суффозионные процессы развиваются на склонах речных долин, сложенных песчаными породами, но наиболее интенсивно они протекают на участках очень высоких градиентов фильтрации подземных вод, обусловленных искусственными причинами. Так, например, на участках основания плотин в нижнем бьефе, вблизи низовых откосов земляных плотин, вокруг фильтров водозаборных скважин, при сработке уровней водохранилищ резко возрастают скорости движения подземных вод, вызывающие прогрессирующую суффозию.

Опасен может быть не только ограниченный суффозионный вынос, но и вызванное им изменение свойств пород — снижение сопротивления сдвигу, увеличение сжимаемости, что может привести к деформациям откосов, осадке плотин, провалам вокруг скважин и другим процессам. Суффозия развивается также в откосах открытых горных выработок, что может вызвать оползневые смещения. В бортах ирригационных каналов в лёссовых и лёссовидных породах при суффозии формируются многочисленные и разветвленные полости, нередко приводящие к деформациям поверхности. Причиной активизации суффозионного процесса может быть изменение режима подземных вод. Например, на территории г. Москвы на участках, где древние переуглубленные долины прорезают кровлю закарстованных каменноугольных известняков, в результате интенсивных откачек подземных вод из каменноугольных водоносных горизонтов и, как следствие этого, значительного снижения в них уровней на 38—40 м началась интенсивная фильтрация из вышележающих меловых и четвертичных аллювиальных песчаных отложений в закарстованные известняки [39]. Там, где юрские глины отсутствуют или имеют малую мощность, происходит суффозионный вынос песчаных частиц из пород мелового и четвертичного возраста в карстовые пустоты с образованием на поверхности провальных воронок.

На участках высачивания подземных вод на склоне или искусственном откосе наблюдаются относительно высокие градиенты

фильтрации, и возникающие вследствие этого здесь значительные гидродинамические силы вызывают фильтрационные деформации. В отличие от суффозии в этом случае в движение приходит весь объем горной породы, залегающей на поверхности склона или откоса. Обычно такие деформации носят местный характер и проявляются в виде обрушения или оползания, выпора пород, оплывания и т. д. Промежуток высачивания подземных вод на склоне, где развиваются высокие градиенты фильтрации, имеет, как правило, небольшие размеры, что обуславливает размеры и самих фильтрационных деформаций. Наиболее распространены явления обрушения и оползания склонов и откосов, сложенных песчаными горными породами.

Как указывает В. А. Мироненко [28], своеобразно протекают процессы обрушения и оползания в связных слабопроницаемых породах. После вскрытия их котлованом они претерпевают интенсивное набухание в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности откоса. Под влиянием гидродинамического давления приповерхностный слой ослабленных пород оползает. Так как нагрузка на обнажившиеся участки вследствие оползания уменьшается, то набухание этого участка усиливается, и через некоторое время оползает новый слой породы. Процесс идет циклически, и, несмотря на незначительный объем пород, участвующий в одном цикле, в конечном итоге в процесс вовлекаются значительные массы пород, которые, насыщаясь водой до текучего состояния, оплывают по склону.

Выпор пород на склоне или откосе под влиянием гидродинамического давления наблюдается, как правило, на затопленных участках. При выходе подземных вод на поверхность откоса или склона может начаться поверхностный перенос песчаных частиц. При этом в процесс оплывания вовлекается вся поверхность песчаного откоса или склона выше зоны высачивания подземных вод. В случае, когда их верхняя часть сложена другими по составу породами (например, глинами), оплывание может привести к обрушению вышележающих пород и формированию оползней оплывания. В результате оплывания в основании склонов и откосов образуются языки оплывания.

В слабосцементированных трещиноватых породах, в более прочных скальных породах и в закарстованных массивах, в которых трещины и пустоты заполнены глинистым материалом, нередко наблюдаются фильтрационный размыв и вынос частиц вдоль трещин. Этот процесс в известном смысле аналогичен эрозионному процессу, протекающему в руслах рек. В результате происходит формирование подземных пустот, а иногда и провальных воронок на поверхности. Интенсивность фильтрационного размыва вдоль трещин зависит прежде всего от градиента потока. Изучение суффозионной устойчивости трещиноватых пород с применением опытно-фильтрационных работ, которое проводилось в натуральных условиях на участках строительства гидротехнических сооружений, показало, что заметный вынос заполнителя из трещин возможен при

**очень** высоких градиентах, нередко превышающих 10. Однако вынос заполнителя из трещин возможен и при более низких градиентах. Например, опытный размыв глинистого заполнителя трещин в доломитах основания Плявинской ГЭС показал, что размыв заполнителя начинается при градиентах напора от 1,5 до 4,8. Процессы фильтрационного размыва вдоль трещин необходимо учитывать, так как в результате размыва возрастает проницаемость пород и, что еще более важно, изменяются механические свойства пород, что может привести к нарушению устойчивости массива пород и сопряженных с ним инженерных сооружений. Фильтрационный вынос вдоль трещин в зависимости от соотношения свойств пород и заполнителя и градиента фильтрационного потока может либо быстро затухать, либо иметь прогрессирующий характер.

### **СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Многие геологические и инженерно-геологические процессы происходят или усиливаются при силовом воздействии подземных вод. К ним относятся процессы, протекающие на склонах или на откосах карьеров, котлованов, плотин, дамб и других искусственных сооружений; деформации стенок подземных горных выработок, поверхности земли, наблюдаемые при откачках подземных вод, и другие. Влияние подземных вод на устойчивость пород в этом случае прежде всего связано с изменением их напряженного состояния под действием гидростатических и гидродинамических сил.

Наиболее существенна роль подземных вод в изменении устойчивости природных склонов и искусственных откосов. Правда, следует подчеркнуть, что влияние подземных вод на устойчивость оказывается заметным только при больших перепадах напоров вблизи склона или откоса и если значительная часть оползневого массива оказывается ниже депрессионной или пьезометрической кривой. В остальных случаях, когда в склоне или откосе формируется относительно пологая депрессионная кривая и градиенты измеряются малыми величинами, роль гидростатических и гидродинамических сил обычно незначительна.

По расчетам В. А. Мироненко [28] на Лебединском карьере КМА, эти силы снижают коэффициент запаса устойчивости откосов всего на 3—4 %.

Подтопление и большие перепады напоров вблизи склонов и откосов имеют место при заполнении водохранилищ, в результате быстрой сработки уровня, что часто наблюдается на горных водохранилищах, на участках склонов, где сооружаются ГАЭС или напорные бассейны деривационных ГЭС, в откосах земляных плотин и т. д. В результате подтопления склона, например, при заполнении водохранилища, в затопленном состоянии могут оказаться оползневые массивы, которые были на склоне. На рис. 21 показан частично подтопленный древний оползневой массив, находившийся

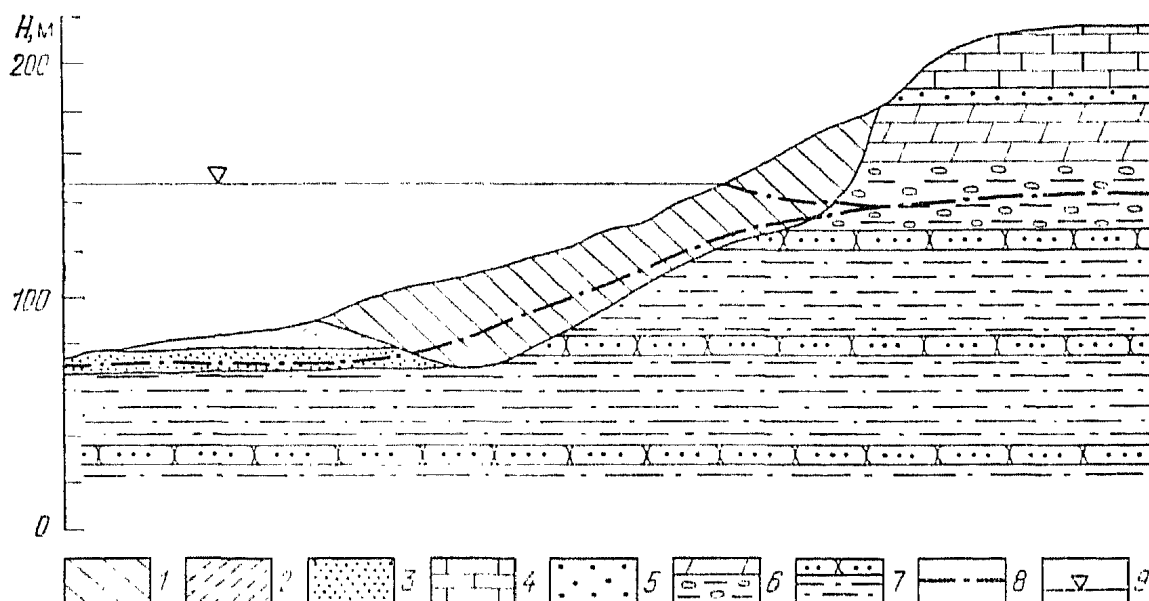


РИС. 21. Схема подтопления оползневого тела при подъеме уровня воды в водохранилище.

1 — современные оползневые накопления ( $dp$  IV); 2 — современный делювий ( $d$  IV); 3 — верхнечетвертичные аллювиальные пески ( $aIII_2$ ); 4 — сарматские известняки ( $N_1s$ ); 5 — тортонские пески ( $N_1tr$ ); 6 — сеноманские мергели с кремнистыми конкрециями ( $K_2cm$ ); 7 — докембрийские алевролиты и аргиллиты с прослоями песчаников ( $Pc_3$ ); 8 — уровень грунтовых вод; 9 — уровень водохранилища

до этого в устойчивом состоянии. Так как наклон поверхности скольжения к горизонту уменьшается сверху вниз, то вдоль нижней части этой поверхности нормальные составляющие сил тяжести, а следовательно, и силы трения играют относительно большую роль по сравнению с верхней частью. Поэтому при подтоплении в результате действия гидростатического давления, которое будет взвешивать как раз нижнюю часть оползневого массива, произойдет относительное уменьшение удерживающих сил, что может привести к нарушению его устойчивости. Поскольку влияние сил взвешивания проявляется в уменьшении сил трения, то наиболее значительно оно должно отразиться на склонах и откосах, сложенных породами с высоким углом внутреннего трения. В. А. Мироненко рассчитал, что крутизна предельно устойчивых песчаных откосов при наличии подтопления и без него может измениться на  $6-8^\circ$ . Гидростатические силы уменьшают устойчивость склонов и откосов и в том случае, когда в их основании находятся недренируемые напорные водоносные горизонты.

Если природные склоны или откосы сложены скальными, полускальными или другими породами, проницаемость которых в результате трещиноватости по вертикали значительно больше, чем по горизонтали, или когда вблизи склона или откоса залегают вертикально расположенные тела водонепроницаемых горных пород, за которыми могут находиться подземные воды, то при поступлении в них вод (дождевых, талых и др.) может произойти резкое повышение уровней подземных вод и, как следствие, существенно возрастает гидростатическое давление, способное привести к обрушению склона или откоса, особенно при их значительной высоте.



Наряду с гидростатическим взвешиванием в развитии оползневых деформаций большую роль играют гидродинамические силы. Наиболее часто оползневые деформации наблюдаются при быстром спаде свободного уровня вблизи подтопленного склона или откоса, например, в результате сработки водохранилищ. В случае, когда уровень воды перед склоном быстро снижается, а внутри него остается практически неизменным, исчезает сила, которая действовала со стороны склона, что приводит к уменьшению устойчивости склона (уменьшается тем больше, чем больше сработка уровня и чем скорее она происходит).

Роль гидродинамической силы наиболее существенна тогда, когда склон сложен глинистыми породами, так как градиенты фильтрации в них могут быть очень большими. При наличии в подошве склона напорных недренируемых горизонтов восходящая фильтрация через относительно водоупорные слои приводит к уменьшению эффективных напряжений на скелет глинистых пород, что вызывает уменьшение сил трения и интенсивное набухание пород, являющиеся причиной оползневых деформаций.

Большое влияние на величину и направление действия гидродинамических сил может оказать соотношение проницаемостей отдельных слоев, слагающих склон. Если ниже поверхности скольжения оползневого тела невысокой проницаемости залегает хорошо проницаемый слой, то фильтрация в оползневом теле имеет преимущественно вертикальное направление; если оползневое тело невысокой проницаемости залегает на относительном водоупоре, то направление фильтрации в оползневом теле будет близким к горизонтальному. Поэтому общая горизонтальная (сдвигающая) составляющая гидродинамических сил в случае горизонтальной фильтрации значительно больше, чем при вертикальной фильтрации, и соответственно устойчивость склона, когда оползневое тело подстилается водонепроницаемым пластом, будет меньше, чем в первом случае.

Аналогичным образом гидростатические и гидродинамические силы оказывают влияние на характер и интенсивность процессов, протекающих вблизи горных выработок.

## ГЛАВА 15.

### **ПОЛЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Естественное напряженное состояние верхних горизонтов земной коры определяется совместным действием ряда неоднородных силовых полей, основными из которых являются гравитационное, тектоническое и температурное. Эти поля действуют в течение длительного времени и имеют в основном региональный характер. Кроме того, на напряженное состояние отдельных участков верх-

них горизонтов земной коры оказывают влияние гидростатические и гидродинамические силы, обусловленные движением в породах подземных вод, кратковременные сейсмические силы, возникающие при землетрясениях, и, возможно, космические гравитационные силы, вызванные приливными действиями Луны и Солнца. На перераспределение напряжений в породах оказывают влияние неровности рельефа и его изменение во времени, пространственная и временная изменчивость строения и физико-механических свойств пород, слагающих верхние слои земной коры, и строительная и хозяйственная деятельность человека. Эти факторы носят, как правило, локальный характер, но способны вносить существенные и быстрые изменения в существующее поле напряжений. Многообразие силового и температурного полей в верхних слоях земной коры и неоднородность их строения во многом определяют сложность формирования напряженно-деформируемого состояния массивов горных пород в пространстве и во времени, что в конечном итоге определяет сложность протекания многих геологических процессов.

### НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Сила тяжести действует повсеместно и обуславливает вертикальную составляющую  $\sigma_3^g$  гравитационного силового поля, которая на глубине  $H$  от земной поверхности численно равна произведению средней плотности толщи вышележащих пород  $\rho$  на глубину  $H$  рассматриваемой точки и на ускорение свободного падения  $g$ :

$$\sigma_3^g = \rho g H.$$

Если массив пород находится ниже эрозионного вреза и не имеет возможности сместиться в горизонтальном направлении, то горизонтальные составляющие силы тяжести  $\sigma_1^g$  и  $\sigma_2^g$  (боковое давление) определяются соотношением, полученным А. Н. Динником:

$$\sigma_1^g = \sigma_2^g = \frac{\mu}{1-\mu} \rho g H = \xi \sigma_3^g,$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона пород в рассматриваемой точке. Коэффициент бокового распора  $\xi = \mu / (1 - \mu)$  показывает, какую часть активной, обусловленной силой тяжести нагрузки составляют реактивные напряжения в направлении, перпендикулярном к действию активной нагрузки. Для горных пород коэффициент Пуассона изменяется от 0,08 до 0,5. Соответственно крайние возможные пределы изменения величины бокового распора от 0,1 до 1. При максимальных значениях коэффициента Пуассона, равного 0,5, и бокового распора, равного 1, получается условие гидростатического распределения гравитационных напряжений в массиве, соответствующее известной гипотезе Гейма:

$$\sigma_1^g = \sigma_2^g = \sigma_3^g.$$

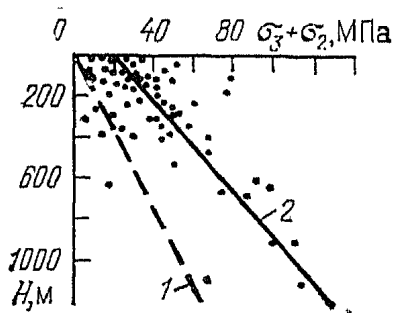


РИС. 22. График изменения суммы горизонтальных напряжений  $\sigma_1 + \sigma_2$  с глубиной  $H$  по результатам натуральных измерений в различных районах земного шара.

1 — удвоенное геостатическое напряжение; 2 — сумма напряжений  $\sigma_1 + \sigma_2$ , рассчитанных по формуле Хагста

Гидростатическое напряженное состояние в поле гравитационных сил является частным случаем напряженного состояния массива, выраженного зависимостями А. Н. Динника.

Существование действующих в массиве пород тектонических сил подтверждается инструментально наблюдаемым в отдельных районах земного шара превышением горизонтальных напряжений над вертикальными. Это превышение невозможно в условиях действия только гравитационных сил, так как коэффициент бокового распора не может быть больше единицы, и, следовательно, боковое давление не может превысить вертикальное. Тектонические силы субгоризонтального направления могут быть силами сжатия, растяжения, сдвига

и действуют в породах кристаллического фундамента и складчатых толщах. Их ориентировка в плане испытывает влияние направления тектонических структур соответствующих участков земной коры. Тектонические напряжения во многих случаях превосходят гравитационные, иногда существенно. По результатам измерений напряжений в различных районах земного шара П. Н. Кропоткиным построен график изменения суммы напряжений  $\sigma_1 + \sigma_2$  с глубиной  $H$  (рис. 22), который позволяет обнаружить в складчатом кристаллическом фундаменте избыточные горизонтальные напряжения, начиная практически с нулевых глубин.

Если в массиве действует горизонтальная тектоническая сила интенсивностью  $T_0$ , то в произвольной точке массива на глубине  $H$  напряжение в направлении действия силы будет

$$\sigma_1^T = T_0 + \Delta TH,$$

где  $\Delta T$  — приращение тектонической силы с глубиной.

Реактивные деформации пород, обусловленные действием горизонтальных тектонических сил, в плоскости, нормальной к этим силам, различны в горизонтальном и вертикальном направлениях, так как в вертикальном направлении в отличие от горизонтального существует возможность перемещения пород в сторону земной поверхности. Поэтому реактивные вертикальные напряжения, если массив рассматривается упругим, равны 0, а горизонтальные, перпендикулярные к действию тектонических сил, составляют:

$$\sigma_2^T = \mu (T_0 + \Delta TH),$$

где  $\mu$  — коэффициент горизонтального распора в поле тектонических сил, равный коэффициенту Пуассона.

Таким образом, в массиве пород, находящемся под действием и гравитационных, и тектонических сил, напряженное состояние на глубине  $H$  может быть охарактеризовано следующим образом: вертикальное напряжение

$$\sigma_3 = \sigma_3^g + \sigma_3^T = \rho g H;$$

горизонтальное напряжение в направлении действия тектонической силы  $T_0$ :

$$\sigma_1 = \sigma_1^g + \sigma_2^T = \frac{\mu}{1-\mu} \rho g H + T_0 + \Delta T H;$$

горизонтальное напряжение в направлении, перпендикулярном к направлению действия тектонической силы  $T_0$ :

$$\sigma_2 = \sigma_2^g + \sigma_2^T = \frac{\mu}{1-\mu} \rho g H + \mu (T_0 + \Delta T H).$$

Если горизонтальная тектоническая сила с глубиной не изменяется, то в распределении напряжений в верхних слоях земной коры наблюдается следующая закономерность. Вблизи поверхности горизонтальная составляющая превышает вертикальную. На некоторой глубине, тем большей, чем значительнее тектоническая сила, будет наблюдаться равенство суммарной горизонтальной и вертикальной составляющих гравитационного и тектонического полей напряжений, т. е. будет гидростатическое распределение напряжений. На больших глубинах вертикальная составляющая превысит горизонтальную.

## РЕЛЬЕФ КАК ФАКТОР, ИЗМЕНЯЮЩИЙ ПОЛЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Рельеф и его изменение, вызванное экзогенными процессами и хозяйственной деятельностью человека, существенно влияют на перераспределение напряжений в самых верхних горизонтах земной коры. Аналитическими расчетами, методами моделирования на эквивалентных и оптически активных материалах, полевыми экспериментальными исследованиями методом разгрузки и геофизическими работами были выявлены основные закономерности распределения напряжений в зависимости от рельефа.

Влияние рельефа на геостатическое поле напряжений в земной коре распространяется на глубину не меньшую, чем разность максимальных и минимальных высотных отметок. По данным аналитических расчетов [48], криволинейная граница может изменить напряжения до глубины  $3h$ , где  $h$  — разность экстремальных ординат граничной кривой, а по ширине ее влияние распространяется на величину  $6h$ . Причем горизонтальные нормальные напряжения в пределах зоны влияния изменяются больше, чем вертикальные, а касательные напряжения подвержены изменению больше по глубине массива, чем по ширине.

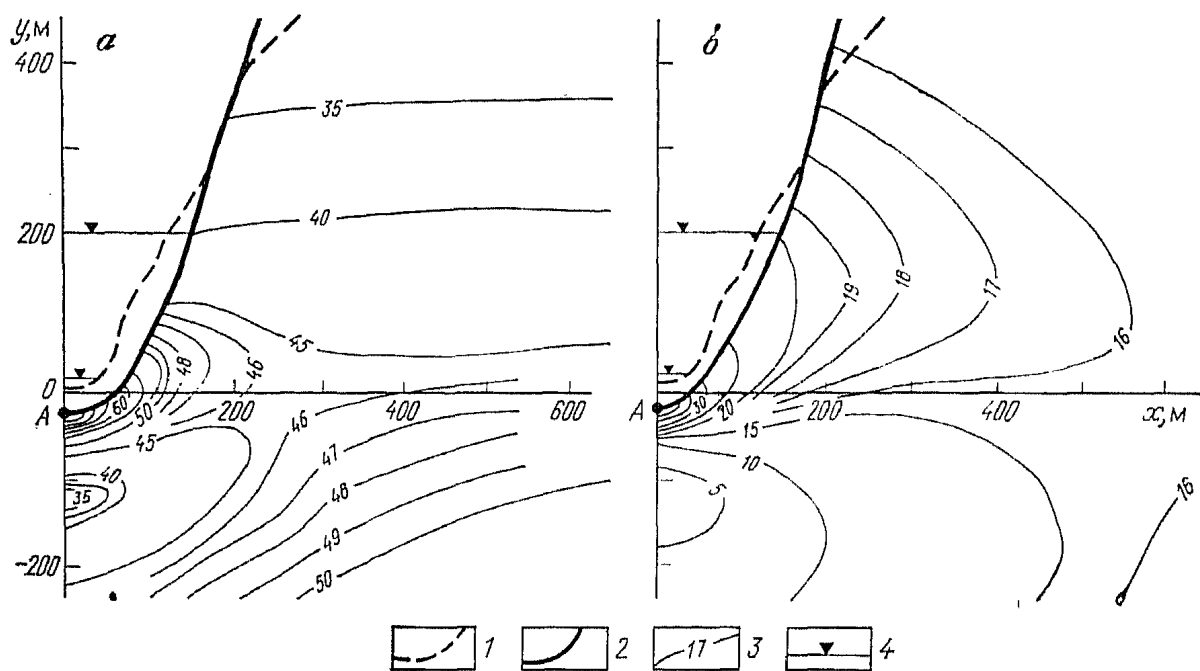


РИС. 23. Распределение максимальных нормальных  $\sigma_{\max}$  (а) и касательных  $\tau_{\max}$  (б) напряжений. Напряжения отнесены к величине 0,675 МПа. Профиль: 1 — долины реки, 2 — расчетного выреза; 3 — изолинии равных напряжений; 4 — уровни воды в реке и водохранилище

Наиболее существенное изменение напряжений происходит вблизи неровностей рельефа: в основании речных долин и искусственных выемок, в горных массивах и возвышенностях, в теле насыпей и плотин, вблизи склонов и откосов. Наибольшие концентрации напряжений наблюдаются в зонах, примыкающих к точкам перегиба поверхности земли, и участкам, обладающим наибольшей кривизной поверхности, например, к основанию склонов, днищам долин, различного рода выступам рельефа и т. д.

В основании глубоких узких выемок и каньонообразных долин вертикальные нормальные напряжения уменьшаются до нулевых значений, а горизонтальные резко возрастают, достигая при больших глубинах значительных величин, иногда соизмеримых с прочностью пород на одноосное сжатие. Здесь наблюдается также резкое возрастание максимальных касательных напряжений. Под каньонообразными углублениями всегда выделяется уплотненное ядро, находящееся в условиях всестороннего сжатия. На рис. 23 видно, что под каньонообразной долиной на расстоянии от ее основания, составляющем около 0,1 глубины долины, располагается зона, где максимальные касательные напряжения равны 0.

Наибольший интерес представляет распределение напряжений в склонах. По данным расчетов, моделирования, натуральных опытов установлено, что наиболее значительная концентрация напряжений, которая всегда наблюдается в местах наибольшей кривизны рельефа, приурочена к перегибу в основании склонов, а размеры зоны концентрации и абсолютные значения напряжений в ней определяются высотой и крутизной склонов. В зоне концентрации напряжений в основании склона уменьшаются вертикальные, но

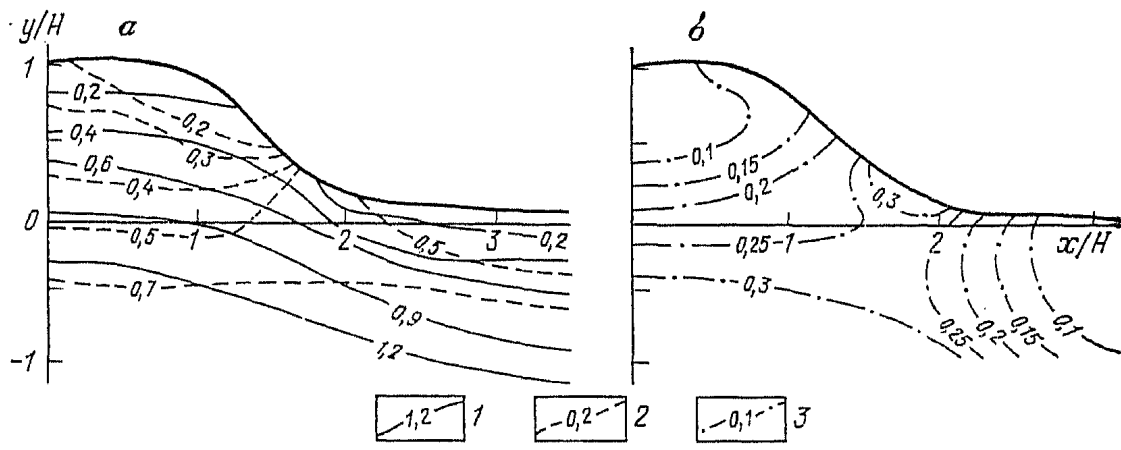


РИС. 24. Распределение нормальных вертикальных  $\sigma_y$  и горизонтальных  $\sigma_x$  (а) и максимальных касательных  $\tau_{\max}$  (б) напряжений в склоне под действием сил гравитации и коэффициенте бокового распора  $\xi=0,8$ . Напряжения отнесены к величине  $\gamma/10^{-1}$  МПа. По Н. А. Цытовичу.

Изолинии напряжений: 1 — нормальных вертикальных, 2 — нормальных горизонтальных, 3 — максимальных касательных

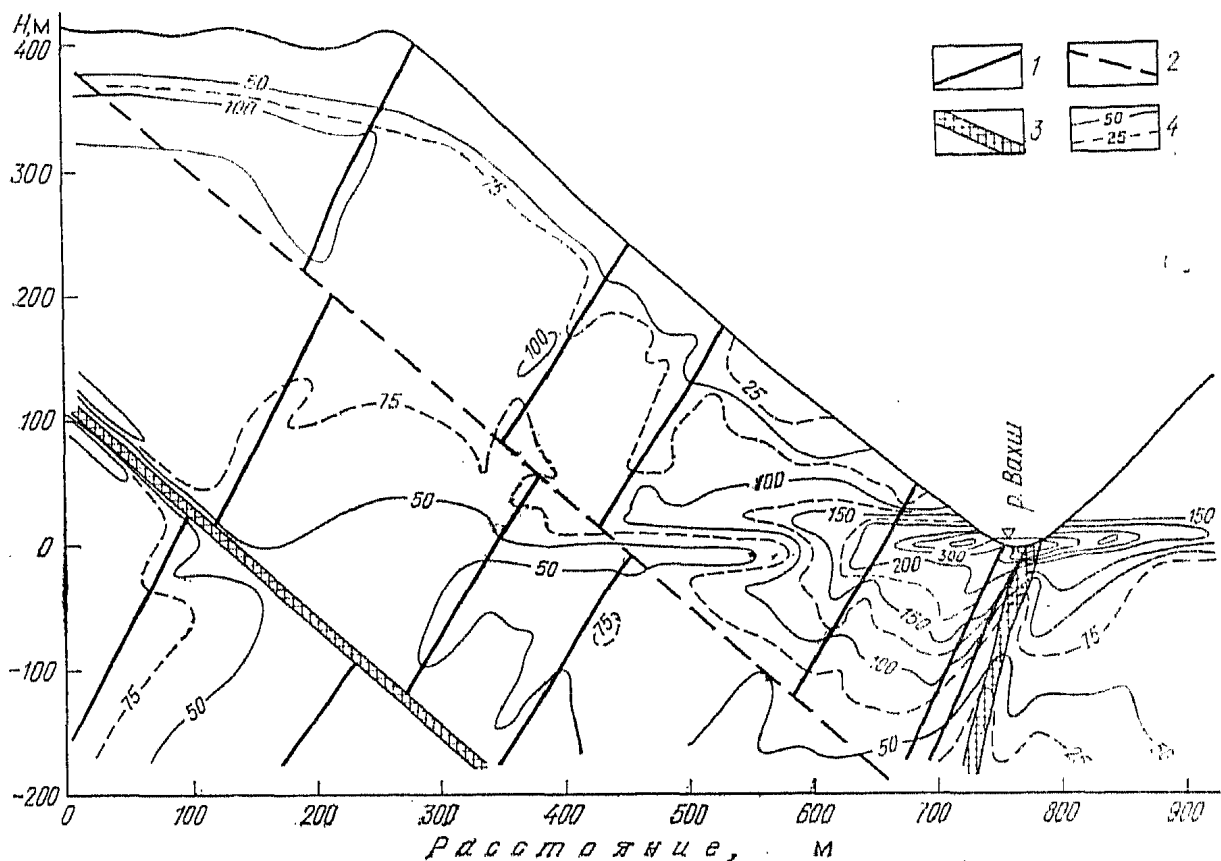


РИС. 25. Распределение горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  в склоне долины р. Вахш при совместном действии гравитационных и тектонических сил интенсивностью 12 МПа.

1 — границы литологических пачек, отличающиеся деформированными свойствами; 2 — тектонические трещины шириной до нескольких сантиметров; 3 — зоны разломов; 4 — изолинии горизонтальных напряжений, МПа

возрастают горизонтальные напряжения, в целом увеличиваются главные максимальные напряжения и существенно возрастают касательные напряжения на вертикальных и горизонтальных площадках и максимальные касательные напряжения (рис. 24). Это приводит к тому, что коэффициент запаса в нижней части склона минимальный, и, следовательно, потеря устойчивости происходит в результате разрушения пород основания склона.

Существенную роль в распределении напряжений в массиве пород в зависимости от рельефа играет коэффициент бокового распора, так как он определяет горизонтальную составляющую силы тяжести, горизонтальные напряжения и, следовательно, касательные, действующие в массиве. С увеличением коэффициента бокового распора (т. е. при увеличении коэффициента Пуассона) интенсивность касательных напряжений существенно уменьшается, а зона влияния криволинейности границы возрастает.

До сих пор рассматривалось влияние рельефа на напряженное состояние массива, на которое действует только гравитационное поле. Но в горно-складчатых областях, где влияние рельефа на распределение напряжений особенно велико, на массив пород может действовать также и тектоническая сила, которая вносит свой вклад в формирование поля напряжений. По данным С. И. Савченко, неровности рельефа существенно изменяют напряженное состояние массива, находящегося под воздействием сжимающих равномерно распределенных горизонтально направленных тектонических сил. Основные изменения в напряженном состоянии массива при этом происходят ниже эрозионного вреза, где породы испытывают горизонтальное сжатие. В основаниях речных долин и других понижениях рельефа происходит концентрация напряжений, причем вблизи поверхности на участках максимальной кривизны горизонтальные напряжения возрастают в несколько, иногда в десятки, раз по сравнению с величиной действующей силы. В пределах возвышенных участков рельефа наблюдается относительная разгрузка напряжений, которые составляют там лишь некоторую часть тектонической силы. Вертикальные напряжения незначительно возрастают в массиве пород под отрицательными формами рельефа и несколько уменьшаются под положительными.

На рис. 25 приводятся результаты изучения влияния на напряженное состояние массива пород тектонической силы интенсивностью 12 МПа на участке створа Рогунской ГЭС на р. Вахш. Проведенными исследованиями установлено, что наиболее существенно изменяются горизонтальные напряжения, которые максимально возрастают на уровне дна речной долины и под долиной, где они достигают значений 50—60 МПа, т. е. в 5 раз больше величины тектонической силы, их вызывающей.

В горно-складчатых областях, осложненных глубинными тектоническими разломами, где в результате развития эндогенных процессов происходит концентрация геостатических и геодинамических полей напряжений, часто наблюдаются землетрясения. На возникновение землетрясений может оказать влияние и инженерная дея-

тельность человека: заполнение водохранилищ, горнодобывающая и нефтедобывающая промышленность, подземные ядерные взрывы.

При землетрясениях в результате распространения упругих колебаний происходит существенное мгновенное перераспределение напряжений в верхних горизонтах земной коры, нередко приводящее к возникновению на поверхности деформаций: трещин разрыва и сдвига, обвалов и оползней на склонах и др. Вопрос о характере и величинах напряжений, возникающих при землетрясениях, изучен чрезвычайно слабо. В основном в настоящее время изучаются деформации — сейсмодислокации, являющиеся результатом только что произошедших или древних землетрясений.

По данным расчетов Н. А. Цытовича [48], действие горизонтальной инерционной силы вызывает значительное увеличение касательных напряжений и изменяет размеры и местонахождение зон их концентрации в случае неровности поверхности земли. Причем в зависимости от направления действия инерционной силы по отношению к формам рельефа эти зоны либо увеличиваются, либо уменьшаются. На склонах гор, находящихся ближе к источнику сейсмической силы, интенсивность касательных напряжений уменьшается, а на противоположном склоне увеличивается. Аналогично на склонах долин, расположенных ближе к эпицентру, касательные напряжения значительно больше, чем на противоположных склонах. Это подтверждается и данными инженерно-геологического картирования сейсмодислокаций на горных склонах Средней Азии, которые показали, что образование оползней и обвалов во время землетрясений происходит на склонах, обращенных по направлению распространения сейсмической волны.

### **ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ**

Изменение напряженного состояния пород под воздействием подземных вод происходит при изменении гидростатического давления и под действием гидродинамических сил. Кроме того, подземные воды могут влиять на напряженное состояние пород, изменяя их деформационные свойства и т. п.

При наличии в порах и трещинах гидравлически связанной свободной воды каждая частица породы испытывает гидростатическое давление. Оно вызывает деформацию, соответствующую сжимаемости минеральных зерен, которая, как правило, мала по сравнению с сжимаемостью самой породы и которой можно пренебречь при решении большинства практических задач. Однако гидростатическое давление не влияет на силу взаимодействия частиц между собой, если рассматривать его изменение вне связи с действием веса вышележащих пород или других внешних сил. Поэтому напряжения в свободной воде получили название нейтральных. Но, когда порода находится в поле гравитационных сил, гидростатическое давление, не влияя на взаимодействие частиц непосредственно, определяет силу этого взаимодействия благодаря эф-



фекту взвешивания вышележащей толщи. Снижение уровней (гидростатического давления) подземных вод устраняет эффект взвешивания осушенной части толщи горных пород, в результате чего все нижерасположенные породы оказываются под действием дополнительной нагрузки, равной весу жидкости в объеме осушенной части, что приводит к перераспределению в них напряжений.

Если рассмотреть в водонасыщенном массиве пород единичную горизонтальную площадку на определенной глубине, то она будет испытывать общее давление, равное весу опирающегося на эту площадку столба пород вместе с заключенной в них водой. Общее давление уравнивается двумя силами: нормальной к площадке реакцией скелета породы и гидростатическим давлением, направленным также по нормали к площадке. Часть общего давления, которое не уравнивается гидростатической силой, называется эффективным давлением, которое обуславливает силу взаимодействия частиц минерального скелета горной породы. Таким образом, при изменении напоров подземных вод, так как общие напряжения в системе остаются неизменными, происходит изменение эффективных напряжений. Следовательно, снижение напоров в водонасыщенных породах должно приводить к росту эффективных напряжений, т. е. к росту напряжений в скелете горной породы и к сжатию ее, что и наблюдается при откачках подземных вод на территориях городов и месторождений полезных ископаемых, добыче нефти, газа и т. д. В. А. Мироненко [28] приводит пример сжатия горных пород под влиянием водопонижения на Белозерском железорудном месторождении; снижение напоров в водоносных бучагских песках на 200 м привело к сжатию песчаных и мергельно-меловых слоев, залегающих на глубине около 300 м, что вызвало общую осадку толщи на 2,5 м.

Изменение напряженного состояния массива пород происходит в пределах капиллярной каймы. Здесь гидростатическое давление в жидкости отрицательное, и поэтому порода в плоскости менисков испытывает дополнительную эффективную нагрузку.

Движущийся поток подземных вод оказывает гидродинамическое давление на массив пород, пропорциональное градиенту напоров. Изменение напряженного состояния массива проявляется главным образом в слабо водопроницаемых породах, где возникают значительные градиенты. Высокие градиенты могут иметь место также при быстрой сработке уровня водохранилища, в бортах глубоких карьеров, склонах долин при сооружении ГАЭС, массиве пород вблизи подземных выработок и в других случаях. Например, в склоне долины р. Сокиряны в результате строительства ГАЭС возникла фильтрация воды из верхнего водоема через оползневые накопления, залегающие на склоне. Расчеты методом конечных элементов показали, что формирующийся фильтрационный поток приведет к возрастанию в оползневом теле горизонтальных и вертикальных напряжений и существенному увеличению (более чем в 1,5 раза) касательных напряжений, что вызовет уменьшение устойчивости оползневого склона р. Сокиряны. Аналитическими

расчетами З. Г. Тер-Мартirosян в 1971 г. установил, что в бесконечном наклонном склоне фильтрационные силы увеличивают максимальные касательные напряжения в 1,5—2 раза.

### **РОЛЬ ПОДЗЕМНЫХ ПОЛОСТЕЙ В ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Присутствующие в массиве пород полости, как естественные (например, карстовые), так и искусственные (различные выработки), являются важным фактором, изменяющим природное поле напряжений. Характер перераспределения напряжений вокруг полостей зависит от их формы, соотношения длины, ширины и высоты, глубины расположения по отношению к поверхности земли, близости соседних выработок, деформационных характеристик пород, в которых расположена полость, вида напряженного состояния и многих других. По данным расчетов, моделирования на эквивалентных и оптически активных материалах, измерений напряжений в натуральных условиях и наблюдений за деформациями стенок выработок установлены основные закономерности в распределении напряжений вокруг подземных полостей.

Изменение напряженного состояния массива пород вокруг подземных выработок и полостей заключается в концентрации напряжений вблизи последних в пределах зоны, распространяющейся на расстояние, соизмеримое с размерами полостей. Существенное влияние на распределение напряжений вблизи выработок оказывает вид напряженного состояния. Если полость находится в поле напряжений, когда его вертикальная и горизонтальная составляющие равны между собой (коэффициент бокового распора равен 1), то напряжения вокруг выработки в любой точке определяются только ее расстоянием от центра выработки. Максимальные величины сжимающих напряжений возникают на контуре выработки. Здесь они одинаковые во всех точках контура и вдвое превышают величины действующих на данной глубине напряжений.

Если выработка находится в гравитационном поле, когда горизонтальные напряжения составляют часть от вертикальных (коэффициент бокового распора меньше 1), напряжения в стенках и кровле выработки существенно различны. В стенках полости наблюдается концентрация вертикальных напряжений, достигающих на контуре полости максимальных значений. Величина вертикальных напряжений зависит от коэффициента бокового распора, т. е. они тем больше, чем меньше коэффициент. При коэффициенте бокового распора, равном 0,25 (коэффициент Пуассона равен 0,2), вертикальные напряжения на контуре выработки увеличиваются почти в три раза. Горизонтальные напряжения на контуре полости равны нулю, но в глубь массива быстро возрастают, становятся сначала больше, а затем уменьшаются до значений напряжений, имеющих место в массиве на данной глубине без выработки. В кровле полости наблюдается область растягивающих напряже-

ний, которая тем больше, чем меньше коэффициент бокового распора. При коэффициенте бокового распора, равном 0,25, растягивающие горизонтальные напряжения на контуре полости в ее кровле составляют четвертую часть от вертикальной составляющей гравитационного поля напряжений. Вертикальные напряжения в кровле полости уменьшаются на ее контуре до нулевых значений.

Еще бóльшая концентрация напряжений вблизи полостей и выработок наблюдается тогда, когда массив находится в поле действия тектонических сил. Если тектоническая сила, действующая в горизонтальном направлении, превышает вертикальную составляющую гравитационного поля, то максимальная концентрация напряжений наблюдается на контуре в кровле полости, а зона растягивающих напряжений перемещается на стенку выработки. Напряжения в зонах концентрации и растяжения и их размеры будут зависеть от того, насколько горизонтальная тектоническая сила превысит вертикальную составляющую гравитационного поля напряжений. Например, если тектоническая сила в 10 раз больше вертикальных напряжений, то на контуре кровли выработки горизонтальное напряжение в 3 раза превышает горизонтальную тектоническую силу. Растягивающее вертикальное напряжение на контуре стенки полости в 5 раз больше вертикальной составляющей гравитационного поля.

Большую роль в формировании поля напряжений вокруг подземных полостей играют их взаимное расположение, глубина залегания от поверхности земли и форма. Вокруг каждой одиночной полости формируется область влияния, в 1,5—2 раза превышающая ее размеры. Поэтому, если полости находятся на расстояниях, не превышающих трех-четырех их средних размеров, они будут влиять друг на друга и создавать общее поле напряжений. Вопрос о взаимном влиянии подземных полостей и выработок является достаточно сложным и решается путем теоретического изучения и практических наблюдений за поведением выработок. И. А. Турчанинов в 1978 г. установил, что в гравитационном поле вертикальное напряжение в целике между двумя полостями, расположенными на одном уровне, увеличивается в несколько раз, когда ширина целика становится меньше радиуса полости. При сближении выработок различного сечения выработка с большими размерами оказывает существенное влияние на распределение напряжений вокруг выработки меньшего сечения, где напряжения могут увеличиться в 2—2,5 раза. Выработка меньшего сечения на напряжения вокруг выработки бóльшего сечения практически не влияет. Если максимальное сжимающее напряжение действует вдоль линии, соединяющей центры полостей, между ними образуется зона разгрузки напряжений и т. д.

Форма полости или выработки является наиболее важным фактором концентрации напряжений на ее контуре. Чем больше кривизна контура, тем больше концентрация напряжений, т. е. наибольшие значения напряжений наблюдаются в угловых точках подземных полостей и выработок. Поэтому наибольшей устойчи-

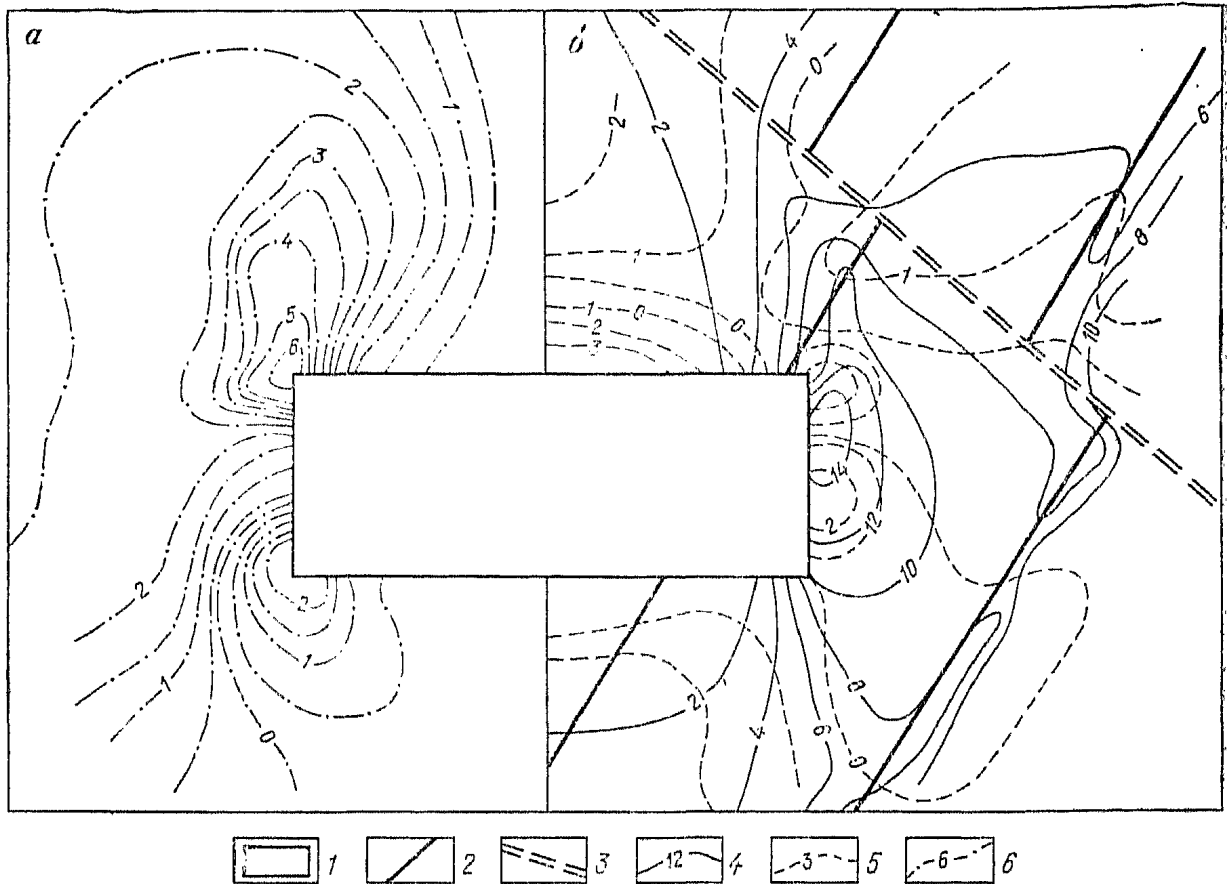


РИС. 26. Распределение тангенциальных  $\tau_{xy}$  (а) и нормальных вертикальных  $\sigma_y$  и горизонтальных  $\sigma_x$  (б) напряжений вокруг выработки прямоугольного сечения, пройденной в моноклиальной толще терригенных пород (разрез).

1 — контур подземной выработки; 2 — границы слоев различного состава и свойств; 3 — тектоническая трещина; 4—6 — изолинии напряжений, МПа (4 — нормальных вертикальных, 5 — нормальных горизонтальных, 6 — тангенциальных)

востью будут обладать выработки, имеющие плавные очертания.

Значительное влияние на распределение напряжений вокруг полостей и выработок оказывают строение и свойства вмещающих пород. Условия залегания и различия в деформационных свойствах пород (модуля деформации и коэффициента Пуассона) существенно изменяют структуру поля напряжений.

На рис. 26 показано распределение нормальных и касательных напряжений вокруг выработанного пространства прямоугольного сечения, пройденного на глубине 450 м в левом склоне р. Вахш в районе строительства Рогунской ГЭС, сложенного моноклиально залегающими терригенными породами, падающими в глубь склона. Напряжения были получены расчетами вариационно-разностным методом для случая гравитационного поля при условии, что коэффициент Пуассона пород равен 0,25. В боковой стенке выработки наблюдается концентрация вертикальных напряжений, которые больше чем вдвое превышают напряжения в массиве без выработки. В горизонтальном направлении породы, примыкающие к стенке выработки, испытывают растяжение, которое достигает максимальных значений 2 МПа в центре боковой стенки. В кровле выработки породы испытывают растяжение: в горизонтальном на-

правлении действуют нормальные напряжения, превышающие 3 МПа, в вертикальном — близки к нулевым. Под выработкой происходит разгрузка напряжений: вертикальные напряжения уменьшаются больше чем в 10 раз, а горизонтальные почти в 2 раза по сравнению с напряжениями в ненарушенном выработкой массиве. В углах выработки преобладают нормальные напряжения сжатия и развиваются очень большие по величине касательные напряжения, достигающие 6 МПа.

## ГЛАВА 16.

### **РЕГИОНАЛЬНЫЕ И ЛОКАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Изучение геологических процессов и их парагенетических ассоциаций, прогноз развития осуществляются с целью разработки теории процессов, способов управления ими и обоснования мер защиты. Сочетание региональных инженерно-геологических исследований с изучением процессов на локальных участках — принципиальное положение для решения этой сложной задачи.

Итоги изучения тектоники, строения и развития дна океанов, рифтов, зон глубинных разломов, сейсмических поясов, проницаемости этих структур для тепловых потоков из недр Земли, наконец, прямые измерения движений континентов свидетельствуют о значительной динамичности всей земной коры. Это надо учитывать прежде всего при возведении крупных сооружений, освоении активных краевых частей материков (типа районов Красного моря, Крыма и др.), территорий островных дуг, рифтовых зон и т. п., при изучении полей тектонических напряжений.

Региональные и локальные поля напряжений и их влияние на экзогенные процессы нельзя обстоятельно изучить без учета современного неоднородного тектонического поля Земли, которое характеризуется унаследованностью и режимом. Из-за твердых приливов даже в течение суток меняются проницаемость региональных зон дробления и интенсивность дегазации земной коры. На шахтах одного угольного бассейна за период 1947—1963 гг. была установлена четкая приуроченность выбросов угля и газа к новолуниям и полнолуниям; при этом в забоях, ориентированных широтно, выбросы происходили реже.

Следовательно, при изучении геологических процессов должны рассматриваться не только локальные и региональные, но и глобальные геологические закономерности.

### **СРЕДА ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ**

В региональных закономерностях геологических процессов отражено влияние на их типы, масштабы и распространение строения

и истории развития территории, воздействий оледенений, трансгрессий и регрессий, сейсмичности и климатической зональности. При региональном изучении процессов устанавливаются стадии их развития, унаследование и наложение, взаимообусловленность и взаимосвязи между ними, их парагенетические ассоциации. Это обеспечивает выявление действующих факторов и их вероятной значимости, прогноз основных тенденций их дальнейшего развития.

При региональных исследованиях получают в качественной или приближенной количественной форме важные характеристики процессов и явлений. Одни характеристики представляют закономерности, другие служат основой для детальных исследований. Вместе взятые, они могут рассматриваться как критерии для прогноза оползней, обвалов и других гравитационных явлений, карста, эрозии и т. п., для ориентировочной оценки устойчивости склонов сравнительно-геологическим и другими методами [27]. К таким характеристикам, получаемым при региональных исследованиях, относятся, например, приуроченность процессов и явлений к комплексам пород, тектоническим разломам и региональным разрывам, неоструктурным блокам разной степени поднятия, разновозрастным частям склонов, т. е. к присклоновым зонам выветривания и разуплотнения разной мощности и степени изменения.

Используя региональные закономерности процессов, осуществляют: а) анализ истории развития территории и склонов; б) разработку классификаций пород и процессов и выявление признаков для оценки устойчивости склонов; в) предварительную характеристику факторов, в том числе для сейсмического районирования; г) выбор и заложение участков для стационарного наблюдения за режимом современных геологических процессов, подземных вод, гидрометеорологических факторов; д) выбор объектов и методов детальных исследований на последующих стадиях проектирования и строительства.

Методологическая концепция о парагенезисе, взаимосвязи, взаимообусловленности и исторической направленности развития геологических процессов является основой их инженерно-геологической оценки и прогноза. Региональные закономерности пространственного развития геологических процессов, их региональные и генетические типы, объемы или интенсивность определяются главным образом геологическим строением территории, т. е. распространением и условиями залегания комплексов пород и геологическими структурами, а также напряженным состоянием земной коры и массивов выше эрозионного вреза.

Чем менее литифицированы породы, тем интенсивнее и быстрее они размываются, особенно при наклонном залегании, тем шире фронт для формирования других процессов, связанных с речной, овражной или склоновой эрозией. Чем неоднороднее массивы, тем вероятнее повышенное локальное обводнение их и формирование оползней и обвалов больших объемов, особенно при более глубоких эрозионных врезках рек. Чем круче залегают породы в неоднородных массивах, чем они больше рассечены зонами тектонической

трещиноватости, разрывами и разломами и чем выше сейсмичность территории, уровень ее напряженного состояния, тем чаще, в большем количестве и объемах будут развиваться оползни, обвалы, сели и другие геологические процессы и явления при любом из указанных здесь условий. Наконец, чем влажнее климат, больше температурные контрасты, чем изменчивее другие характеристики метеоусловий, тем в одних и тех же породах разнообразнее процессы и их интенсивность, особенно такие, как выветривание и разрыв пород. Подобных закономерностей много.

Рассмотрим два примера регионального изучения процессов — на платформе и в горно-складчатой области, раскрывающих методологию исследований такого рода.

При региональном изучении современных геологических процессов Западно-Сибирской плиты В. Т. Трофимов с сотрудниками установил, что важнейшие закономерности их пространственной изменчивости обусловлены современной увлажненностью и теплообеспеченностью территории (зональный фактор), рельефом, составом и состоянием пород (региональные факторы). При районировании естественные комплексы процессов и явлений (солифлюкция, термокарст, осыпи, оползни и др.) были обособлены как районы. Основным фактором их формирования оказалась эрозионная расчлененность территории. Для каждого района указывались комплекс процессов и их интенсивность. Наиболее крупными типологическими объединениями явились зоны, обособленные по состоянию грунтовых толщ (мерзлomu или талому), а затем — пояса, характеризующиеся по увлажненности территории.

Эту схему районирования нельзя целиком применить для горно-складчатых и других областей, где не только эрозия, избранная в приведенном выше случае как «аргумент», имеет значение для формирования геологических процессов. В сейсмически активных областях, например, в юго-западной части Тянь-Шаня, основными факторами формирования процессов служат литология пород, их неоднородность и режим обводнения, структуры, неотектонические и сейсмические условия территории, широтная и высотная климатическая зональность. Выделить для всей территории один главный фактор сложно: настолько они взаимосвязаны. Здесь целесообразно обособлять многофакторные ассоциации процессов и явлений. Неотектонические и сейсмические условия выступают в роли ведущего фактора прежде всего в пределах сейсмогенных обвально-оползневых зон. В этих зонах выше естественная и вызванная активизация оползней, обвалов и других явлений в больших объемах и большей повторяемостью. Эпизодически проявляющийся сейсмический фактор можно рассматривать в геологическом разрезе времени как постоянно действующий.

Границы и конфигурации сейсмогенных обвально-оползневых зон контролируются не только выходящими на поверхность региональными омоложенными глубинными разломами, но и более глубокими трансорогенными разрывными и пликативными структурами. На развитие склоновых процессов в сейсмически активных

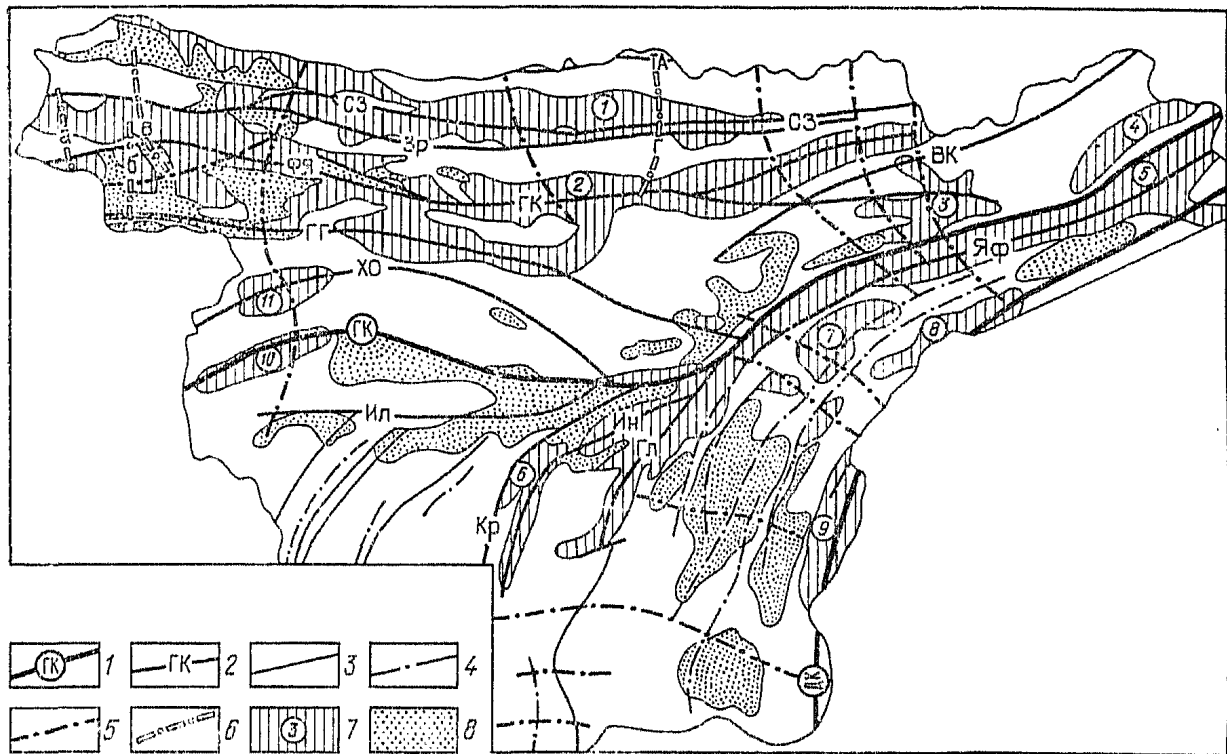


РИС. 27. Схема соотношений обвальнo-оползневых зон и неоструктур в юго-западной части Тянь-Шаня, Таджикской депрессии и их сочленения с Памиром. По В. С. Федоренко, С. М. Винниченко и др.

Глубинные разломы: 1 — краевые (ГК — Гиссаро-Кокшаальский, ДК — Дарваз-Каракульский); 2 — межзональные (ТА — Туркестано-Алайский; СЗ — Северо-Зеравшанский; Зр — Зеравшанский; ФЯ — Фараб-Ягнобский, ГК — Гиссаро-Каратегинский; ГГ — Главный Гиссарский; Хо — Ходжа-Обигармский; ВК — Восточно-Каратегинский, Ил — Илякский, Кр — Каратаусский; Ин — Ионахский, Гл — Гулизинданский, Яф — Яфучский); 3 — внутризональные. Новейшие поднятия: 4 — оси альпийских складок, развивающихся унаследованно; 5 — оси поперечных (трансорогенных) сводов; 6 — поперечные флексуры, обычно осложненные разрывами (а — Магиан-Фарабская, б — Шинг-Магианская, в — Шинг-Кугитуринская, г — Табушинская). Обвальнo-оползневые зоны: 7 — сейсмогенные (цифры в кружках: 1 — Туркестано-Зеравшанская; 2 — Фараб-Каратегинская; 3 — Хаитская; 4 — Сарыгойская; 5 — Яфуч-Вахшская; 6 — Сарсарьянская; 7 — Обихингоуская; 8 — Тавильдаринская; 9 — Дарваз-Каракульская; 10 — Гиссаро-Кокшаальская; 11 — Ходжа-Обигармская); 8 — несейсмогенные

областях влияют более глубокие слои литосферы, чем можно было предполагать. Первоначально это было установлено в Гиссаро-Алае [44], позднее — в Таджикской депрессии (рис. 27).

Влияние глубоких горизонтов литосферы на развитие геологических процессов должно учитываться и на платформах, так как они не являются целиком асейсмичными — в земной коре и верхней мантии под ними есть линейные волноводы, по которым возможно распространение сотрясений на значительные расстояния (например, от Карпат до Москвы и Ленинграда).

Эти примеры показывают, что региональное инженерно-геологическое изучение процессов должно осуществляться на широкой геологической основе, с привлечением данных о глубинных зонах литосферы, а в горно-складчатых областях — в тесной взаимосвязи с изучением сейсмодислокаций и сеймотектонических условий. Методики районирования комплексов процессов могут отличаться, но они должны строиться на одном принципе — отображать парагенетические ассоциации процессов и интенсивность их развития.



## ЛОКАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Детальное изучение геологических процессов на опорных или осваиваемых участках обеспечивает подход к созданию моделей процессов и их прогнозу и, следовательно, дает возможность принять практические решения по защите от них сооружений и территорий. При этом уточняются и дополняются региональные закономерности их развития в качественном и, что самое главное, в количественном отношении. В локальных закономерностях полнее, чем в региональных, отображаются соотношения и взаимосвязи основных качеств и особенностей геологической среды формирования конкретного процесса, сочетания факторов, при которых возникает процесс, изменения этого сочетания на основных стадиях его развития и под воздействием сооружения, способы, которые могут изменить взаимодействие среды и факторов, чтобы обеспечить безопасность и бесперебойное функционирование сооружения. Четкое указание необходимых и достаточных условий для формирования процесса, многих существенных факторов содержится, например, в основных закономерностях развития карста, сформулированных Д. С. Соколовым.

Теоретически и практически важно изучение режима процессов и факторов. Не только процессы, но и факторы должны оцениваться в динамике, так как при большом диапазоне и скорости изменения своих значений роль отдельных факторов в их совместном воздействии может существенно изменяться. Совокупность основных факторов также не всегда одинакова (например, в период между землетрясениями и при землетрясении). Так, многолетние стационарные наблюдения на крымском оползне «Золотой пляж» объемом около 5 млн. м<sup>3</sup>, сформированном в алевролитах, аргиллитах и песчаниках таврической серии, показали, что у оползней такого типа катастрофическое смещение наступает при повышенных значениях нескольких факторов, а не при максимуме одного из них. В последнем случае оползневой процесс лишь активизируется. По И. Ф. Ерышу и И. Б. Корженевскому, «ни землетрясение (8 баллов) 1927 г., ни атмосферные осадки в 1939 г. (1026 мм), в 1955 г. (1022 мм) и в 1968 г. (997 мм), превышающие норму для ЮБК в 2 раза, не вызвали катастрофических подвижек оползней. В то же время совпадение интенсивной абразии (с 15.XI 1968 г. по 16.I 1969 г., когда было размыто 20500 м<sup>3</sup>) с периодом значительного увлажнения оползневых масс и повышением уровня грунтовых вод на 4—6 м и возрастанием суммарных расходов источников в пределах оползня с 0,5 л/с до 1—1,5 л/с, а поверхностного стока до 10 л/с обусловило резкое повышение сдвигающих напряжений и снижение коэффициента устойчивости нижней части (1-я ступень) склона, согласно расчетам, на 20 %».

Локальные закономерности развития каждого процесса многообразны из-за изменчивости геологического строения территории, зонально-геологических условий, тектонического поля напряжений,

сейсмичности, климатической обстановки. Отсюда следует объективная необходимость первоочередного изучения региональных закономерностей и безусловного сочетания региональных и локальных исследований. Разнообразие локальных закономерностей и их связи с региональными покажем на примере карстового процесса.

Общей закономерностью развития карста является его приуроченность к прирусловой части долин, склонам и водоразделам, в их пределах — к разрывам, напластованиям, трещинам. В конкретных бассейнах она проявляется по-разному. На одних участках развития карбонатных пород доминирует закарстованность подрусовой части переуглубленных долин (например, на реках Кама и Ока), чему способствовало наличие трещин донного отпора и малые скорости неотектонического поднятия, при которых карст успевал сформироваться. В других местах, например, в районе Павловской ГЭС, более интенсивным оказался омоложенный карст, приуроченный в пермских известняках и доломитах к трещинам бортового отпора пра-Уфы — переуглубленной акчагыльской долины. Иногда современный, омоложенный или древний погребенный карст интенсивнее поражает водоразделы, например, на Самарской Луке. С наполнением Куйбышевского водохранилища здесь активизировалось выщелачивание гипсов.

В иных климатических условиях, по данным Н. Н. Кондратьева, в районе гидроузла Хадита на р. Евфрате (Ирак) поверхностные формы выщелачивания известняков на водоразделах практически не развиты. Олигоцен-миоценовые карбонатные породы закарстованы здесь на склонах, в трех классических разновозрастных этажах (средне-, позднеплейстоценовом и голоценовом). Интенсивная закарстованность известняков прирусловой части наблюдается там, где эрозией вскрыт перекрывающий слой слабопроницаемых брекчий.

На склонах разных типов по строению и генезису возникают свои ассоциации процессов. Если на платформах склоны речных долин развиваются по схеме: обвальный склон — оползневой — склон смыва — делювиальный, то в горных районах, главным образом из-за влияния землетрясений, закономерна такая последовательность: эрозионно-осыпной склон — оползневой — обвальный — эрозионно-осыпной. Как правило, нарушение выпуклых эрозионно-осыпных склонов, особенно на междуречьях, начинается с появления сейсмогенных трещин, а затем оползней в осевой части склонов. После этого обычно оползают возникшие при этом гребни, затем, в третьей стадии, — привершинная часть. Смещение осевой части склона связано, вероятно, с большим обводнением, гребней — со значительным снижением прочности пород из-за проникновения выветривания не только сверху, но и с боков, а привершинной части — вследствие подрезки склона оползнями предыдущих двух стадий. Мощные присклоновые зоны выветривания испытывают ячеисто-блоковое разрушение, и в конечном итоге склоны субпараллельно отступают, пока очередное сильное землетрясение или другой фактор не откроет новый цикл. Интенсивность развития

ведущих процессов и явлений, их типы, объемы, повторяемость на этих стадиях развития склона различны. Отсюда ясно, насколько методологически важно знать историю развития каждого склона.

Лишь на локальных участках, где проводятся детальные исследования и разведка, можно уточнить факторы как критерии прогноза геологических процессов (определить обусловленность процессов пространственными соотношениями основных систем первичной и тектонической трещиноватости со склоном, прочностью пород, режимом обводнения и т. п.). Закономерности локального характера, особенно на завершающих стадиях проектирования, должны содержать следующие основные данные: количественные характеристики факторов и их связи с изменениями как местных, так и региональных условий, причем с указанием пределов и, по возможности, скорости варьирования их значений; современная подчиненность факторов, в том числе тех, которые выявились при более детальном изучении локального участка, и возможные изменения их последовательности; наиболее неблагоприятные сочетания значений факторов. Итогом такого анализа должна быть общая или специальная, учитывающая цель исследований схема (модель) природного процесса. При техногенных воздействиях на массив должны рассматриваться модели трансформированного природного процесса для начальной и последующих стадий его развития.

Решение указанных выше задач зависит от изученности при-склоновых и приразрывных изменений, свойств и состояния пород в активной зоне сооружения. Например, при оценке и прогнозе напряженно-деформированного состояния массивов должны быть найдены соотношения между прочностью пород и напряжениями в разных частях массива, установлены участки с дефицитом прочности. Это требует более детального изучения слоев малой прочности, контактов и зон, источников и режима обводнения массива. Необходимы стационарные наблюдения.

Важное теоретическое положение об очагах с дефицитом прочности надо дополнить представлением о характеристических «точках» массивов, по состоянию которых можно судить о приближающейся общей деформации и смещении. Например, если склон подмывается рекой и повышенно увлажняется в своей верхней части и если в обоих пунктах начались деформации, то характеристической точкой будет центральная зона оползневого тела. У более сложных оползней характеристических точек может быть много. Их положение важно знать для прогноза устойчивости массивов, оптимального размещения исследовательских реперов и других измерителей при стационарных и разовых исследованиях смещающихся массивов.

Изучение региональных закономерностей основывается главным образом на материалах картирования и дешифрирования аэро- и космоснимков. При этом разрабатываются региональные классификации пород, процессов и их парагенетических ассоциаций, осуществляется статистическая обработка данных о них, производится

изучение кор выветривания, датировка частей склонов по возрасту, типизация гидрогеологических условий и т. п. Локальные закономерности развития геологических процессов устанавливаются при крупномасштабном картировании, которое сопровождается дальней и ближней фототеодолитной съемкой, бурением, проходкой шурфов и штолен, откачками и нагнетаниями, полевыми опытами по определению деформационных и прочностных свойств пород и другими исследованиями, результаты которых используются при физическом и математическом моделировании и различных расчетах.

Локальные закономерности развития геологических процессов служат основой для принятия местных проектных решений, региональные — главным образом важны в аспекте экстраполяции локальных закономерностей и опыта строительства, а также для характеристики парагенетических ассоциаций процессов (территорий с разной устойчивостью), принятия региональных проектных решений по вопросам инженерной защиты территорий, сооружений и охраны окружающей среды. В региональных закономерностях доминирует общее, в локальных — оно выражено в частном.

Таким образом, региональные и локальные закономерности развития многофакторных, стадийных и необратимых геологических процессов дополняют и обогащают друг друга. Региональные закономерности развития процессов основаны на данных большого временного диапазона. Они включают все стадии процесса, и поэтому им принадлежат направляющие и даже контрольные функции в познании процесса. Научный уровень региональных исследований геологических процессов возрос. Он должен совершенствоваться и в дальнейшем, так как от этого во многом зависят качество инженерно-геологических исследований и эффективность всего проектно-изыскательского цикла.

## ГЛАВА 17.

### **ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ**

Интенсивная и разнообразная хозяйственная деятельность человека вызывает значительные изменения геологической среды, активизацию природных и развитие инженерно-геологических процессов. По масштабу и характеру воздействия на геологическую среду выделяются глобальные, зональные, региональные и локальные виды техногенного воздействия [16].

Понятие «глобальное воздействие человека на литосферу» включает в себя последствия техногенной деятельности, ощущаемые на больших пространствах (например, сейсмические явления, связанные с ядерными взрывами), и суммарное развитие однотипных инженерно-геологических процессов в разных регионах Земли.

Зональный характер определяется хозяйственным освоением в пределах одной инженерно-геологической зоны. При этом возникают инженерно-геологические процессы, особенности которых связаны с зонально-климатическими условиями. Например, в аридных зонах специфика развития инженерно-геологических процессов преимущественно определяется развитием ветровой эрозии, в зонах многолетнемерзлых пород — их температурным режимом. Региональный вид техногенного воздействия охватывает территорию инженерно-геологического региона и сопровождается развитием инженерно-геологических процессов, имеющих региональное значение и распространение. Примером может служить Магнитогорский инженерно-геологический регион, сложенный преимущественно породами карбонатной формации, где при хозяйственном освоении территории активизируются карстовые процессы в пределах всего района [17]. Локальное воздействие на геологическую среду предполагает развитие инженерно-геологических процессов на ограниченных площадях.

Несмотря на сопоставимость проявления геологических и инженерно-геологических процессов, вторые характеризуются более многообразным воздействием на геологическую среду. Это обусловлено новым типом обмена веществ в природе — техногенным, который отличается от биогеохимического по движущим силам (целенаправленная деятельность человека), по элементам взаимодействия (технические сооружения, механизмы, искусственные материалы и пр.) и интенсивности. Техногенный обмен веществ характеризуется более сильным изменением гравитационных, геохимических, гидродинамических и других полей. То, что в естественных условиях формировалось на протяжении сотен тысяч и миллионов лет, под воздействием человеческой деятельности возникает практически мгновенно. Это нарушает парагенетические связи геологических процессов, создает необычные для природной обстановки сочетания действующих факторов, которые вызывают развитие новых совокупностей процессов.

#### **ТЕХНОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Техногенные факторы можно объединить в несколько групп, выделение которых обусловлено характером, масштабом и интенсивностью воздействия человека на геологическую среду. При составлении атласа карт изменения геологической среды под влиянием деятельности человека на территории Восточной Европы в масштабе 1:2500 000 техногенные факторы рассматривались применительно к четырем видам освоения территории: 1) разработке полезных ископаемых, 2) гидротехническому и гидромелиоративному строительству, 3) промышленному, гражданскому и дорожному строительству, 4) комплексному воздействию. При изучении изменений геологической среды Нечерноземной зоны РСФСР были выделены три группы техногенных факторов, связанные с: 1) го-

родским и гидротехническим строительством, 2) разработкой месторождений полезных ископаемых, 3) мелиоративным и дорожным строительством.

Подобная группировка инженерно-хозяйственного воздействия на геологическую среду отражает специфику развивающихся процессов, однако разные виды строительства могут вызвать развитие одинаковых процессов. Например, оползни возникают при гидротехническом, городском и горнотехническом строительстве, проседание земной поверхности образуется при мелиорации земель, добыче твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых, подземном строительстве и пр. Каждый тип освоения территории сопровождается возникновением множества процессов, находящихся в сложной взаимосвязи, характер которой мало изучен. Следует иметь в виду, что одно и то же техногенное воздействие в различных геологических и гидрогеологических условиях может привести к возникновению разных инженерно-геологических процессов. При рассмотрении общих закономерностей активизации геологических процессов целесообразно выделять ведущие техногенные факторы, действие которых в наибольшей степени определяет изменение геологической среды, опасность для сооружений и защитные мероприятия.

Наиболее детально техногенные процессы и явления классифицировал и выделил 94 их вида Ф. В. Котлов. Основываясь на анализе классификаций инженерно-геологических процессов и факторов, их вызывающих, составленных В. А. Приклонским, Г. С. Золо-

Т а б л и ц а 22

**Основные техногенные факторы активизации геологических процессов**

Виды техногенного воздействия на геологическую среду	Основные действующие факторы
Статические нагрузки от инженерных сооружений	Давление
Динамические нагрузки (взрывы, работа механизмов)	Колебания
Строительные выемки, создание карьеров	Изменение напряженного состояния и гидрогеологических условий массивов
Создание подземных полостей	То же
Земляные сооружения (насыпи, отвалы)	Давление, изменение поверхностного стока
Создание водохранилищ	Давление воды, энергия волнения, изменение режима подземных вод
Создание каналов	Эрозия, промачивание грунтов
Групповые водозаборы, добыча нефти и газа	Понижение уровня подземных вод
Орошение земель	Изменение режима и состава подземных вод
Сброс и складирование промышленных вод и отходов	То же
Нарушение растительного и почвенного покрова	Изменение радиационного и влажностного баланса

таревым, Ф. В. Котловым, Е. М. Сергеевым, Г. К. Бондариком и другими, можно выделить 11 основных видов техногенного воздействия на геологическую среду, каждый из которых характеризуется определенным сочетанием факторов, активизирующих геологические процессы (табл. 22).

### **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Процессы, развивающиеся при статических нагрузках от инженерных сооружений. Гражданские и промышленные объекты оказывают существенное воздействие на структуру и физико-механические свойства грунтов. Статические давления от многоэтажных зданий достигают 0,5 МПа, а от отдельных промышленных сооружений до 2 МПа, в связи с чем в зоне активного сжатия глубиной до 70 м происходит уплотнение грунтов и уменьшение их влажности. Породы разного состава, генезиса и состояния неодинаково реагируют на нагрузки. Значительной неравномерностью, например, отличаются деформации оснований сооружений, представленные элювием скальных грунтов. При строительстве на слабоуплотненных глинистых породах часто возникает выпор дна котлованов и разжижение глин за счет давления воды, содержащейся в песчаных прослоях. Нагрузки на лёссовые грунты в сочетании с их увлажнением приводят к разрушению структурных связей и суммарным деформациям в пределах активной зоны до 1,5 м и более.

Зачастую строительство ведется на искусственных насыпных грунтах, обладающих неравномерной сжимаемостью. Как правило, эти грунты имеют обводненность сложного характера, и при вскрытии водосодержащих разностей грунтов происходит рост деформаций на соседних участках.

Застройка территорий, сложенных мерзлыми породами, приводит к деградации мерзлоты и неоднородным деформациям пород оснований сооружений. На участках залегания переувлажненных грунтов часто развивается пучение, приводящее к разрушению фундаментов сооружений.

Процессы, возникшие при динамических нагрузках. Можно выделить два основных вида динамических нагрузок, возникающих при: взрывах, действие которых сходно с землетрясениями, и сотрясении от работы механизмов (транспорта, добывающей техники и пр.). Взрывы осуществляются при вскрытии полезных ископаемых и прокладке транспортных путей, для создания искусственных плотин и пр. Сейсмические эффекты при взрыве вызывают развитие склоновых явлений. Так, в результате опытного взрыва многотонного заряда в Киргизии, где проектируется создание высокой каменно-набросной плотины с помощью направленных взрывов, на склонах образовалась зона нарушенных пород, в пределах которой произошло раскрытие трещин от 0,2 до 1,0 м в ширину и до 200 м в длину. По ним произошли оползни

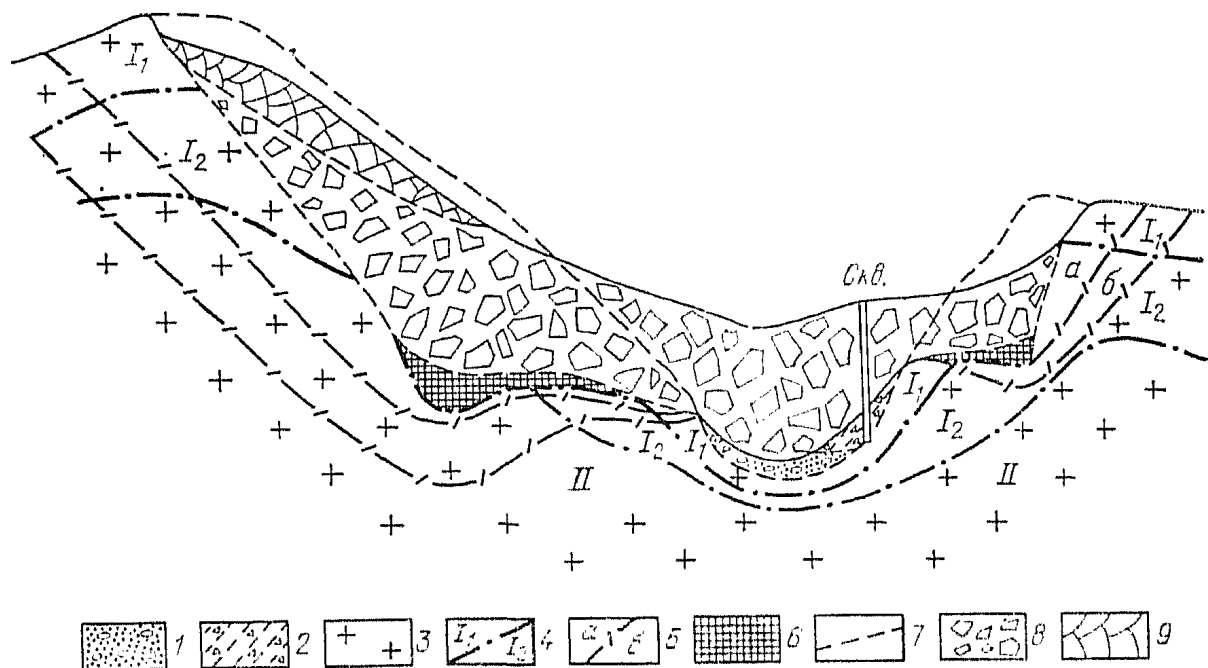


РИС. 28. Влияние взрыва на гранитный массив.

1 — аллювиальные отложения (галечник с супесчано-гравийным заполнителем, материал слежавшийся); 2 — делювиальные отложения (дресвяно-щебнистый материал с супесчано-суглинистым заполнителем, породы рыхлые слабо закрепленные); 3 — граниты средне- и крупнозернистые, крепкие, трещиноватые; 4 — границы инженерно-геологических подзон; I<sub>1</sub> — интенсивного выветривания и разгрузки, I<sub>2</sub> — слабого выветривания и разгрузки, II — практически сохранных пород; 5 — зона трещиноватости (а — интенсивного влияния взрыва на массив, б — слабого влияния взрыва на массив); 6 — зона дробления пород взрывом; 7 — контур воронки взрыва; 8 — раздробленные породы, перемещенные взрывом; 9 — оползень

и обвалы объемом до 30 тыс. м<sup>3</sup> (рис. 28). Сооружение дорожных выемок и полувыемок взрывным способом приводит к многочисленным обвално-осыпным явлениям на откосах, в связи с чем приходится уменьшать крутизну откосов в 1,5—2 раза по сравнению с проектной.

Существенное снижение коэффициента запаса устойчивости откосов происходит при взрывах на расстоянии менее 50—70 м от них. В целях обеспечения устойчивости откосов рекомендуется специальная технология взрывных работ, создание предварительно разрушенной зоны вблизи откоса с помощью рядов скважин.

Динамические нагрузки на грунты от работающих механизмов, движущегося автомобильного и железнодорожного транспорта, как правило, незначительны. К ним чувствительны рыхлые водонасыщенные грунты, а также сильнотрещиноватые породы в зоне выветривания. Под действием динамических нагрузок может происходить уплотнение грунтов, внезапное их разжижение, возникают оползни и оплывины на откосах дорожных выемок и карьеров.

Процессы, возникающие при создании строительных выемок и карьеров. При транспортном строительстве и добыче полезных ископаемых открытым способом создается большое число выемок, что обуславливает значительные изменения геологической среды, выражающиеся в изменении рельефа, поверхностного и подземного стока, напряженного состояния массивов пород, условий тепло-массообмена в верхних слоях грун-



товой толщи и др. Значительная активизация геологических процессов отмечается при проведении осушительных мероприятий на карьерах. Поскольку глубина современных карьеров достигает несколько сотен метров, при осушении образуются сильные фильтрационные потоки, вызывающие суффозию песчаных грунтов или вынос заполнителя из трещин и карстовых пустот. Хорошо известны суффозионные явления, достигшие огромных размеров, при разработке месторождений Курской магнитной аномалии. Другим техногенным процессом на карьерах и выемках является развитие оползней, осыпей и обвалов.

Примером активизации оползневых процессов являются бурогольные карьеры Челябинского угленосного бассейна. Падение пород в сторону борта, сильная их выветриваемость и большая влажность обусловили широкое развитие оползней. Там, где воды были отведены, уступы бортов карьеров сохранялись в течение 2—3 лет. В скальных породах на откосах возникают осыпи и обвалы.

На Северном Кавказе при вскрытии легко выветривающихся аргиллитов и глин откосы дорожных выемок через 1—3 года теряют устойчивость. При отсутствии защитных подпорных стенок или водоотводных траншей образуются значительные оползни. Многочисленные обвалы и оползни возникли при прокладке дорожных выемок в выветрелых гранитах на Главном Кавказском хребте (Рикотский перевал), что потребовало выполнения большого комплекса укрепительных мероприятий, а также изменения направления трассы.

Процессы, возникающие при создании подземных полостей. Подземное строительство (шахты, штольни и др.) приводит к перераспределению напряжений в окрестностях выработок, созданию зон повышенных напряжений в приконтурной зоне и давлению на крепь и обделку. В результате этого, в зависимости от типа пород, развиваются упругие или пластические деформации, приводящие к стрелянию, вывалам или пучению пород. Выработка подземных пространств приводит к деформациям вышележащих толщ и их сдвигению. Наблюдения на территориях некоторых угольных бассейнов показали, что разработка пластов угля на глубинах 450—500 м приводит к деформациям сооружений на поверхности земли.

При подземной газификации угля на глубинах 70—200 м могут образовываться полости объемом до 4000 тыс. м<sup>3</sup>, что приводит к формированию мульд сдвига и последующему оползанию пород.

На одном из железорудных бассейнов в результате разработки месторождений происходило общее проседание земной поверхности, а также образование террасовидных уступов и провальных воронок глубиной до 25—50 м и диаметром в несколько десятков метров.

Процессы, возникающие при возведении земляных сооружений. Создание насыпей, дамб, отвалов оказывает двойное воздействие на геологическую среду: 1) приводит к изме-

нению поверхностного стока; 2) создает дополнительные нагрузки на грунты. Бессистемная засыпка балок и морских побережий может привести к подъему грунтовых вод и подтоплению территории, оседанию, а в построенных зданиях могут образовываться трещины и различные повреждения.

Из-за недостаточной прочности подстилающих пород в отвалах, образованных при вскрытии угольных пластов на месторождениях юга Красноярского края, возникают оползни с валами выдавливания у основания откоса.

В долине р. Баксан (Северный Кавказ) участились сели из двух левобережных притоков. Причиной их возникновения послужили отсыпки щебнисто-глыбового материала из карьера на склоны селеопасных долин. Увеличение объема рыхлого материала в долине с крутым уклоном русла таит опасность развития крупных оползней-потоков.

В районах распространения многолетнемерзлых пород под насыпями происходит их протаивание и деформации, приводящие к разрушению насыпей, образуются наледи, а в летнее время — солифлюкция и многочисленные оплывины на откосах насыпей.

Процессы, обусловленные созданием водохранилищ. Водохранилища вносят существенные изменения в геологическую среду, по существу активизируют все экзогенные процессы и в отдельных случаях — эндогенные (возбужденная сейсмичность в зоне горных глубоких водохранилищ). Типы и масштабы развивающихся процессов зависят, в первую очередь, от размеров и конфигурации берегов водохранилища, литологии пород и режима эксплуатации.

Геологическая деятельность равнинных водохранилищ вызывает прежде всего абразию, которая интенсифицирует выветривание пород и склоновые процессы. Создание водохранилищ вызывает подпор и изменение режима подземных вод, что, в свою очередь, приводит к активизации карстово-суффозионных процессов, эрозии, просадок и подтоплению территории. Интенсивность протекания выветривания пород на берегах водохранилищ определяется попеременным их увлажнением и высыханием в результате сработки и подъема уровня воды. Режимные наблюдения за выветриванием пород показали, что скорость выветривания в массивах разного литологического состава может быть различна. Например, прогнозируемые скорости отступления берегов Богучанского водохранилища в результате осыпания выветрившихся пород могут изменяться от 0,01—0,015 мм/год (в траппах) до 2,3—4,8 мм/год (в песчаниково-глинистых породах). По наблюдениям на Камских водохранилищах И. А. Печеркина, Г. И. Карзенкова, В. И. Каченова, зона активизации обвально-осыпных процессов составляет первые десятки метров; оползней, в зависимости от высоты склонов, — первые сотни метров, а на участках, сложенных растворимыми породами, зона активизации карстово-суффозионных процессов может распространяться в сторону водоразделов на несколько километров. Существенно усложняет условия прибрежных территорий водохра-

нилищ развитие подтопления и связанного с ним заболачивания, ширина зон которого может достигать нескольких километров.

При интенсивной переработке берегов водохранилищ образуются всякие тальвеги оврагов и эрозионных ложбин, что приводит к оживлению эрозионной деятельности. Овражная эрозия разрушает также и подводную прибрежную отмель при низких уровнях водохранилищ. После восстановления уровня водохранилища вдольбереговые течения нивелируют подводный рельеф; это, в свою очередь, приводит к углублению отмели водохранилища и дальнейшей абразии берегов.

Водоохранилища глубиной более 100 м могут вызвать увеличение сейсмической активности территории. Это связано с прогибом слоев пород под действием веса воды и возрастанием в них порового давления, что играет роль спускового механизма землетрясений. В настоящее время во многих странах известно более двадцати землетрясений, которые были вызваны наполнением крупных водохранилищ [11]. Наиболее сильное возбужденное землетрясение произошло в Индии в 1967 г. на участке гидроузла Койна, который расположен в районе, считавшимся ранее несейсмичным. После заполнения водохранилища в 1962 г. начались слабые землетрясения вблизи плотины, частота которых резко возросла с середины 1963 г. В течение 1967 г. произошло пять сильных землетрясений с магнитудой до 5,5 и, наконец, 10 декабря 1967 г. — разрушительное землетрясение с магнитудой  $\geq 6$ .

На берегах водохранилищ, сложенных лёссовыми породами, вследствие развития подпора грунтовых вод происходит развитие просадок. По данным З. Х. Халматова, при быстрых сработках уровня на 16—20 м, как, например, на Южно-Суханском водохранилище (Средняя Азия), распространение просадочных трещин наблюдалось на расстоянии 18—20 м от бровки надводного уступа. В случае, когда высокий уровень воды держится в течение длительного времени (Каховское водохранилище), просадочные деформации проявляются в полосе шириной до 1000 м. Их затухание во времени происходит гораздо быстрее, чем на водохранилищах, где отмечаются быстрая сработка уровня и ежегодная активизация просадочных деформаций.

Специфичным влиянием на геологическую среду отличаются горные водохранилища, характеризующиеся большим разнообразием морфометрических параметров и режимов эксплуатации, более сложными геологическими и гидрогеологическими условиями территории. Наблюдения за изменениями природной обстановки на участках горных водохранилищ свидетельствуют о том, что активизация экзогенных геологических процессов определяется в основном резкими колебаниями уровня воды (до 60—70 м и более) и гидродинамическими эффектами, вызванными ими. Абразионная переработка берегов не типична для горных водохранилищ из-за большой извилистости и малой ширины, что не позволяет формироваться волнам большой энергии.

Быстрая сработка уровня горных водохранилищ резко усили-

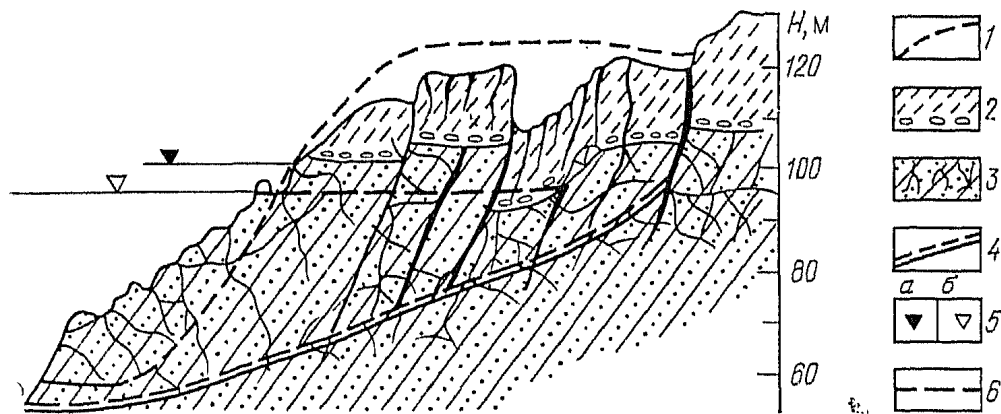


РИС. 29. Схематический разрез оползня на Красноярском водохранилище. По В. С. Кусковскому.

1 — профиль склона до возникновения оползня; 2 — супеси и галечники; 3 — трещиноватые песчаники и алевролиты; 4 — поверхность скольжения оползня; 5 — уровень водохранилища (а) и горизонт сработки (б); 6 — уровень грунтовых вод

вает процессы выветривания пород как за счет попеременного увлажнения и высыхания, так и в результате постоянного перемещения осыпающихся и размываемых пород в мертвый объем водохранилища. Изменение физико-механических свойств пород, смачивание плоскостей трещин в сочетании с возникающим гидродинамическим давлением при сработке уровня приводит к широкому развитию обрушений и оползней.

Например, при наполнении Красноярского водохранилища стали развиваться оползни в палеозойских терригенных породах, что связано с фильтрацией вод по трещинам и смачиванием глинистого заполнителя. Объем отдельных оползней достиг 3 млн. м<sup>3</sup>. На рис. 29 показан разрез оползня шириной около 400 м и длиной до 300 м, произошедшего в красноцветных песчаниках и алевролитах. Поверхность скольжения сформировалась по напластованию и трещинам, секущим породы по их падению.

Создание водохранилищ в районах распространения многолетнемерзлых пород приводит к резкому изменению мерзлотных условий в береговой зоне и разрушению берегов, сложенных льдистыми породами, под действием механической и тепловой энергии движущейся воды (термоабразия) и просадке дна водохранилища вследствие его протаивания (термокарст). Эти процессы часто протекают совместно, особенно при развитии низких берегов водохранилищ, где многолетнемерзлые породы перекрыты дерново-торфяным слоем.

Процессы, обусловленные созданием каналов и орошением земель. Создание каналов и оросительных систем оказывает существенное воздействие на геологическую среду, поскольку в сферу деятельности человека вовлекаются значительные территории. При этом основными факторами воздействия являются эрозия грунтов, повышение уровня грунтовых вод и изменение их химического состава, развитие деформаций грунтов и суффозии. В некоторых районах Средней Азии активизация эро-

зионных процессов наблюдалась в результате орошения массивов. При сбрасывании использованных поливных вод и особенно во время весеннего половодья там образовались овраги глубиной до 35 м и шириной 200—250 м. Отмечалось также углубление русел каналов, однако в результате создания бетонных лотков, дамб, распределителей в настоящее время преобладают процессы осадконакопления в каналах и образование аккумулятивных террас.

Активная суффозия развивается в каналах, сооруженных в лёссовых породах. Размывы грунта начинаются обычно на глубине: вымываются подземные галереи, которые обуславливают разрушение бортов и дна каналов на значительном протяжении. При прорывах выносятся сотни и тысячи кубометров грунта. Большое число суффозионных воронок (до 20 на каждые 100 м<sup>2</sup>) отмечается в Яванской долине (Таджикистан) на участках интенсивного орошения.

При строительстве оросительных систем часто встает проблема оценки деформаций просадочности, поскольку примерно 80 % всех оросительных систем построено или строится на лёссовых грунтах. Значительные просадки отмечаются в Вахшской долине (Таджикистан) почти на всем протяжении оросительных каналов. Неупорядоченные поливы приводят к неравномерным просадкам: на равнинных площадках — 0,2—0,4 м, в западинах — 1—1,2 м.

В районах ирригационного строительства в результате подъема уровня грунтовых вод происходит подтопление, заболачивание или засоление грунтов. Так, в зоне Каракумского канала сформировался подпор грунтовых вод на 15—18 км, что привело к засолению грунтов в пределах этой полосы.

Процессы, обусловленные водозаборами, добычей нефти и газа. Изменения геологической среды, вызванные откачками жидких и газообразных полезных ископаемых, а также водопонижением при горных разработках, носят, как правило, региональный характер. К ним относятся: 1) изменение условий питания подземных вод; 2) формирование депрессионных и пьезометрических воронок подземных вод, 3) осушение смежных водоносных горизонтов, 4) изменение химического состава вод в результате взаимодействия водоносных горизонтов, 5) деформация пород и земной поверхности.

При отсутствии взаимосвязи с поверхностными водами и вышележащими водоносными горизонтами образуются понижения до 100 м, а радиус депрессионных воронок достигает 100 км. При пополнении эксплуатируемых горизонтов за счет перетока вод из соседних размеры понижений и воронок значительно меньше, однако в этом случае происходит изменение химического состава и температуры вод. Если же привлекаемые ресурсы из смежных водоносных горизонтов ограничены, происходит осушение этих горизонтов. Водоснабжение и осушение при эксплуатации Михайловского железорудного месторождения привело к развитию региональных воронок депрессий, что вывело из строя ряд эксплуатируемых скважин для сельскохозяйственного водоснабжения на

этой территории. Значительные изменения гидрогеологических условий произошли в Североуральском бокситовом районе (СУБР), который характеризуется распространением сильно закарстованных карбонатных пород мощностью до 1000—1300 м. Разработка месторождений бокситов привела к нарушению режима подземных и поверхностных вод на значительной площади. Максимальное понижение уровня воды достигло 360 м. В результате этого произошло интенсивное поглощение речного стока (до 70 % в 1960 г.). Следствием интенсивных откачек явились подток глубинных хлоридных и сульфатных вод и увеличение общей минерализации вод с 180—200 до 300—400 мг/л. Понижение уровней подземных вод и увеличение скоростей фильтрации при откачках привели к широкому развитию суффозионных процессов.

Сброс и складирование промышленных вод и отходов приводят к изменению химического состава грунтов и подземных вод. Загрязняют почвы и подземные воды, хотя и с меньшей интенсивностью, промышленные отходы, выбрасываемые в атмосферу. При взаимодействии загрязнителей с породами и подземными водами протекают реакции окисления, восстановления, гидролиза и др., что приводит к выпадению осадков, разрушению органических соединений и т. д. Отмечается также изменение фильтрационных свойств песчано-глинистых пород по отношению к соленым водам.

Приведенные примеры развития геологических процессов под влиянием техногенных факторов показывают, что масштабы изменения геологической среды при этом достаточно велики. В целях рационального использования территории и создания эффективной защиты сооружений и геологической среды необходимо совершенствовать методы прогноза активизации процессов, используя их на всех стадиях инженерно-геологических исследований.

## ГЛАВА 18.

### **ОСНОВЫ ПРОГНОЗА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Прогноз геологических и инженерно-геологических процессов в общем виде сводится к определению типа, места, масштаба и времени возникновения явлений, обусловленных природными и техногенными факторами. По отношению к рассматриваемым геологическим объектам выделяются локальные, региональные и глобальные прогнозы. Локальные прогнозы выполняются для ограниченных территорий и направлены на выяснение взаимодействия отдельных сооружений с геологической средой в целях обоснования их защиты от геологических процессов, оценки ущерба, обусловленного активизацией процессов, а также для выбора критериев региональных прогнозов, которые охватывают крупные территории с расположенными или проектируемыми в их пределах инженерными сооружениями. Цель глобальных инженерно-геологических

прогнозов — предсказание возможных изменений геологической среды в масштабах всей планеты.

По времени, на которое рассчитаны прогнозы, можно выделить: 1) краткосрочные — на период строительства и первых лет эксплуатации сооружений, когда активизация геологических процессов, вызванная техногенными факторами, происходит наиболее интенсивно; 2) долгосрочные — на все время функционирования сооружений; 3) футурологические — на перспективу хозяйственной деятельности человека в будущем.

В практике инженерно-геологического прогнозирования используются «экстренные предупреждения» (по Е. П. Емельяновой), когда за короткий промежуток времени может возникнуть катастрофическое явление, или «безотносительные ко времени прогнозы» (по Г. К. Бондаркину) для явлений редкой повторяемости.

### **СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ПРОЦЕССОВ**

Инженерно-геологические прогнозы выполняются различными методами: сравнительно-геологическими, расчетными, моделирования.

Методы первой группы (сравнительно-геологический, по Е. П. Емельяновой и Г. С. Золотареву, природных аналогов, по Л. Б. Розовскому, инженерно-геологических аналогий, по Н. В. Коломенскому) основаны на выявлении факторов и закономерностей развития процессов в новейшее и современное время и переносе их действия в будущее. Например, такой историко-генетический подход широко использовался при оценке и прогнозе обвально-оползневых явлений в горно-складчатых областях [15]. Учитывались следующие факторы, определяющие формирование горных склонов: 1) состав пород и условия их залегания; 2) трещиноватость; 3) разгрузка и выветривание пород; 4) подземные воды; 5) прочностные и деформационные свойства; 6) напряженное состояние массивов; 7) геологическая история развития склонов.

Л. Б. Розовским разработана теория геологического подобия сравниваемых объектов, по которой «... подобными называются те геологические процессы, явления и образования, у которых сходство существенных, осредненных и обобщенных качеств сопровождается приближенно пропорциональными изменениями этих качеств или их соотношений...» [36]. Это позволяет прогнозировать процессы путем сравнения геологически подобных объектов, на одном из которых ожидаемый процесс уже проявился, т. е. подбирать природный аналог изучаемому объекту. При большом количестве аналогов для быстроты поиска наиболее подходящих из них создаются информационно-поисковые системы (ИПС).

Сравнительно-геологические методы позволяют наиболее объективно судить о возможности возникновения процессов и явлений, поскольку при этом анализируется природная обстановка их зарождения и развития. Однако инженерные сооружения, а также производство строительных работ вносят изменения в естествен-

ный ход процессов, поэтому прогнозы, выполненные сравнительно-геологическими методами, нуждаются в корректировке по данным наблюдений за изменениями геологической среды в процессе строительства и эксплуатации сооружений.

Методы второй группы (расчетные) основаны на использовании детерминированных и статистических моделей геологической среды. Детерминированные модели представляют собой математические выражения функциональных связей или их графические аналоги. Несмотря на абсолютную количественность прогноза при исследовании детерминированных моделей прогноз не может считаться полностью достоверным, поскольку такие модели сильно упрощают природные взаимосвязи элементов геологической среды. В этом отношении статистические модели позволяют полнее отражать многообразие и сложность факторов развития процессов, так как наряду с функциональными зависимостями они включают в себя случайные параметры, что характеризует комбинации детерминированных и случайных полей, присущих геологическим телам. В инженерной геологии используются различные статистические модели: линейные, корреляционные, дисперсионного анализа и др. Большое значение для прогноза инженерно-геологических процессов имеет построение рядов их динамики с последующим гармоническим или корреляционно-регрессионным анализом.

Гармонический анализ позволяет прогнозировать процесс без рассмотрения факторов, его вызывающих; при этом считается, что роль факторов реализуется в частоте возникновения явлений. С помощью корреляционно-регрессионного анализа устанавливаются связи между процессами и факторами их развития, которые потом экстраполируются на необходимый срок.

С помощью вероятностно-статистических моделей выполнены региональные прогнозы активизации экзогенных геологических процессов для различных территорий СССР и, в частности, Черноморского побережья. Составлены прогнозные карты активизации абразионных, оползневых, селевых и эрозионных процессов. На этих картах дается районирование территории по интенсивности и сочетанию экзогенных геологических процессов, а также прогноз активизации процессов на различные промежутки времени.

Однако неодинаковая представительность исходных данных (количество произошедших явлений разных генетических типов в зависимости от рассматриваемых факторов) существенно ограничивает использование вероятностно-статистических методов, что приводит к необоснованному распространению частных прогнозных оценок на большие территории. Кроме того, эти методы не учитывают изменение условий развития процессов во времени. Геологические процессы развиваются в нестационарном режиме, претерпевая стадии зарождения, развития и затухания, поэтому активизация процессов происходит, как правило, в качественно иной форме. Существенные изменения в закономерности формирования процессов вносят техногенные факторы, вызывая зачастую развитие процессов, не типичных для данной геологической обстановки.



Методы третьей группы (физическое моделирование) позволяют материально воспроизводить реальные геологические системы и успешно применяются для прогноза тех процессов, исследование которых непосредственно в натуре затруднено. Так, например, моделирование широко используется при изучении напряженного состояния и оценке устойчивости массивов горных пород.

Типы выполняемых прогнозов определяются, в первую очередь, стадийностью инженерно-геологических изысканий, которые соответствуют стадиям проектирования, строительства и эксплуатации сооружений. На стадии схемы, когда определяются типы сооружений, районы их размещения, решаются вопросы рационального использования и защиты территории и народнохозяйственных объектов от опасных геологических процессов, используются сравнительно-геологические методы прогноза, дополняемые отдельными поверочными расчетами, а также вероятностно-статистические методы. На стадии проекта, когда выполняется детальное обоснование схем размещения отдельных сооружений и их узлов, применяются в большем объеме методы аналитические и моделирования.

Рассмотрение существующих методов изучения и прогноза геологических процессов показывает, что каждый из них имеет определенные ограничения или допущения, что связано с большой сложностью и многофакторностью развития изучаемых процессов. Основным методологическим принципом инженерно-геологического прогноза должно являться использование системного подхода, позволяющего прежде всего определить соотношение и последовательность использования методов прогноза. Так, на первом этапе прогнозирования необходимо определить типы и направленность развития процессов сравнительно-геологическими методами. Затем, привлекая методы физического моделирования и расчетные, выполняют приближенно количественные прогнозы, которые уточняются при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений.

### **СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Изучение геологических объектов как систем широко используется в настоящее время, однако вопросы классификации геологических систем, выбора системных параметров, специфики системного подхода к изучению геологических процессов решены далеко не однозначно.

Под системой Ю. В. Сачков понимает совокупность объектов (элементов), существенным образом связанных общностью поведения и функционирования в определенных классах взаимодействия. Один и тот же объект может входить в качестве элемента в состав различных систем, а одинаковые совокупности объектов, характеризующиеся разными внутренними связями, могут образовывать в разных условиях различные системы.

Таким образом, любой геологический объект может быть рас-

смотрен в качестве системы, состоящей из определенных элементов, которая рассматривается как целостная, в рамках поставленной задачи. В зависимости от связей между элементами системы выделяются: 1) эндосистемы, которые не могут быть разделены без потери своего специфического качества; 2) корпускулярные системы, допускающие разделение. Важным свойством системного метода является несводимость системы к сумме ее элементов, что означает различие законов функционирования системы и ее элементов. Системы характеризуются системными параметрами, которые выбираются сообразно конкретным задачам исследования.

Среди системных параметров объектов выделяются два уровня: низший — соответствующий изменению характеристик объекта от элемента к элементу, и высший — на котором параметры не определяют собой каждое конкретное явление, но являются относительно устойчивыми показателями развития массовых случайных явлений определенных классов.

Системные параметры низшего уровня характеризуют детерминированные системы, в которых функциональные связи устанавливаются конкретными методами исследований. Системные параметры высшего уровня характеризуют вероятностные системы, где, несмотря на вариации характеристик явлений, существует их упорядоченность, а относительное количество элементов с определенными значениями характеристик устойчиво.

Для всех систем характерны три аспекта их организации: структура — совокупность отношений между ее частями; функциональность — реакция на изменение внутренних и внешних условий, имеющая обратимый характер, в связи с восстановлением равновесия в среде; эволюционность — длительные необратимые изменения.

Применительно к изучению и прогнозу геологических и инженерно-геологических процессов могут рассматриваться системы: массив, массив — внешние природные воздействия и массив — природные и техногенные воздействия.

При рассмотрении пространственных соотношений между элементами массива системными параметрами являются атрибуты, определяющие его внутреннее строение и состояние (литология, трещиноватость, выветрелость и др.), т. е. структурные атрибуты. Взаимосвязи между элементами, а также между отдельными элементами и массивом характеризуются функциональными атрибутами, которые описывают ход внутрисистемных процессов, отражающих реакцию системы на внутренние и внешние воздействия (тектоническая напряженность, фильтрация, тепловые воздействия и др.). Процессы, вызывающие необратимые изменения в массивах, составляют группу эволюционных атрибутов.

Структурные и функциональные атрибуты характеризуют системы в условиях фиксированного времени (статические системы). Эволюционные атрибуты описывают динамические системы, к числу которых можно отнести также ретроспективные — логически созданные структуры и отношения, объясняющие ход геологических

процессов и последовательность формирования геологических тел. Изучение и прогноз геологических и инженерно-геологических процессов с позиций системного анализа предполагает построение серии моделей, отражающих конкретные системообразующие связи и воспроизводящих элементы структуры, функционирования и эволюции систем (табл. 23).

Т а б л и ц а 23

**Геологические системы и их модели**

Типы систем	Атрибуты системы	Модели систем
Статические	Структурные	Литолого-структурные, зон выветривания, морфогенетические
	Функциональные	Фильтрационные, напряженности, сейсмичности, теплофизические
Динамические	Эволюционные	Геологических процессов (прогнозные)
	Ретроспективные	Историко-генетические (реконструкционные)

Следует отметить, что по содержанию функциональные и эволюционные модели близки между собой. Основное отличие эволюционных моделей заключается в том, что они отражают изменение структуры массивов горных пород в результате действия геологических процессов. Системы массив — инженерные сооружения или природно-техногенные характеризуются атрибутами всех типов.

Важной особенностью природно-техногенных систем является способность их к регулированию. Можно выделить по этому признаку три типа систем: а) саморегулирующиеся — техническое воздействие в них полностью компенсируется возможностями самой системы (автомобильные дороги на пологих устойчивых склонах, некоторые водохранилища и пр.); б) регулирующие — когда необходимо выполнить комплекс мероприятий по устранению нежелательных последствий вмешательства человека (строительство на оползневых склонах, требующее установки подпорных стенок, либо дренажных устройств и др.); в) нерегулирующиеся, характеризующиеся необратимым процессом изменения системы (например, развитие осадок земной поверхности в местах длительных откачек подземных вод).

При изучении саморегулирующихся природно-техногенных систем не требуется составления новых моделей; для некоторых регулирующих систем необходимо составление новых моделей, учи-

творяющих изменения, вносимые инженерными сооружениями в геологическую среду (модели зон выветривания, морфогенетические, фильтрационные, напряженности и прогнозные); для нерегулирующихся систем новые модели составляются во всех случаях.

Системное изучение геологических и инженерно-геологических процессов необходимо начинать с выделения границ их развития и влияния на основе выявления внутренних устойчивых связей рассматриваемых параметров процесса. Можно воспользоваться понятием «определяющая область», по М. В. Рацу, которое в данном случае характеризует часть геологической среды, определяющей развитие и испытывающей влияние геологического или инженерно-геологического процесса. При изучении разных факторов развития процессов разными будут и размеры определяющих областей. Например, при оценке литологических факторов развития оползней определяющей областью оползневого процесса будет основной деформирующийся элемент массива пород. При изучении гидрогеологических условий оползневых явлений определяющая область охватывает зоны распространения водоносных горизонтов и водосодержащих разрывов (рис. 30).

Выделение определяющих областей развития процессов является сложной и ответственной задачей, так как именно в их пределах строятся модели геологических и природно-техногенных систем, проектируются мероприятия по защите сооружений и геологической среды.

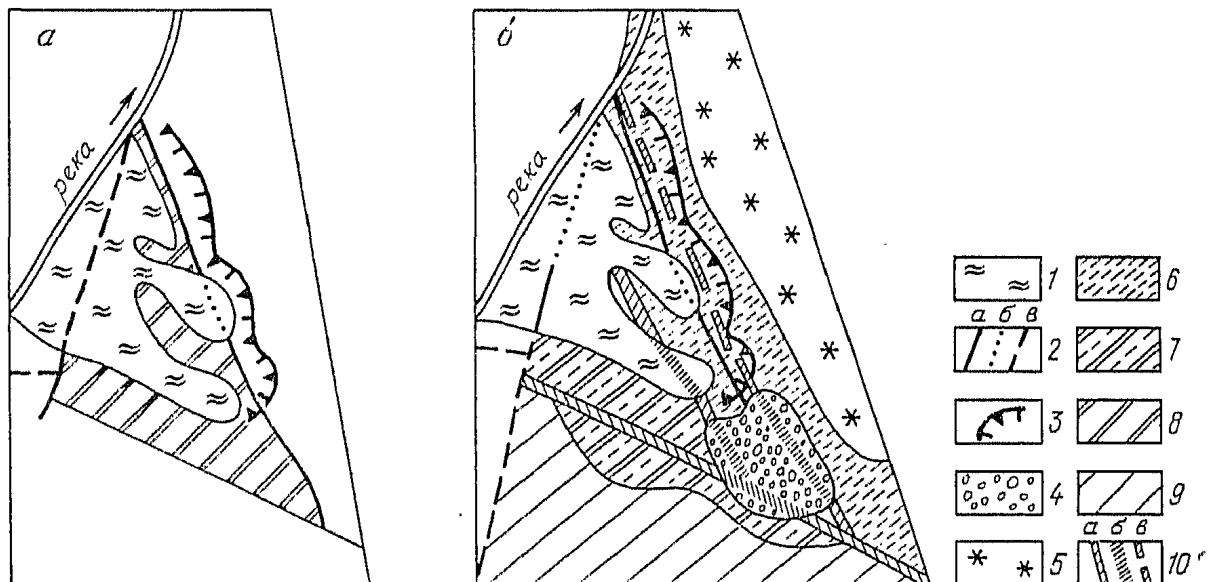


РИС. 30. Определяющие области оползневого процесса в долине р. Черек Балкарский (Северный Кавказ) при оценке литологического фактора (а) и гидрогеологического (б).

1 — среднечетвертичные — современные оползневые накопления; 2 — тектонические разрывы (а — достоверные, б — погребенные, в — предполагаемые); 3 — бровки оползневых цирков. Водоносные горизонты: 4 — поровых вод в верхнечетвертичных моренных отложениях; 5 — трещинно-карстовых вод в верхнеюрских известняках; 6 — трещинных вод в среднеюрских алевролитах и песчаниках; 7 — трещинно-пластовых вод в нижнеюрских песчаниках; 8 — нижне-среднеюрские песчаники и алевролиты; 9 — трещинных вод в палеозойских гранитах; 10 — водосодержащие разрывы (а — достоверные, б — погребенные, в — предполагаемые)

Построение моделей геологических и природно-техногенных систем выполняется по какому-либо одному параметру или по их комплексу. Комплексность использования характеристик систем ограничивается требованиями целостности систем в рассматриваемом аспекте. Это значит, что одновременный учет всех возможных признаков и параметров системы в одной модели лишает исследование системности и приводит к нагромождению различных физических соотношений и зависимостей. В связи с этим при моделировании геологических процессов используется принцип избирательного подобия модели и объекта, предполагающий использование ограниченного числа критериев подобия, характеризующих прогнозируемые величины.

Критерии подобия или комбинации величин, отражающие связи между существенными характеристиками явления, выбираются двумя способами: анализом размерности изучаемых величин или теоретическим анализом процессов.

Методы вывода критериев геологического подобия подробно описаны в работе Л. Б. Розовского [36]. Основные операции, выполняемые при анализе размерности, сводятся к следующему: 1) составление структурной схемы процесса; 2) нахождение величин, количественно представляющих инварианты и коварианты первого порядка; 3) составление в общем виде уравнения связи прогнозируемой величины и остальных инвариант и ковариант в виде степенного одночлена; 4) анализ размерности.

В результате выполняемых операций получают безразмерные коэффициенты, которые являются критериями геологического подобия. Вывод критериев геологического подобия на основе теоретических представлений о процессах выполняется: 1) комбинированием показателей основных факторов процесса в безразмерные комплексы с последующим анализом размерностей; 2) анализом дифференциальных уравнений, описывающих процесс.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Построение моделей, отражающих наиболее существенные связи факторов развития геологических процессов, позволяет прогнозировать их различные характеристики: место возникновения, генетические типы, объемы, последовательность развития и т. п. Структурные модели дают представление о распределении свойств пород в пределах определяющей области развития геологического процесса. Простейшим видом структурной модели является представление массива в виде однородной среды. Структурные детерминированные модели делятся на кусочно-однородные, в которых задаются границы между однородными элементами массива и свойства каждого элемента, и градиентные, в которых свойства пород задаются как непрерывные функции координат. Обычно при задании свойств пород в виде непрерывных функций вид их до-

вольно сложен и удобнее пользоваться статистическими моделями неоднородных массивов.

На литолого-структурных моделях отражают особенности состава и свойств пород, взаимоотношение слоистости, трещиноватости и разрывов. Разнообразие литолого-структурных моделей массивов определяется вариациями их системных параметров (углов склонов, наклоном слоев пород, количеством и мощностью слабых прослоев, типом и густотой трещиноватости и разрывов и т. п.). Примером структурной кусочно-однородной модели массива горных пород может служить модель основания Ингури ГЭС, составленная С. Б. Кереселидзе (рис. 31).

Морфогенетические модели содержат информацию о строении и генезисе элементов рельефа. При построении морфогенетических моделей составляются карты крутизны рельефа, причем градации крутизны в градусах выбираются в соответствии с наиболее типичными формами эрозионного и аккумулятивного рельефа. Участки рельефа одинакового генезиса и крутизны обособляются в морфогенетические элементы территории. Прогнозное значение морфогенетических моделей заключается в определении места развития прогнозируемого процесса.

Модели зон разгрузки и выветривания строятся на основе литолого-структурных и морфогенетических моделей. В зависимости от сочетания типа массива, истории развития рельефа и современной стадии активности геологических процессов могут рассматриваться несколько типов моделей, различающихся соотношением зон разгрузки и выветривания по мощности и строению, профилем коры выветривания, наличием линейных зон выветривания и т. п. Модели зон разгрузки и выветривания дают возможность прогнозировать генетические типы и объемы геологических явлений.

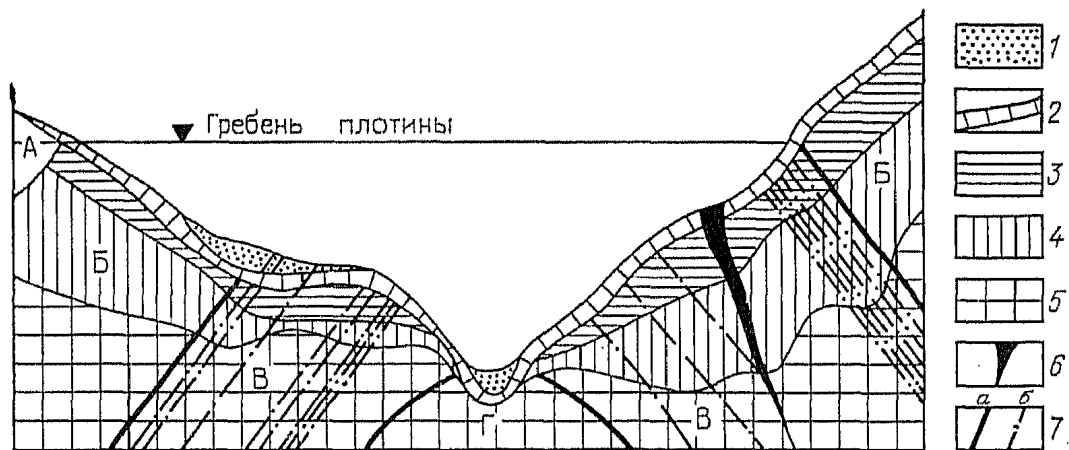


РИС. 31. Структурная модель одного из створов Ингури ГЭС. По С. Б. Кереселидзе.

1 — аллювиальные отложения; зоны: 2 — интенсивного выветривания и разгрузки ( $E_{\text{деф}} = 5-10 \cdot 10^2$  МПа), 3 — интенсивной разгрузки ( $E_{\text{деф}} = 20-40 \cdot 10^2$  МПа), 4 — слабой разгрузки ( $E_{\text{деф}} = 40-130 \cdot 10^2$  МПа), 5 — сохранных пород ( $E_{\text{деф}} = 130-160 \cdot 10^2$  МПа), 6 — тектонический разрыв; 7 — тектонические трещины (а — шириной 20 см, б — менее 20 см); А, Б, В, Г — литологические пачки известняков

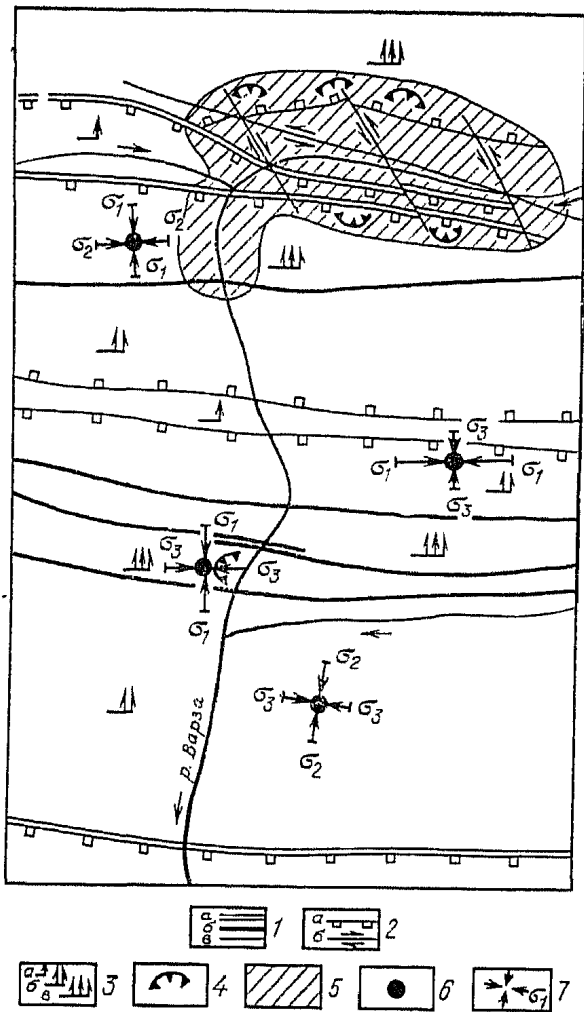
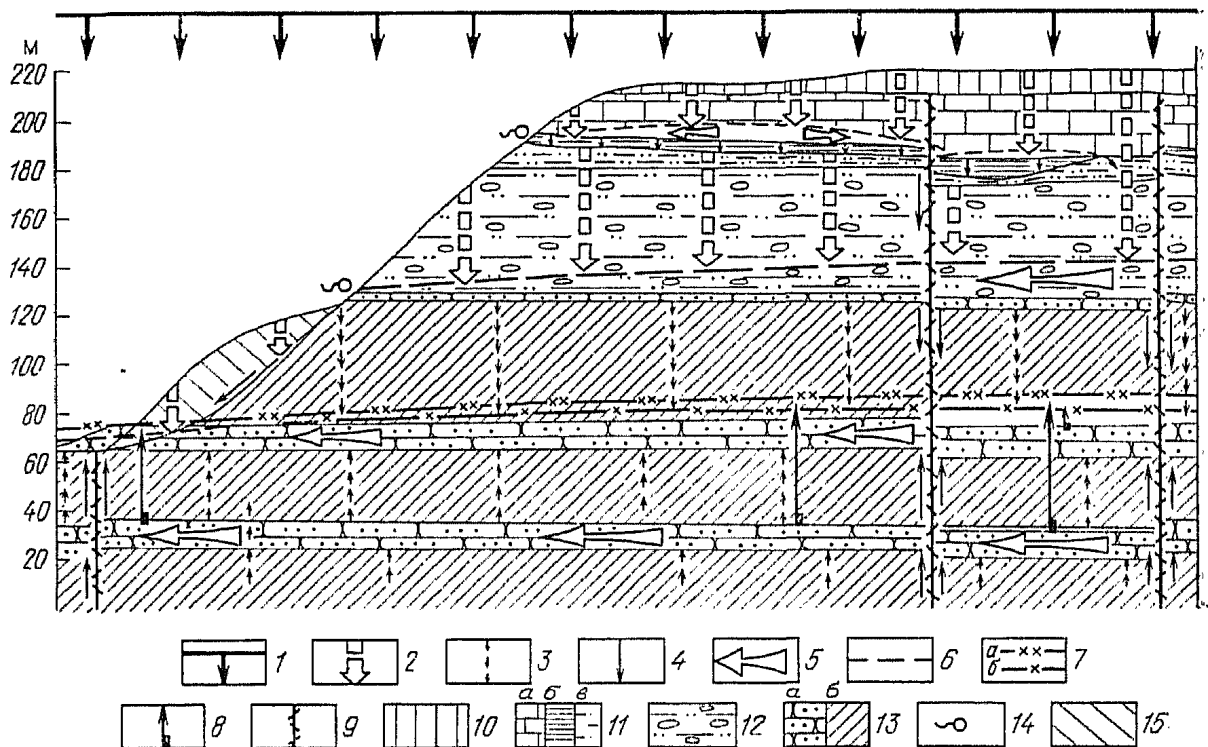


РИС. 32. Модель напряженности пород в долине р. Варзоб (Таджикистан).

1 — активные тектонические разрывы: а — межзональные, б — внутризональные, в — межблоковые; 2 — типы современных деформаций по разрывам: а — взбросо-надвиговые, б — взбросо-сдвиговые; 3 — интенсивность современных поднятий: а — малая, б — средняя, в — высокая; 4 — крупные оползни; 5 — неустойчивые части склонов; 6 — участки измерения напряжений методом разгрузки; 7 — направления действия главных напряжений (порядок величин напряжений показан длиной векторов) на участках их измерения

РИС. 33. Фильтрационная модель массива склона на участке Днистровской ГАЭС. По М. В. Лехову.

1 — атмосферные осадки; 2 — инфильтрация на свободную поверхность потока; 3 — перетекание через слабопроницаемые породы; 4 — сосредоточенная фильтрация; 5 — направление потока вод; 6 — свободная поверхность потока; 7 — пьезометрические поверхности верхнего (а) и нижнего (б) водоносных горизонтов; 8 — высота напора подземных вод; 9 — разлом; 10 — четвертичные лёссовидные супеси и суглинки; 11 — неогеновые отложения (а — известняки, б — глины, в — суглинки); 12 — меловые отложения (пески, трепелы, кремниевые); 13 — протерозойские отложения (а — песчаники, б — аргиллиты, алевролиты); 14 — родники; 15 — оползневые накопления



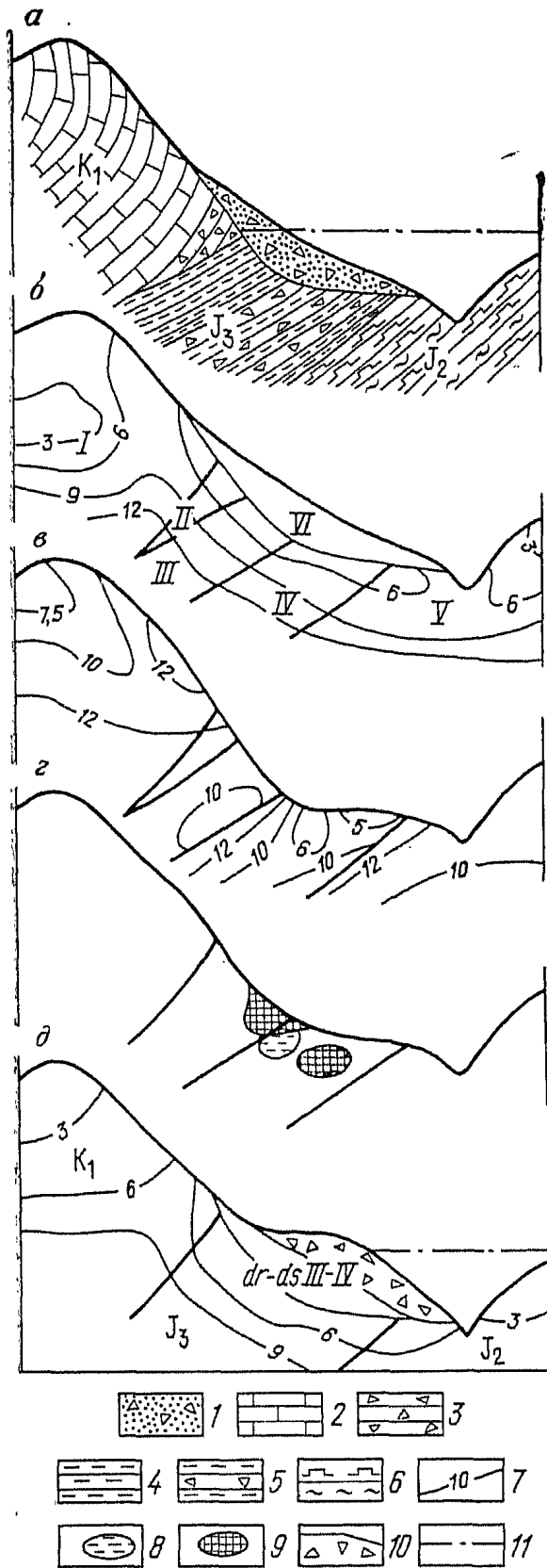


РИС. 34. Оценка устойчивости склонов долины р. Ингури методом моделирования.

Модели: а — литолого-структурная, б—в — до и после размыва склоновых накопленний, г — прогнозная, д — функциональная с учетом работы водохранилища и берегоукрепительных мероприятий. 1 — четвертичные  $dr-ds$  III—IV обвально-осыпные и пролювиальные отложения (слой VI:  $\rho=2,0$  г/см<sup>3</sup>;  $\phi=17-28^\circ$ ;  $C=0,01-0,04$  МПа); 2 — меловые  $K_1$  известняки (слой I:  $\rho=2,6$  г/см<sup>3</sup>,  $E=10$  МПа); 3 — верхнеюрские J гипсы бурые с тонкими прослоями глин (слой II:  $\rho=2,2$  г/см<sup>3</sup>;  $E=5-10$  МПа); 4 — верхнеюрские  $J_3$  глины бордовые, плотные, с тонкими прослоями гипсов (слой III:  $\rho=2,0$  г/см<sup>3</sup>;  $E=50$  МПа); 5 — верхнеюрские  $J_3$  гипсы белые и розовые, массивные, переслаивающиеся с глинами буро-красными (слой IV:  $\rho=2,1$  г/см<sup>3</sup>;  $E=125$  МПа); 6 — среднеюрские  $J_2$  туфопесчаники, туфобрекчин, алевролиты (слой V:  $\rho=2,8$  г/см<sup>3</sup>,  $E=2,9 \cdot 10^4$  МПа); 7 — изолинии максимальных касательных напряжений МПа; 8—9 — участки массива, где максимальные касательные напряжения: 8 — близки к значениям прочности пород (зоны предельного равновесия), 9 — превышают прочность пород (зоны неустойчивости); 10 — контур берегов укрепительного контрбанкета; 11 — уровень водохранилища

Принципы составления функциональных моделей разработаны слабо из-за отсутствия четких критериев оценки действия гидродинамических, температурных и силовых полей в различных литолого-структурных условиях. Однако имеющиеся примеры изучения эволюционных моделей, например, моделей напряженного состояния и фильтрационных, свидетельствуют об их большом значении



в выполнении прогноза геологических процессов. Так, модель напряженности пород в долине р. Варзоб (рис. 32), находящейся на южном склоне Гиссарского хребта (Таджикистан), составлена по результатам анализа тектонических структур, изучения полей напряжений по бороздам скольжения, на плоскостях трещин и определения напряжений методом разгрузки. Для изученной территории характерно наличие активных блоковых движений, в результате которых граниты, известняки и сланцы находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии: ориентировка эллипсоида напряжений в разных тектонических блоках различная. На участках изменения направлений действия главных напряжений, как правило, развиты крупные оползни, а склоны находятся в неустойчивом состоянии.

Фильтрационная модель массива терригенно-карбонатных пород на участке Днестровской ГАЭС (рис. 33), показывая пути питания, движения и разгрузки подземных вод, дает возможность оценить взвешивающее давление воды на присклоновые части массива, что необходимо для создания расчетной схемы устойчивости склона и прогноза оползней.

На прогнозных моделях воспроизводится развитие какого-либо геологического или инженерно-геологического процесса, например, моделирование процессов выветривания, карста, оползания на эквивалентных материалах, однако чаще всего составляется серия моделей, отражающих различные стадии процесса или, другими словами, динамическая модель заменяется несколькими статическими на разные этапы времени развития процесса. Примером может служить оценка современной устойчивости склона долины р. Ингури в западной части Грузии и прогноз ее изменения после создания водохранилища путем составления нескольких моделей (рис. 34). На литолого-структурной модели массива склона показаны литолого-стратиграфические комплексы пород и условия их залегания. Модели напряженности отображают распределение максимальных касательных напряжений в породах массива, физико-механические характеристики которых выбраны с учетом расчленения массива на литолого-структурные элементы (рис. 34, а, б, в). Прогнозная модель характеризует формирование в массиве зон вероятного разрушения, выделяемых по соотношению касательных напряжений и прочности пород (рис. 34, г). Функциональная модель отражает поле напряжений в массиве после создания водохранилища и контрбанкета, укрепляющего склон (рис. 34, д).

Ретроспективные модели имеют большое значение для прогноза геологических процессов, так как при их составлении анализируется обстановка развития процессов в прошлом и устанавливается связь между ведущими факторами и параметрами процесса.

Таким образом, применение системного подхода при прогнозе инженерно-геологических процессов имеет важное методологическое значение, заключающееся в единстве и последовательности структурного, функционального, эволюционного и ретроспективного уровней исследований. Рассмотрение инженерно-геологических объ-

ектов на разных уровнях требует их представления в виде систем по параметрическим свойствам, выбор которых определяется задачами исследований. Системный анализ предполагает построение моделей, отражающих в специализированном виде структуру и функционирование объекта.

Изучение массивов горных пород, являющихся сложными динамическими системами, целесообразно проводить путем составления нескольких специализированных моделей, последовательно воспроизводящих ход геологических процессов и взаимодействие геологической среды с инженерным сооружением.

## ЧАСТЬ III.

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

---

## ГЛАВА 19.

### ФАКТОРЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

#### РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ЗОНАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Важнейшими теоретическими и практическими задачами региональной инженерной геологии — одного из самых молодых научных направлений — являются: изучение закономерностей формирования инженерно-геологических условий различных структурных зон земной коры; установление закономерностей пространственного распределения территорий, характеризующихся определенными инженерно-геологическими обстановками; изучение пространственно-временной изменчивости инженерно-геологических условий в пределах крупных структурных элементов земной коры; разработка теории и методов регионального инженерно-геологического изучения территорий, в частности, инженерно-геологического картирования, методов количественной оценки сложности инженерно-геологических условий и способов их типизации, теоретических и методических положений регионального инженерно-геологического прогнозирования; составление инженерно-геологических описаний крупных регионов страны с целью разработки научно обоснованных рекомендаций по рациональному народнохозяйственному освоению территории и разработке геологических основ охраны и преобразования окружающей среды.

Задача изучения закономерностей формирования инженерно-геологических условий территории не случайно поставлена на одно из первых мест. Решение ее дает ключ к пониманию современных особенностей инженерно-геологической обстановки любой территории, позволяет методически обоснованно решать прогностические задачи, учитывая наряду с накладываемыми на эту обстановку антропогенными воздействиями и общие закономерности природной тенденции развития района.

Формирование инженерно-геологических условий — процесс длительный и сложный, определяющийся комплексом природных геологических факторов, которые формируются под влиянием различных причин. Наиболее важные среди этих факторов — геологическое строение местности, характер слагающих ее пород (состав, состояние, свойства и др.), рельеф, мерзлотно-гидрогеологические особенности. Формирование и современное проявление этих факторов определяются, с одной стороны, всем ходом геологического раз-

вития территории, а с другой — ее современными климатическими условиями, т. е. теплообеспеченностью и увлажненностью территории и их соотношением. Первые — геологические особенности территории, история их формирования — выделяются как региональные геологические, вторые — как зональные факторы формирования инженерно-геологических условий. Совместное влияние этих факторов определяет формирование инженерно-геологических условий любого региона, любого участка.

Поэтому инженерно-геологические условия следует рассматривать как сложную, многофакторную, изменяющуюся во времени систему, современное состояние которой определяется как геолого-структурными, так и современными климатическими особенностями территории. Геолого-структурные условия, особенности геологического развития — ведущие факторы формирования инженерно-геологических условий любой территории. Именно они определяют такие важные показатели, как состав, строение, степень литификации или метаморфизации пород, условия их залегания и распространения, гидрогеологическую структуру территории, особенности мега-, а часто мезорельефа, а также во многом и характер современных геологических процессов, изменяющих рельеф. Современный климат оказывает существенное влияние на современное состояние пород (зависящее главным образом от фазового состояния влаги и ее количества в них), характер и интенсивность экзогенных геологических процессов, создаваемые им явления и гидрогеологические особенности верхней части разреза территории.

Следует подчеркнуть, что формирование инженерно-геологических условий на всех этапах развития происходило под влиянием как региональных геологических, так и зональных факторов. «Результаты действия этих факторов в геологическом прошлом запечатлены в геологическом строении и характере пород и в различных следах действия геологических процессов (карст, тектоническая нарушенность пород и др.). Чем более удалено в геологическое прошлое время формирования того или иного элемента геологической среды, тем менее сохранилось влияние на него зональных географических факторов и их инженерно-геологическое значение. Влияние зональных факторов больше сказывается на формировании геологической среды на современном этапе геологического развития земной коры и на современных процессах. Но и на современном геологическом этапе результаты влияния зональных факторов на формирование инженерно-геологических условий в существенной мере определяются характером создавшегося в предшествующее время геологического строения территории и действующих синхронно тектонических процессов. Даже влияние таких резко зонально выраженных факторов, как процессы, связанные с мерзлотой, режим грунтовых вод и другие, зависят от характера пород, образованных когда-то в предшествующее геологическое время» [17].

Однако не следует думать, что роль зональных факторов в формировании инженерно-геологических условий является второсте-

пенной. Это глобальный, очень мощный фактор. Именно неодинаковый приток тепла и влаги обуславливает формирование неодинаковых компонентов и всей инженерно-геологической обстановки в различных частях одного и того же крупного геолого-структурного элемента земной коры, широтной и высотной зональности инженерно-геологических условий континентов и Земли в целом [13, 40].

Все факторы современных инженерно-геологических условий, как и факторы их формирования, И. В. Попов подразделил на две группы. В первую он объединил факторы, которые прямо или косвенно зависят и управляются ходом тектонического развития земной коры и ее современной тектонической жизни. Они получили название региональные геологические факторы инженерно-геологических условий. Ко второй группе И. В. Поповым были отнесены факторы, которые прямо или косвенно зависят от климатических условий, т. е. зональные факторы инженерно-геологических условий. По-видимому, их следует назвать, как отмечает В. Т. Трофимов, зонально-геологическими или зональными геологическими факторами инженерно-геологических условий, поскольку, с одной стороны, они отличаются зональным характером пространственного изменения, а с другой — являются геологическими по существу. Их развитие, комплекс и особенности определяются совместным влиянием современных климатических условий и геологического строения территории.

Поскольку инженерно-геологические условия создаются естественным для данного времени сочетанием региональных и зональных геологических факторов, то вполне очевидна необходимость изучения причинных закономерностей формирования, пространственного распределения и современных тенденций развития каждой из вышеназванных групп факторов. Только на основе этого можно определить основные закономерности пространственного изменения инженерно-геологических условий любого региона и в дальнейшем использовать их при оценке сложности инженерно-геологических условий, создании схемы инженерно-геологического районирования как основы для разработки региональных норм и технических указаний на изыскания, строительных норм и правил, разработки региональных прогнозов возможных изменений условий в процессе освоения территории, разработки рациональных путей и геологических основ охраны природы.

### **РОЛЬ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

Геолого-структурные факторы формирования инженерно-геологических условий объединяют такие характеристики геологического строения земной коры: состав и возраст горных пород, условия их залегания, пространственное положение и строение тектонических элементов, морфологию геологических структур, историю геологического развития региона (в том числе и на новейшем этапе). Они

контролируют распределение в земной коре горных пород определенного состава, строения и свойств, строение рельефа, формирование гидрогеологических структур, характер и интенсивность проявления геологических процессов, т. е. формируют компоненты геологической среды. Определяющее значение геолого-структурных факторов в формировании инженерно-геологического облика территории наиболее отчетливо выступает при сравнении инженерно-геологических условий главнейших тектонических элементов земной коры. Для каждого из них характерны типичный набор геологических формаций и формациеобразующих пород, специфика постгенетических изменений этих пород, геологическая структура, определяющая условия залегания, характер и степень нарушения горных пород, определенные гидрогеологические особенности, современные геологические процессы и явления.

Совершенно различны инженерно-геологические условия щитов и структур чехла древних платформ и молодых плит, межгорных прогибов, впадин и складчатых структур. Структуры фундамента (а также часто срединных массивов складчатых областей, представлены магматическими и метаморфическими формациями) прочность пород которых в ненарушенном состоянии заведомо превышает нагрузки от любого типа инженерного сооружения. Главными причинами снижения прочности массивов этих пород, увеличения их деформируемости, снижения устойчивости по отношению к экзогенному воздействию являются тектоническая раздробленность, трещиноватость и выветрелость.

Эти же факторы определяют неоднородность и анизотропность скальных массивов щитов. Широко развиты разрывные нарушения. Для каждой конкретной структуры характерны свои достаточно строго ориентированные системы протяженных тектонических разломов и сопровождающих их зон повышено трещиноватых пород шириной от нескольких десятков метров до нескольких километров. Сочетание линейных зон тектонических нарушений и ограниченных ими сохранных массивов обуславливает блочное строение этих тектонических структур. Все важнейшие инженерно-геологические параметры в пределах сохранных блоков и линейных нарушенных зон существенно различны. Зоны тектонических нарушений оказывают на физико-механические свойства массивов не только прямое, но и косвенное влияние, что значительно сказывается на ухудшении прочностных и деформационных свойств пород и является путями наиболее глубокого проникновения в них агентов выветривания. Линейные зоны выветривания, формирующиеся по тектоническим нарушениям и часто имеющие мощность более 100 м, существенно увеличивают неоднородность свойств массивов.

Тектонические разрывные нарушения определяют специфику и других компонентов инженерно-геологических условий щитов. Зоны разломов являются основными путями движения подземных вод, как правило, они аномально обводнены по сравнению с сохранными блоками. К зонам разломов приурочены наиболее мощные

осыпи, оползни и обвалы. В области развития многолетней мерзлоты мощность последней в зонах разломов значительно сокращается по сравнению с фоновой, и нередко мерзлые породы вообще отсутствуют. Наконец, они являются главным фактором, формирующим внутреннюю структуру поля напряжений в массивах. С их положением в структуре массива и по отношению к различным подземным сооружениям связаны такие явления, как вывалы, стрельание горных пород и горные удары.

Конечно, каждый материковый щит (как и каждый срединный массив) пережил долгую, сложную индивидуальную геологическую историю, особенности которой не могли не сказаться на их современных инженерно-геологических характеристиках. Так, на Балтийском щите отсутствуют площадные коры выветривания, уничтоженные ледниковой экзарацией; непосредственно с поверхности породы имеют свежий облик, мощность ледниковых отложений, перекрывающих скальные породы, невелика. На Украинском щите площадные коры выветривания сохранились, мощность их нередко превышает десятки метров. Чехол осадочных отложений более разнообразен как по набору формаций, так и по мощности. Все это важно учитывать при региональных инженерно-геологических исследованиях. Подобные особенности каждой конкретной структуры учитывались при инженерно-геологическом районировании территории СССР.

Отмеченные инженерно-геологические черты щитов характерны для тектонических структур этого класса во всем мире (для Балтийского, Украинского, Алданского, Анабарского на территории СССР, для Аравийского и других щитов Африкано-Аравийской древней платформы, для Канадского щита Северо-Американской докембрийской платформы и др.), т. е. являются для них типологическими.

Не менее определенный набор инженерно-геологических характеристик присущ и структурам чехла древних платформ. Каждая из таких структур (антеклизы, синеклизы и т. д.) характеризуется определенным формационным разрезом, имеет гидрогеологические особенности, важные для оценки обводненности территории, строительных выемок, горных разработок, такие, как гидрогеологическая структура, условия формирования, движения и разгрузки подземных вод, обильность водоносных горизонтов и комплексов, условия их взаимосвязи, агрессивность вод по отношению к бетону и др.

В чехле древних платформ можно встретить все литологические типы осадочных формаций, в различной степени литифицированных. В геологическом строении верхних горизонтов положительных структурных форм преобладают палеозойские отложения, представленные упрочненными разностями пород: плотными аргиллитоподобными глинами, алевролитами, песчаниками. Отрицательные геологические структуры сложены, как правило, менее прочными, умеренно литифицированными песчано-глинистыми отложениями верхних структурных этажей. И те и другие можно рас-

смаатривать, с учетом прочностных и деформационных свойств, как удовлетворительное основание для большинства наземных инженерных сооружений. Значительно более сложно их поведение на склонах и в откосах. Чередование в разрезе песчаных и глинистых пород, водопроницаемых и водоупорных пластов способствует возникновению оползней, широко известных в пермских, юрских, меловых и палеогеновых отложениях Русской платформы, в каменноугольных, юрских и меловых образованиях бассейнов Енисея, Ангары, Лены и других рек Сибирской платформы.

В геологическом разрезе чехла древних платформ широко распространены карбонатные формации и развит карбонатный карст. Достаточно напомнить, что карбонатные породы слагают обширные пространства Приенисейского и Прибайкальского регионов, погруженных склонов Алданского и Анабарского щитов на Сибирской платформе. Карбонатные разрезы характерны также и для отложений ордовика и силура, девона и карбона, перми и верхнего мела Русской платформы.

Многие геологические структуры чехла развивались в кайнозое, что предопределило основные морфоструктурные особенности современного рельефа, расположение переуглубленных долин, выполненных аллювиальными осадками большой мощности, закономерности развития четвертичного карста, оползней, оврагов и других экзогенных процессов.

Многослойное строение осадочного чехла определяет особенности гидрогеологической структуры: характерны сложно построенные водоносные комплексы и горизонты, часто взаимосвязанные. Разгрузка этих вод в строительные и горные выработки приводит к прорывам пльвунов, карстово-суффозионным провалам, деформациям откосов.

Существенно иные инженерно-геологические характеристики имеют эпипалеозойские плиты, такие, как Западно-Сибирская, Туранская, Скифская. Верхнюю часть их геологического разреза слагают терригенные кайнозойские отложения большой мощности (свыше 100 м). Велика мощность и континентальных четвертичных слаболитифицированных отложений, составляющая десятки метров. По существу все наземные сооружения возводятся на песчано-глинистых толщах этого возраста. Пески обладают высокой пористостью, глины пластичные, сжимаемые и сильно сжимаемые, набухающие, что ограничивает допускаемые на них нагрузки. Все эпипалеозойские плиты на территории СССР имеют равнинный, плоский рельеф, благодаря которому особенно четко проявляется зональность в строении ландшафтов, условиях формирования, режиме и свойствах грунтовых вод. Наиболее характерные инженерно-геологические процессы — выпор пород в основании строительных котлованов и карьеров в результате набухания и разгрузки глин, суффозия, оплывание и оползни в бортах, неравномерные осадки основания.

Определенные инженерно-геологические особенности имеют и структуры краевых зон платформ. Главной из них является фор-



мационное строение разрезов. Как известно, в строении большинства передовых прогибов (Предуральяского, Предкарпатского, Приенисейского и др.) велика роль пород гипсово-доломитовых и каустобиолитовых формаций, интенсивно закарстованных и требующих специального исследования при освоении этих регионов.

Особенно видна роль геолого-структурных факторов при сравнении инженерно-геологических условий складчатых систем, межгорных прогибов и впадин в горно-складчатых областях, например в Забайкалье, Алтае-Саянской области, в горных сооружениях Средней Азии. Для складчатых сооружений в общем случае типично широкое распространение всех трех генетических групп формаций: осадочных, магматических и метаморфических, сложная дислоцированность, как пликативного, так и дизъюнктивного типа, весьма большая изменчивость разрезов, в том числе существенно различное строение разновозрастных отложений в разных структурно-фациальных зонах, высокая степень литогенетических преобразований.

Региональные закономерности изменения степени метаморфизма и дислоцированности пород определяются геологической историей каждой складчатой области. В сложно построенных синклинических и антиклинических сооружениях осадочные породы принадлежат геосинклинальным формациям, в разной степени метаморфизованным. Вместе с тем в пределах этих сооружений можно выделить несколько структурных этажей, каждый из которых сложен определенным набором формаций, претерпевших различные метаморфизм и складчатость, а также характеризующихся различной региональной трещиноватостью и другими инженерно-геологическими особенностями.

Ядра антиклиниорий, срединные массивы часто сложены наиболее сильно метаморфизованными породами (гнейсы, кристаллические сланцы) и по своим инженерно-геологическим свойствам близки к массивам платформенных щитов. Синклинии выполнены породами верхних структурных этажей, менее метаморфизованными (филлиты, метаморфизованные песчаники, известняки). Однако все породы имеют высокую прочность и ничтожную деформируемость. Показатели физико-механических свойств пород определенного состава и возраста (песчаники, глины, алевролиты и др.) в складчатых областях значительно выше, чем пород того же литологического типа и возраста на платформах.

Главными факторами, снижающими инженерно-геологические свойства массивов, являются выветрелость пород и их трещиноватость; существенное влияние оказывает и напряженное состояние массивов. В складчатых областях и на новейшем этапе сохраняется мобильность структур, определившая высокую энергию горного рельефа, интенсивное развитие склоновых процессов, повышенную сейсмичность. Естественно, каждая горно-складчатая область имеет и индивидуальные инженерно-геологические характеристики. В геологических разрезах Забайкалья роль карбонатных отложений ничтожна, а в пределах мегантиклинория Большого

Кавказа такие породы являются определяющими. Даже в пределах одной горно-складчатой системы инженерно-геологические условия складчатых структур могут существенно отличаться, как, например, они различаются в Саяно-Алтайской области в пределах мегантиклинориев Восточного Саяна и Кузнецкого Алатау, где широко развиты карбонатные формации и высока закарстованность массивов, и Западного Саяна, в геологическом строении которого преобладают терригенные метаморфизованные породы. Именно при сравнении различных горно-складчатых сооружений роль типологических и индивидуальных характеристик менее всего проанализирована в региональной инженерной геологии. На современном этапе типологическое инженерно-геологическое районирование складчатых областей проводится, как известно, по возрасту складчатости [17]. Достоинства и недостатки такого подхода мы еще рассмотрим. Здесь же подчеркнем, что как по набору типологических признаков, так и по индивидуальным характеристикам наложенные межгорные впадины и прогибы представляют собой совершенно особый тип инженерно-геологических регионов. Они отличаются от сопряженных складчатых сооружений строением разреза, условиями залегания пород, закономерностями обводненности, изменчивости состава, строения и свойств пород. Как правило, межгорные прогибы и впадины выполнены породами самых молодых для данного тектонического региона структурных этажей. Преобладают терригенные формации, реже встречаются терригенно-карбонатные. Известны также впадины, выполненные вулканогенными толщами. Породы не метаморфизованы, но могут находиться на различных стадиях литогенеза и в зависимости от этого могут быть представлены как прочносцементированными разностями (песчаники, алевролиты мезозойских впадин Забайкалья, Минусинского прогиба и т. д.), так и слабоуплотненными, даже лёссовыми грунтами (пески, галечники и лёссы кайнозойских впадин горно-складчатых сооружений Средней Азии). Однако важно отметить некоторые общие черты, характерные для инженерно-геологического облика межгорных впадин. Эти черты обусловлены их геологической структурой и особенностями осадконакопления. Для всех впадин типично присутствие в разрезе молассовых или молассоподобных формаций. Осадконакопление происходило в замкнутых или полужамкнутых бассейнах, поэтому даже в тех случаях, когда соленосные толщи не образовывались, породы характеризовались загипсованностью, повышенной засоленностью. Замкнутый характер водоемов, часто близкая к изометричной форма обусловили дифференциацию отложений: от периферии впадин к центральным частям увеличивается дисперсность обломочных пород, континентальные и прибрежные фации сменяются более глубоководными. Очевидно, эти направления являются главными направлениями изменчивости свойств грунтов. Закономерно в тех же направлениях изменяются водопроницаемость, химический состав подземных вод, их гидравлические градиенты.

Большое инженерно-геологическое значение имеют геологиче-

ская структура и характер сопряжения межгорных впадин и горных сооружений. Очень часто межгорные впадины представляют собой грабен-синклинали и ограничены разрывными нарушениями, живущими и в новейшее время. В этих случаях активные разломы играют роль своеобразных экранов, контрастно разделяющих инженерно-геологические условия впадин и горных сооружений по всем компонентам: рельефу, гидрогеологическим и мерзлотным условиям, современным процессам. В других случаях древние тектонические впадины (палеозойские, мезозойские) оказались вовлеченными в новейшее горообразование, что привело к более постепенной смене орографических, гидрогеологических, экзодинамических характеристик горных сооружений на характеристики впадины. Однако во всех случаях периферийные части впадин сложены более грубыми породами, представляют собой области транзита и разгрузки подземных вод, т. е. более обводнены. На участках развития многолетнемерзлых пород области транзита и разгрузки характеризуются аномально низкими мощностями.

Таковы самые общие инженерно-геологические особенности некоторых главнейших типов тектонических структур, подтверждающие важную роль геолого-структурных факторов в формировании инженерно-геологических условий территории. В заключение приведем лишь один конкретный пример, иллюстрирующий этот вывод. Как известно, свыше 47 % территории СССР занято многолетнемерзлыми породами, и мерзлотные условия являются важнейшим показателем при инженерно-геологической оценке этих районов. Распространение многолетнемерзлых пород, их мощность и температура подчиняются широтной зональности. Инженерно-геологические свойства при промерзании и оттаивании наиболее резко изменяются у дисперсных грунтов. Имеются публикации, подтверждающие, что мощность многолетней мерзлоты зависит не только от условий теплообмена на поверхности земли, но и от теплопотоков, обусловленных движением подземных вод или поступлением тепла из земных недр. На рис. 35 приведен разрез, подтверждающий, что тектонические структуры часто оказывают большое влияние на формирование вечной мерзлоты. Геологический разрез на широте г. Норильска пересекает три крупнейших тектонических элемента: восточную окраину Западно-Сибирской плиты, Хантайско-Рыбинские поднятия краевой зоны Сибирской платформы и Тунгусскую синеклизу той же платформы. По данным Л. М. Демидюк, установлено, что нижняя граница вечной мерзлоты отражает особенности геологических структур по линии профиля. На фоне мощной мерзлоты Западной Сибири и Тунгусской синеклизы (больше 400 м) выделяется аномальная зона Хантайско-Рыбинских поднятий, сложенная карбонатными породами палеозоя, в пределах которой мощность мерзлоты сокращается до 50—20 м, в зонах разломов мерзлота вообще отсутствует. Подобные аномалии могут быть сформированы только благодаря отепляющему влиянию подземных вод, разгрузка которых происходит в антиклинальных структурах. Подземные воды имеют здесь восходящий

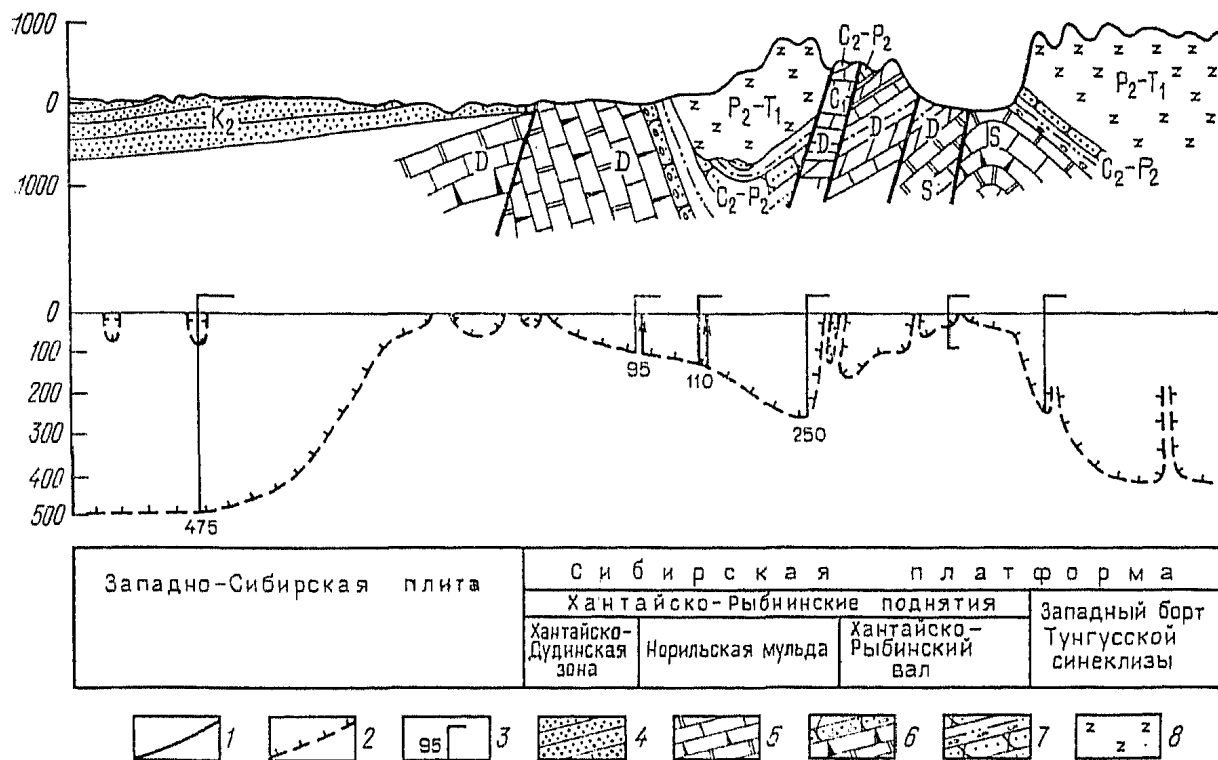


РИС. 35. Схематический геологический разрез и мощность мерзлоты на широте г. Норильска. По Г. А. Голодковской, Л. М. Демидюк.

1 — тектонические нарушения; 2 — нижняя граница многолетней мерзлоты; 3 — разведочные скважины; 4 — верхнемеловые песчано-глинистые отложения; 5 — каменноугольно-пермские песчано-глинистые отложения; 8 — пермо-триасовые базальты

характер (гидростатические напоры превышают уровень земли на 10—20 м). Тепловой поток снизу из-за высокой трещиноватости карбонатных пород очень велик. Еще более возрастает отопляющее действие восходящих теплопотоков по зонам разломов, где их величина превышает фоновую на 1—2 порядка. Не менее четко прослеживается и влияние отрицательных структур на промерзание пород. В частности, установлено, что в Норильской мульде, где наблюдаются нисходящий характер фильтрации и статические уровни подземных вод устанавливаются на больших глубинах, понижаясь от бортов мульды к ее центру, мощность многолетнемерзлых пород достигает 250 м. Очевидно, что при всех видах освоения Северной части долины р. Енисей: бурении и эксплуатации газовых и нефтяных скважин, строительстве рудников, дорог, жилых поселков, трубопроводов — установленные закономерности являются определяющими для постановки изысканий, опробования, выбора расчетных схем, принятия проектных решений, прогноза изменений геологической среды.

Приведенный обзор иллюстрирует роль геолого-структурных факторов в формировании главнейших инженерно-геологических компонентов для мегаструктур. Это вовсе не значит, что при детальных исследованиях для конкретных видов строительства или для отдельных сооружений анализ геолого-структурных факторов менее важен. Взаимосвязь и функциональная зависимость, существующая между историко-генетическими, геолого-структурными,

палеогеографическими особенностями территории и ее инженерно-геологическими характеристиками, определяет методологию инженерно-геологического анализа на всех уровнях исследования: от регионального (и даже глобального, в масштабах всей Земли) до детального, связанного с конкретным проектированием. Методы познания, которые вскрывают сущность взаимосвязи, являются ведущими в инженерной геологии. Один из таких методов — геолого-структурный анализ. Изучение, оценка, прогноз инженерно-геологических условий территорий (массив, участок и др.), рациональная методика получения информации и корректная ее интерпретация невозможны без знания геологической структуры, внутреннего строения, вещественного состава, состояния, физико-механических свойств пород. Геолого-структурные факторы определяют граничные условия при применении для инженерно-геологической интерпретации и других геологических методов изучения территории — формационного и литолого-фациального, историко-геологического и ландшафтно-климатического анализов. Поэтому важно, чтобы геолого-структурный анализ был не только обязательным, но и опережающим другие методы инженерно-геологического исследования.

#### **НЕОТЕКТОНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ИХ РОЛЬ, В ФОРМИРОВАНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

Новейшие тектонические движения и строение рельефа территории являются важнейшими региональными взаимосвязанными факторами инженерно-геологических условий; контролирующая роль здесь принадлежит неотектоническому фактору. Новейшие движения не только определяют важнейшие черты геоморфологических условий и вместе с тем — развитие и строение новейших континентальных отложений, особенности режима и глубины залегания грунтовых и верхних горизонтов подземных вод, распространение и интенсивность развития многих геологических процессов, но существенно сказываются на геологическом строении территории. Эти движения обуславливают выход на поверхность пород более древних структурно-тектонических этажей и степень их обнаженности, а также степень сейсмичности территорий, особенности напряженного состояния земной коры и отдельных массивов пород.

История формирования инженерно-геологических условий различных регионов СССР свидетельствует о том, что современный инженерно-геологический облик территории в значительной степени определяется последним, новейшим этапом развития. Этот этап характеризовался наряду с унаследованием многих элементов древнего структурного плана сложными соотношениями древних и новейших структурных форм, частичной перестройкой контуров структур, новообразованиями, изменениями знака движений отдельных структурных элементов, большой ролью разрывной тектоники, блочностью земной коры.

Различная направленность, контрастность и интенсивность дви-

жений новейших структур, классификация и характеристика которых приведена на картах новейшей тектоники [31], имеют большое значение.

На примерах отдельных типов геоструктур проследим влияние неотектоники и геоморфологии на формирование инженерно-геологических условий.

Плиты молодых платформ (Скифская, Туранская, Западно-Сибирская) на новейшем этапе — области слабых поднятий и опусканий со значительной аккумуляцией, где формирование поверхностной толщи пород, являющейся основанием возводимых сооружений, а также рельефа, грунтовых вод и геологических процессов целиком определялось геологическим развитием в новейший период. Так, Западно-Сибирская плита с поверхности перекрыта сплошным чехлом слаболитифицированных песчано-глинистых олигоцен-неогеновых и четвертичных пород мощностью 100—400 м. Они слагают аккумулятивные и денудационно-аккумулятивные формы рельефа молодой плиоцен-четвертичной равнины. Ограниченное развитие более древнего денудационного рельефа и выходы во врезях рек литифицированных пород чехла приурочены лишь к бортам плиты, испытавшим устойчивые поднятия с послепалеогенового или послеплиоценового времени. Дифференцированность движений и смещение областей прогибаний и поднятий в течение новейшего этапа определили особенности формирования новейших отложений и рельефа равнины [17]. С обширной областью прогибания и аккумуляции озерно-аллювиальных отложений в позднеплиоцен-раннечетвертичное время связаны состав и строение новейших отложений, а также рельеф значительной южной и центральной частей равнины.

Основные черты орографического плана и современного рельефа равнины определились в среднечетвертичное время, ознаменованное погружением самой северной части плиты, устойчивыми поднятиями ее центральных и южных районов, прекращением площадной аккумуляции осадков, возникновением перекоса равнины с юга на север, заложением продолин Оби и Иртыша, приуроченных к областям относительных опусканий и зонам глубинных разломов.

Дальнейшее нарастание скоростей поднятий на верхнечетвертичном и современном этапах в пределах всей равнины привело к постепенному расширению областей поднятий за счет сокращения впадины, способствовало развитию эрозионных процессов, расчленению междуречных равнин, сужению и углублению речных долин, увеличению глубины вложения аллювия и роли песчаных отложений в его составе. Интенсивность геологических процессов в пределах единой климатической зоны в значительной мере определяется четвертичными тектоническими движениями. На положительных структурах возрастают глубина и густота эрозионной сети, к ним приурочены интенсивный подмыв берегов, образование оползней, разрушение склонов, оврагообразование, уменьшение степени заболоченности.

Плиты древних платформ (Русская, Сибирская), в отличие от молодых, на новейшем этапе испытывали слабые общие поднятия со слабо дифференцированной структурой.

Обобщения последних лет В. И. Бабака, Н. И. Николаева и др. по неотектоническому развитию и геоморфологии Русской плиты показали, что для этого региона на новейшем этапе характерна общая инверсия тектонических движений со сменой опусканий слабыми поднятиями и на их фоне оживление дифференцированных блоковых движений, различная степень унаследованности неоструктур от древних, местами инверсия или несовпадение границ. Преобладание поднятий привело к локальной аккумуляции олигоцен-неогеновых отложений в отдельных впадинах и долинах. Достаточно широкое распространение четвертичных отложений в значительной степени было связано с оледенениями равнины, а также трансгрессиями окраинных морей. Накопление аллювиальных и аллювиально-озерных осадков было приурочено к прогибам и впадинам.

Рельеф Русской равнины претерпел длительную и сложную историю развития, которое началось еще в позднем мезозое. Однако основные черты структурного и орографического плана плиты оформились в начале новейшего этапа после его значительной перестройки, особенно заметной в южных районах, где образовались Средне-Русская и Приволжская возвышенности, Приуральское плато, Окско-Донская низменность и др. Здесь широко представлен ярусный денудационный рельеф возвышенностей, характерный для унаследованных поднятий (Средне-Русская возвышенность), а также пластовые и моноклиналиные равнины различной высоты, сложенные разновозрастными новейшими отложениями и вовлеченные в поднятия на разных этапах новейшего периода.

Развитие речной сети Русской равнины было длительным, сложным и в значительной степени определялось как новейшими движениями плиты в целом, так и движениями отдельных ее структур, а также разломной неотектоникой.

Все это создало конфигурацию гидросети, направление стока, переуглубление долин, их захоронение, глубину проникновения ингрессий, строение террас, мощность аллювия, соотношение фаций и т. д.

В. И. Бабак и Н. И. Николаев отмечали, что важной особенностью платформенных структур новейшего этапа развития, имеющей большое инженерно-геологическое значение, является их блоковый характер, связанный с движениями по разломам. Активные новейшие разрывные нарушения, как и на молодых платформах, обычно не смещают слои осадочного чехла в верхней части, а выражаются в ландшафте, в результате присутствия в чехле над ними узких зон повышенной трещиноватости и флексуобразных перегибов, с которыми связаны зоны ослабленных пород, разрядки напряжений, увеличение проницаемости пород, глубинный газо- и водообмен, активная взаимосвязь поверхностных и подземных вод. К ним приурочены долины рек, спрямленные берега озер и

границы болот, развитие карстовых процессов, аномальные источники подземных вод и др.

Достаточно четко прослеживается влияние новейших движений на развитии геологических процессов. Карст обычно приурочен к сводовым частям поднятий с небольшой мощностью рыхлых покровных отложений или к зонам разрывных нарушений с повышенной трещиноватостью пород и активным водообменом. Оползневые процессы более активны в пределах поднятий с более высокими и крутыми склонами. На морских побережьях усиление развития оползней приурочено к участкам опусканий и активной абразии. Оврагообразование усиливается на поднятиях с расчлененным рельефом, особенно возрастает на инверсионных четвертичных поднятиях, сложенных молодыми нелитифицированными породами.

Орогенные пояса — широкие планетарные зоны дробления, живущие в неотектонический этап [31], к которым приурочены сложные в инженерно-геологическом отношении территории. Эпигеосинклинальные орогены (Карпаты, Кавказ, Копетдаг, Южный Крым) характеризуются незавершенностью интенсивных горо- и складкообразовательных процессов, большим размахом, контрастностью новейших деформаций, линейностью сводовых и сводово-блоковых форм, а в краевых и межгорных прогибах — новейших складчатых форм, значительной ролью продольных и поперечных глубинных разломов, наличием надвиговых и сдвиговых перемещений, высокой сейсмичностью, большой степенью унаследованности новейших структур наряду с инверсионными. Интенсивное воздымание складчатых сооружений сопровождалось углублением сопряженных прогибов. Глубинная эрозия растущих гор поставляла материал, заполнявший впадины. Все это показывает, что сложность инженерно-геологических условий эпигеосинклинальных орогенов целиком определяется неотектоникой: тектоническая раздробленность, разнообразие литологического состава пород, современная тектоническая активность, сейсмичность, вулканизм, многообразие геоморфологических форм, режим подземных вод, широкое развитие и активность современных геологических процессов.

На примере Байкальской рифтовой зоны можно проследить, насколько определяющим является неотектонический фактор в формировании всего комплекса инженерно-геологических условий таких структур. Байкальское сводовое поднятие, рассеченное рифтовой впадиной оз. Байкал, сформировалось в пределах складчатой области байкалид в олигоцен-четвертичное время. Образовался высококонтрастный сильнорасчлененный рельеф высокогорных хребтов, сложенных скальными породами. Рифтовые впадины выполнены новейшими мелкозернистыми и глинистыми осадками, в отдельных впадинах присутствуют базальты и туфы базальтов. Особенность рифтовой зоны — исключительно высокая современная тектоническая активность. Среди новейших разломов наиболее активны ограничения впадин и блоковых перемычек, с которыми связана повышенная сейсмичность, мощные зоны дробления



пород, термальные воды, зоны разгрузки подземных вод, особенно мощные коры выветривания.

Высокая сейсмическая активность Байкальской рифтовой зоны с частыми землетрясениями от 9 до 12 баллов определяет по исследованиям В. П. Солоненко развитие сеймотектонических и гравитационно-сеймотектонических процессов. К рифтовым впадинам приурочены мощные толщи сингенетически промерзших пород, что связано с процессами неотектонического погружения дна и интенсивной аккумуляцией осадков. Наличие в краевых частях впадин разломов, сопровождающихся аномально высокими теплопотоками и разгрузкой термальных вод, вызывает образование сквозных таликов значительной мощности, а также систем наледей.

Большое значение для формирования инженерно-геологических условий имеют такие общие закономерности строения горных стран, как вертикальная геоморфологическая зональность, обусловленная неравномерностью, стадийностью процесса воздымания и расширением горной области в процессе развития сопряженной системы поднятий и впадин, что было показано Н. П. Костенко.

В формировании рельефа гор особенно четко прослеживается ведущая роль неотектонического фактора. Однако необходимо учитывать также и влияние экзогенных процессов, преобразующих рельеф, создающих микрорельеф и придающих ему своеобразный облик. Распространение и интенсивность развития этих процессов определяются зональным распределением на Земле тепла и влаги и изменениями их соотношений.

### **ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОБЛИКА ТЕРРИТОРИИ**

Подземные воды — один из важнейших компонентов инженерно-геологической обстановки территории. Оценка гидрогеологического фактора в формировании инженерно-геологических условий территории невозможна без выявления основных закономерностей образования подземных вод в исследуемом регионе, их динамики, режима, химического состава, которые устанавливаются с помощью методов гидрогеологии. Изучение гидрогеологических условий при инженерно-геологических исследованиях имеет свою специфику, которая обусловлена целевым назначением этих работ. Как известно, в гидрогеологии подземные воды изучаются и оцениваются прежде всего как одно из самых ценных полезных ископаемых. Поискам и разведке месторождений пресных, термальных и минеральных подземных вод, оценке их запасов и качества подчинены прикладные исследования гидрогеологов.

Решение прикладных гидрогеологических задач также связано с изучением, оценкой и прогнозом изменения гидрогеологических условий в процессе работы различных инженерных сооружений. К таким задачам относятся: разработка методов оценки водопритоков в горные выработки, вопросы мелиоративной гидрогеологии,

изменение режима подземных вод на застроенных территориях, в зонах влияния искусственных водохранилищ, а также под воздействием других видов хозяйственного освоения территории. Решение этих задач потребовало специальных теоретических исследований, научно-методических разработок по всем основным направлениям современной гидрогеологии. Именно эти гидрогеологические задачи наиболее тесно связаны с задачами, решаемыми инженерной геологией. Выявляемые при этом региональные гидростатические, гидродинамические и гидрохимические закономерности должны в полной мере учитываться в региональной инженерной геологии.

Наконец, существует ряд инженерно-геологических вопросов, при теоретическом и прикладном решении которых необходимо знание гидрогеологических параметров и гидрогеологических закономерностей: изучение изменений состояния и свойств горных пород, происходящих при взаимодействии их с водой; процессов набухания, растворения, суффозии и вызванных ими явлений; прогноз взвешивающего и фильтрационного давления, а также других процессов, вызванных действием на породы подземных вод как внешних сил. В этом случае необходимо знание как общих гидрогеологических закономерностей, так и закономерностей для конкретного инженерно-геологического региона.

При региональных инженерно-геологических исследованиях особое внимание обращается на гидрогеологическое строение и гидродинамический режим региона. Эти факторы не менее важны, чем геологическое и геоморфологическое строение территории. Инженерно-геологическое значение подземных вод различно в разных регионах и определяется особенностями его гидрогеологического строения. Поэтому необходимо знать основные гидрогеологические характеристики: фильтрационное строение массива (количество и характер водоносных горизонтов и комплексов, их взаимосвязь, тип проницаемости); стратиграфическое и геоморфологическое положение этих горизонтов и комплексов, а также областей их питания и разгрузки; влияние на гидрогеологические условия географической широтной зональности и высотной поясности; химический состав подземных вод. Характеристики, которые непосредственно используются в инженерно-геологических расчетах и прогнозах, связаны с гидрогеологическим строением территории. К ним прежде всего следует отнести глубину залегания грунтовых вод и их режим, гидростатические напоры, фильтрационные параметры, агрессивность подземных вод по отношению к строительным конструкциям и материалам.

В региональной гидрогеологии все эти данные, их взаимосвязь и взаимная обусловленность выявляются и обобщаются при гидрогеологическом районировании. Принципы и признаки гидрогеологического районирования в современной гидрогеологии разработаны достаточно детально. В фундаментальных работах и учебно-методической литературе принят принцип отдельного районирования грунтовых вод и вод более глубоких горизонтов. Признака-

ми, которые определяют закономерности формирования, динамику, режим и химический состав грунтовых вод, являются географическая зональность и геоморфологическое строение; вод глубоких горизонтов — геологическое строение. Подобный подход полностью учитывает особенности гидрогеологической обстановки, необходимые для инженерно-геологической оценки территории, и хорошо увязывается с современными представлениями о принципах и признаках инженерно-геологического районирования.

Грунтовые воды имеют огромное значение при инженерно-геологической оценке территории. Как правило, они заключены в дисперсных отложениях четвертичного возраста, реже — в более древних образованиях неотектонического структурного этажа. Осадочные породы этого этажа литифицированы слабо, и их свойства особенно чутко реагируют на изменение влажности.

Грунтовые воды — один из наиболее ярко выраженных зональных факторов формирования инженерно-геологических условий. Их глубина залегания, минерализация и химический состав различны в разных географических зонах и подчиняются общим зональным закономерностям. В пределах СССР эти закономерности особенно четко проявляются на Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнинах, где по мере движения с севера на юг увеличивается глубина залегания грунтовых вод, растет их минерализация, изменяется тип агрессивности. Следует подчеркнуть, что, кроме этих общих закономерностей, не менее важное инженерно-геологическое значение имеют изменения в гидрогеологической обстановке, обусловленные региональными особенностями территории, в первую очередь строением четвертичных отложений и рельефом местности.

Отсюда ясно, что на упомянутых выше равнинах природная и геологическая зональности в распределении и строении четвертичного чехла в общих чертах совпадают (с север-северо-запада на юг-юго-восток на Русской платформе и с севера на юг на Западно-Сибирской плите); ледниковые разновозрастные отложения и ледниковые формы рельефа сменяются перигляциальными, лёссовыми, затем внеледниковыми — элювиальными, озерно-аллювиальными или морскими. Морские четвертичные отложения Крайнего Севера обеих платформ не оказывают существенного влияния на общие закономерности. Поэтому естественно, что при инженерно-геологическом районировании этих регионов грунтовые воды должны учитываться и анализироваться как фактор инженерно-геологических условий, непосредственно связанный с особенностями рельефа и образующих его отложений. Такой подход справедлив при описании как грунтовых вод аккумулятивных равнин, так и денудационных равнин, плато и орогенов.

Воды более глубоких горизонтов также имеют большое инженерно-геологическое значение при многих видах освоения территории в определенных геолого-гидрогеологических условиях. Общеизвестна роль подземных вод в формировании карста, суффозии, оползней, наледей и других явлений. Взаимодействие вод с вме-

щающими породами существенно изменяет физико-химические и физико-механические их свойства. С увеличением глубины проникновения хозяйственной деятельности в геологическую среду инженерно-геологическая значимость подземных вод глубоких горизонтов постоянно растет, поэтому необходимы их выявление, анализ и оценка.

При гидрогеологическом районировании принято различать два типа гидрогеологических структур: гидрогеологические бассейны и гидрогеологические массивы различных порядков. Особенности их строения и основные характеристики существенно различны с инженерно-геологической точки зрения. В первом случае всегда следует иметь в виду различную обводненность пород разных стратиграфо-литологических комплексов, фильтрационную многослойность разреза, возможность перетекания и подпитывания вод различных горизонтов. Важное инженерно-геологическое значение имеют величины гидростатических напоров, разгрузка напорных вод в зонах строительства и связанные с этим инженерно-геологические явления. Инженерно-геологическое значение подземных вод гидрогеологических массивов, т. е., как правило, вод трещинных, заключенных в скальных грунтах, до последнего времени явно недооценивалось. Между тем опыт строительства свидетельствует о том, что влияние этих вод на устойчивость скальных массивов велико и разнообразно. При этом возможно и размягчение дисперсного заполнителя трещин, и расклинивающее действие пленок воды на горную породу, ухудшающие их прочностные и деформационные показатели, и возникновение локальных подпоров, а также и другие гидродинамические явления. Таким образом, и в этом случае схема гидрогеологического районирования хорошо увязывается с инженерно-геологической, где наиболее крупные таксономические единицы — регионы выделяются по геотектоническому признаку.

Хорошо вписываются в существующие схемы инженерно-геологического районирования и подземные воды области вечной мерзлоты. Главными факторами природной среды, определяющими ее гидрогеологическое строение, по-прежнему остаются географическая зональность, геоморфологическое и геологическое строение. При региональных инженерно-геологических исследованиях необходимо выявить гидрогеологические особенности территории в зависимости от этих факторов; оценить влияние этих факторов на гидрогеологические характеристики в конкретных условиях и учесть их при инженерно-геологическом районировании.

Подземные воды — один из наиболее мобильных и изменчивых факторов инженерно-геологических условий. Как было показано, учет этого фактора необходим на всех таксономических уровнях регионального инженерно-геологического анализа. При обзорном и мелкомасштабном изучении территории выявляются самые общие гидрогеологические закономерности, конструируется общая гидрогеологическая схема, обусловленная геолого-геоморфологическими и зональными факторами. По мере возрастания детальности ис-

следований эта схема не только уточняется, но и дифференцируется, вплоть до количественного учета гидрогеологических параметров.

Региональная инженерная геология изучает геологическую среду в статике. Это значит, что подземные воды оцениваются как элемент инженерно-геологических условий в их естественном состоянии. Между тем современные масштабы воздействия человека на геологическую среду таковы, что часто изменения гидрогеологических условий приобретают региональный характер. Причинами этих изменений являются сельскохозяйственная мелиорация земель (осушение и орошение); отбор подземных вод для водоснабжения, поддержания давления в нефтеносных пластах, откачки с целью осушения горных выработок, создание водохранилищ, подпор грунтовых вод на застроенных территориях и др.

Антропогенное изменение гидрогеологических условий приведет к возникновению таких инженерно-геологических процессов, как оседание поверхности земли, иссушение грунтов или их заболачивание, вторичное засоление, активизация природных экзогенных явлений, изменение сейсмичности, ухудшение показателей физико-механических свойств грунтов и др. Возможность возникновения этих процессов, их характер и интенсивность, конечно, во многом зависят от способа и интенсивности техногенного воздействия на геологическую среду вообще и на наиболее динамичную гидрогеологическую составляющую в частности. Под действием техногенных нагрузок могут произойти изменения в гидрогеологическом строении территории, не характерные для ее естественного состояния. Однако и в этих случаях нельзя не учитывать значения местных геолого-гидрогеологических условий: наличие или отсутствие водоупора, его глубину, состав и строение зоны аэрации, строение разреза над эксплуатируемыми горизонтами и др., т. е. всех тех факторов, которые определяют инженерно-геологический потенциал территории — ее запас устойчивости по отношению к техногенному возмущению.

Очевидно, что при региональных инженерно-геологических исследованиях гидрогеологические условия должны изучаться не только в естественном состоянии, но и в условиях изменения, связанных с хозяйственной деятельностью человека.

### **МЕРЗЛОТНАЯ ОБСТАНОВКА КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

Мерзлотная обстановка относится к числу важнейших факторов, определяющих инженерно-геологические условия территории. Значимость этого фактора в основных чертах определяется следующим: 1) многолетнемерзлые породы — специфический класс грунтов, свойства которых существенно зависят от количества льда в них и их температуры и резко изменяются с изменением последней, особенно при ее значениях, близких к 0 °С. Эти породы зани-

мают, по данным работы [33], более 47 % территории СССР и 25 % суши земного шара; мощность их достигает 1000 м и более; 2) в пределах криолитозоны активнейшим образом протекает обширный комплекс мерзлотных процессов, из которых одни (криогенные) обуславливают прогрессивное развитие и новообразование многолетнемерзлых толщ и криогенных форм рельефа, а другие (посткриогенные) — приводят к деградации многолетнемерзлых пород и формированию характерных форм рельефа; 3) наличие многолетнемерзлых пород коренным образом изменяет гидрогеологическую структуру территории, а следовательно, и ее роль как фактора формирования инженерно-геологических условий; 4) высокой чувствительностью многих параметров мерзлотной обстановки и, как следствие этого всей инженерно-геологической обстановки в целом, к антропогенным воздействиям. Все это требует применения достаточно специализированной методики изучения, оценки и прогнозирования ожидаемых изменений инженерно-геологических условий районов криолитозоны по сравнению с территориями, где многолетнемерзлые породы отсутствуют.

Многолетнемерзлые и сезонномерзлые грунты принципиально отличаются от грунтов талых тем, что в них имеется новая твердая составляющая, представленная криогидратными минералами — льдом, криогидратами и кристаллогидратами, которые образуются при отрицательной температуре и являются материалом, цементирующим мерзлые породы. Формирование мерзлых пород приводит к образованию в этих грунтах структурных связей совершенно нового типа — криогенных. Поэтому состав, строение и свойства мерзлых пород определяются, с одной стороны, составом, строением и свойствами твердой минеральной, органоминеральной и органической компонент, а с другой — количеством льда (и незамерзшей воды), его температурой и характером распределения в породе. Причем три последних показателя оказывают обычно сильное влияние. Это обусловлено тем, что лед — одна из основных частей любого мерзлого грунта, наиболее неустойчив при изменении температуры и наиболее подвижен. При повышении температуры прочность льда и, как следствие этого, прочность всей породы резко снижается, а при переходе через  $0^{\circ}\text{C}$  (в область положительных значений) происходит оттаивание мерзлого грунта, приводящее к качественному изменению его состояния и всех свойств, в первую очередь деформационных и прочностных. Именно это определяет большую динамичность инженерно-геологической обстановки в районах развития многолетнемерзлых грунтов как в естественных условиях, так и в результате инженерной и хозяйственной деятельности человека.

Лед в мерзлых грунтах, определяющий их свойства, может встречаться в виде мелких невидимых невооруженным глазом кристаллов, видимых кристаллов разной величины, шлиров разной ориентации и мощности, а также в виде жил, линз и мономинеральных тел различных, нередко очень больших размеров (мощностью первые десятки метров, а в пределах мощных ледников —

и сотни). В песчаных грубообломочных породах текстурообразующий лед обычно представлен льдом-цементом, реже шлировым льдом. В тонкодисперсных породах лед чаще встречается в виде массивов разной мощности. Кроме того, в массивах мерзлых дисперсных пород широко развиты повторно-жильные и инъекционные льды, а также пластовые льды разного генезиса. В трещиноватых массивах мерзлых скальных грунтов лед обычно встречается в виде жил, заполняющих трещины, а в закарстованных массивах он заполняет карстовые пустоты.

В отличие от талых дисперсных грунтов, на состояние и свойства которых сильно влияет степень увлажнения и очень мало — изменение температуры, физическое состояние мерзлой породы самым существенным образом зависит от температуры. В СНиП II-18-76 выделены три категории мерзлых грунтов: 1) твердомерзлые грунты — прочно сцементированные льдом породы, очень хрупкие и имеющие очень низкую сжимаемость (коэффициент сжимаемости равен или менее  $0,01 \text{ МПа}^{-1}$ ); к этой категории относятся крупнообломочные грунты с температурой ниже  $0^\circ\text{C}$ , пески крупные и средней крупности — ниже  $-0,1^\circ\text{C}$ , пески мелкие и пылеватые с температурой ниже  $-0,3^\circ\text{C}$ , супеси, суглинки и глины с температурой ниже  $-0,6$ ,  $-0,1$  и  $-1,5^\circ\text{C}$  соответственно; 2) пластичномерзлые грунты — грунты, сцементированные льдом, но обладающие вязкими свойствами и характеризующиеся более высокой сжимаемостью ( $a > 0,01 \text{ МПа}^{-1}$ ); к этой категории относятся песчаные и глинистые грунты со степенью заполнения пор льдом и незамерзшей водой, равной или большей 0,8, и температурой, более высокой по сравнению с указанными выше значениями, а также все мерзлые грунты со степенью заторфованности большей 0,25; 3) сыпучемерзлые грунты — крупнообломочные и песчаные несцементированные льдом грунты (с любой температурой) вследствие малой их льдистости — влажности (суммарная влажность таких грунтов не превышает 0,03).

В процессе промерзания существенно изменяется не только строение пород, но и почти все показатели их состава и свойства. Так, суммарная влажность мерзлых пород в подавляющем большинстве случаев очень высокая (значения по массе компонентов составляют десятки и сотни процентов). В толщах сингенетически промерзших пород это обусловлено исходным высоким содержанием воды в недоуплотненных промерзающих снизу осадках. В эпигенетически промерзших толщах наиболее высокая льдистость характерна для их верхних горизонтов (см. рис. 9), что обусловлено миграцией воды к фронту промерзания. Особенно большую влажность приобретают мерзлые глинистые породы в случае подтока влаги в процессе промерзания из нижележащих водоносных горизонтов.

Плотность скелета мерзлых грунтов, особенно связных, существенно ниже, чем у талых. Даже при постоянной неизменяющейся в процессе промерзания влажности значение этого параметра уменьшается на 3—4 %. Если происходит подток влаги и связанное

с ним пучение породы, то межчастичная пористость резко возрастает, а сами поры заполняются льдом. Промерзшие грубообломочные и песчаные грунты, поры которых заполнены льдом, становятся в отличие от талых водонепроницаемыми. У связных грунтов в процессе промерзания также уменьшается водопроницаемость. Однако это снижение меньше, чем у песчаных грунтов, поскольку в глинистых разностях мерзлых пород всегда содержится некоторое количество незамерзшей воды.

Деформационные свойства мерзлых грунтов характеризуются существенно более низкими значениями показателей по сравнению с талыми грунтами того же состава. Низкотемпературные мерзлые (твердомерзлые) грунты, как уже отмечалось, обладают очень слабой сжимаемостью. Для грунтов с высокой отрицательной температурой, особенно при значениях, близких к  $0^{\circ}\text{C}$ , характерна, как показали работы С. С. Вялова, Н. А. Цытовича, А. Г. Бродской и многих других исследователей, более высокая сжимаемость под нагрузкой. Это приходится учитывать при возведении сооружений на пластичномерзлых грунтах.

Прочностные характеристики мерзлых грунтов значительно выше, чем аналогичных талых дисперсных грунтов. Они определяются их составом, температурой и льдистостью-влажностью. У мерзлых песчаных и грубообломочных грунтов эти характеристики существенно выше, чем у глинистых, что объясняется очень небольшим содержанием в них незамерзающей воды и более совершенной цементацией их льдом. Понижение температуры приводит к резкому увеличению прочности мерзлых грунтов. Увеличение льдистости-влажности при малых значениях приводит к повышению прочности грунтов, а при больших — к ее уменьшению [47].

При оттаивании многолетнемерзлые грунты, включая их мерзлые трещиноватые скальные разности, могут давать значительные тепловые осадки (просадки). Величина таких осадков может достигать десятков процентов от мощности оттаявшей толщи [47]. Осадки неизбежно вызывают деформации или даже разрушение инженерных сооружений, возведенных на ранее мерзлых грунтах. Поэтому ожидаемая осадка при оттаивании многолетнемерзлых грунтов всегда оценивается при изысканиях в соответствии с СНиП II-18-76.

Все это свидетельствует, что наличие многолетнемерзлых пород, приводит к формированию специфической инженерно-геологической обстановки. Условия строительства в ее пределах очень сложные. По существу это строительство в особых условиях, требующее применения специальных принципов использования мерзлых пород в качестве естественных оснований зданий и сооружений, применения специальных инженерных мероприятий для обеспечения их длительной устойчивости. Первый из этих принципов предусматривает сохранение мерзлого состояния грунтов в основании в процессе строительства и в течение всего заданного периода эксплуатации инженерного сооружения. Второй — многолетнемерзлые грунты в основании используются в оттаявшем состоя-



нии (с допущением оттаивания их в процессе эксплуатации инженерного сооружения или с их оттаиванием на расчетную глубину до начала его возведения). Применение любого из этих принципов должно сопровождаться специальными мероприятиями по инженерной подготовке территорий, выполнение которых направлено на формирование и сохранение расчетного температурного режима грунтов в основании.

Следует подчеркнуть, что многолетнемерзлые породы, образовавшиеся в определенный этап четвертичного периода, определили дальнейшее развитие инженерно-геологической обстановки криолитозоны. Наличие мерзлых толщ изменило ход выветривания горных пород, ход и скорость аккумуляции отложений, весь процесс литогенеза в целом. Комплекс криогенных процессов и явлений приводит к формированию специфических геоморфологических условий области распространения многолетнемерзлых пород. В этом отношении особенно важное значение имеют процессы промерзания накапливающихся толщ, пучение, морозобойное растрескивание пород, образование подземных макроледяных тел разного генезиса, термоэрозия и термоабразия, солифлюкция, наледи, термокарст и др. В ходе их развития возникают многочисленные своеобразные мезо- и микроформы рельефа: бугры и площади пучения, гидролакколиты, различные морфогенетические типы полигональных образований, солифлюкционные террасы, курумы, термокарстовые формы рельефа разной морфологии и др.

При оттаивании многолетнемерзлых образований часто наблюдается криогенная инверсия рельефа: наиболее льдистые отложения, нередко содержащие мощные повторно-жильные льды, возвышаются в результате прекращения развития термокарстового процесса в виде останцов над оттаявшими ранее малольдистыми отложениями. На территориях полной деградации многолетнемерзлых толщ участки с малольдистыми отложениями обычно приподняты над протаявшими и просевшими, сложенными ранее сильнольдистыми породами, в результате чего наблюдается посткриогенная инверсия рельефа [33].

Наличие многолетнемерзлых водоупорных толщ затрудняет связь поверхностных, надмерзлотных и подмерзлотных вод, изменяет условия стока и инфильтрации атмосферных вод, способствует заболачиванию территории. Во многих районах криолитозоны, особенно в крайне северных прибрежных районах на разных, часто небольших, глубинах формируются незамерзшие, с отрицательной температурой породы, насыщенные сильноминерализованными водами, которые проявляют высокую агрессивность к бетонам.

Мерзлотные условия как фактор формирования инженерно-геологических условий проявились лишь в заключительной фазе развития последних — в четвертичный период. Однако именно в этот период завершилось их образование и история развития многолетнемерзлых пород имела принципиальное значение в формировании современных инженерно-геологических условий. Более того, в течение очень небольшого по продолжительности отрезка четвертич-

ного периода — голоцена (12 тыс. лет) мерзлотные условия претерпели чрезвычайно сложную историю развития, что, естественно, сыграло существенную роль на заключительном этапе формирования современных инженерно-геологических условий криолитозоны.

Мерзлотные условия развиваются под влиянием как геолого-тектонических, так и климатических факторов, среди которых важнейшее значение имеет теплообеспеченность и увлажненность территории, их соотношение между собой. Решающее значение в распределении многолетнемерзлых и сезонномерзлых пород играет тепловой баланс Земли [33].

Геолого-тектонические условия оказывают огромное влияние на формирование и развитие многолетнемерзлых пород. Состав отложений, строение массивов, разрывная тектоника, их гидрогеологическая структура, теплотокки из недр Земли и другие факторы существенно сказываются на составе, криогенном строении, особенностях планового и вертикального строения многолетнемерзлых толщ, их мощности [33]. Однако наличие многолетнемерзлых пород в пределах совершенно различных по своему происхождению и строению геологических структур — молодых и древних платформ, эпиплатформенных и эпигеосинклинальных орогенов, испытавших в четвертичное время существенно различные тектонические движения, — свидетельствует о том, что геолого-структурные условия лишь влияют на особенности развития мерзлых толщ, но не определяют их целиком. Необходимым же условием образования последних являются, как упоминалось выше, соответствующие климатические условия.

Хорошо известно, что распределение элементов климата подчинено закону широтной зональности и высотной поясности. Аналогичная закономерность характерна и для пространственного изменения как отдельных параметров мерзлотной обстановки (температура пород, глубины сезонного протаивания-промерзания, особенности криогенного строения и др.), так и для всей обстановки в целом. Это отражается и в мерзлотном районировании, где зона выступает как главный таксономический элемент иерархической системы.

При мерзлотном районировании выделяют обычно три принципиально различные геокриологические зоны: северную, центральную и южную\*. Северная зона — зона практически сплошного распространения (95—100 % площади) многолетнемерзлых низкотемпературных пород, как правило, большой мощности. Центральная зона — зона совместного распространения многолетнемерзлых и сезонномерзлых пород. В ее пределах обособляются три подзоны: массивно-островного распространения многолетнемерзлых пород (площадь, занятая этими породами, составляет 60—95 % площади), островного (30—60 %) и редкоостровного (менее 30 %, как правило, 5—10 % площади подзоны) распространения многолетне-

---

\* В горно-складчатых районах названия зон связывают с высотным положением территории.

мерзлых пород. Южная зона — зона развития сезонномерзлых грунтов. Северную ее часть занимает подзона систематического сезонного промерзания пород, южную — подзона кратковременного и несистематического промерзания пород. Для каждой зоны и подзоны характерен, как показали В. А. Кудрявцев и др. [33], свой диапазон изменения среднегодовых температур и мощности многолетнемерзлых и сезонномерзлых толщ. Зональное (широтное и высотное) изменение мерзлотных условий заставляет рассматривать их как зональный геологический фактор инженерно-геологических условий, который во многом обуславливает зональность изменения инженерно-геологической обстановки континентов Земли [13, 41].

### **СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

К числу важнейших факторов формирования инженерно-геологических условий относятся современные геологические процессы и создаваемые ими явления. Эти процессы представляют собой наиболее быстро развивающийся компонент, во многом обуславливающий динамичность всей инженерно-геологической обстановки. По существу современные геологические процессы — это болезни массивов горных пород, которые развиваются и протекают в настоящее время, трансформируя, а во многих случаях коренным образом изменяя инженерно-геологические условия. Именно поэтому важнейшими задачами любых инженерно-геологических исследований, в том числе региональных, являются изучение современных геологических процессов и явлений, оценка механизма и стадии их развития, а затем и прогнозирование их поведения в пространственно-временном аспекте. В процессе детальных изысканий эти материалы служат основой обоснования инженерных мероприятий, которые призваны защитить проектируемые сооружения или используемую территорию от деформаций или разрушения.

Оценивая роль современных геологических процессов как фактора формирования инженерно-геологических условий, необходимо подчеркнуть, что этот фактор является: 1) наиболее молодым, развивающимся в настоящее время фактором формирования инженерно-геологических условий; 2) нередко геологически мгновенно, исторически, как правило, кратковременно действующим фактором формирования инженерно-геологических условий; 3) наиболее активным и наиболее мощным на современном этапе фактором развития (преобразования) инженерно-геологических условий; 4) фактором, изменяющим инженерно-геологические условия как очень крупных по площади территорий, так и локальных участков.

Как было показано, природные современные геологические процессы развиваются под влиянием геолого-тектонических и климатических факторов, причем характер и интенсивность эндогенных

процессов определяются лишь первым из них, а экзогенных — как первым, так и вторым. Зависимость экзогенных геологических процессов, более многочисленных и развитых по существу повсеместно, от климатических условий выражена, как показали еще работы Н. И. Николаева, чрезвычайно отчетливо. Не менее ярко проявляется связь комплексов экзогенных геологических процессов с современным состоянием грунтов верхней части разреза массивов (рис. 36).

Уже неоднократно отмечалось, что распределение элементов климата подчинено законам широтной зональности и высотной поясности. Аналогичная закономерность установлена и для пространственного изменения современного состояния грунтов. Следствием этого является пространственное изменение комплекса современных экзогенных геологических процессов, носящее зональный характер.

Зональное (широтное и высотное) изменение комплекса современных экзогенных геологических процессов позволяет отнести весь комплекс геологических процессов к категории зональных геологических факторов формирования инженерно-геологических условий [40]. Этот фактор наряду с гидрогеологическими и мерзлотными условиями обуславливает зональный характер изменения инженерно-геологической обстановки в целом.

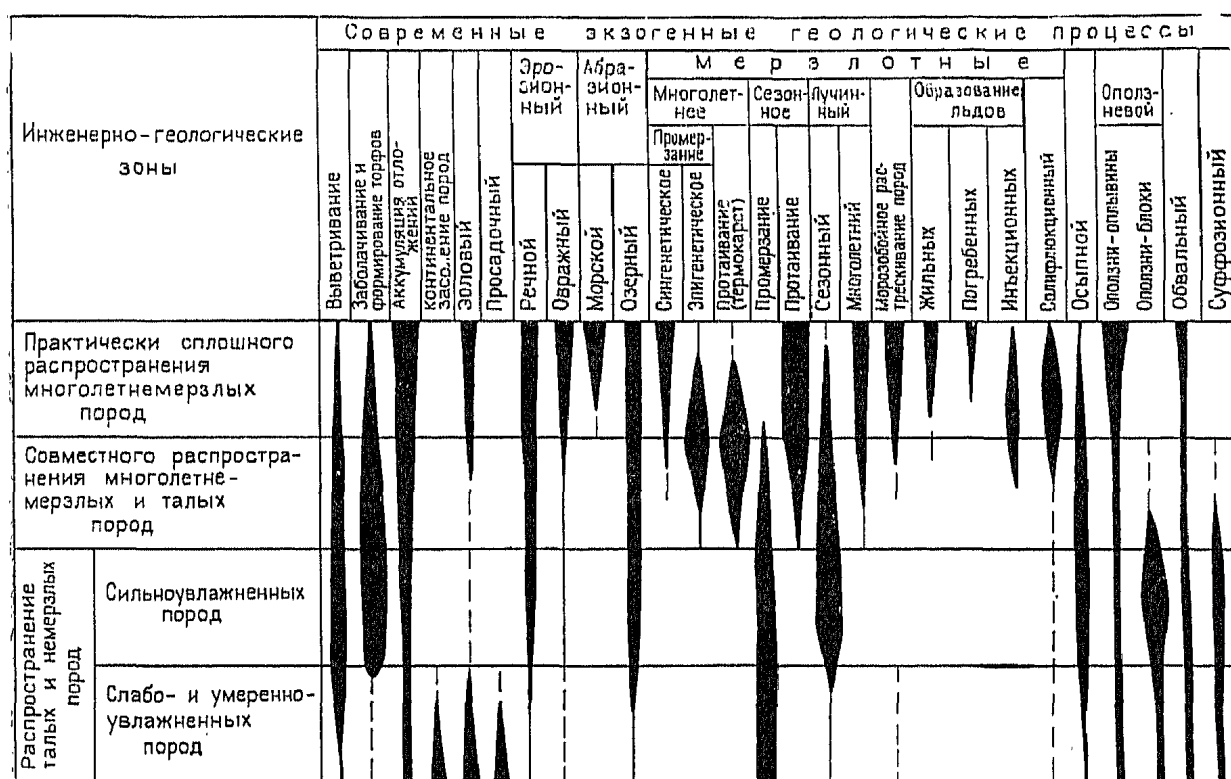


РИС. 36. Комплексы современных экзогенных геологических процессов, свойственные различным инженерно-геологическим зонам (на примере Западно-Сибирской плиты). По В. Т. Трофимову.

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ — РЕЗУЛЬТАТ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ

Одним из основополагающих методологических положений инженерной геологии является представление о том, что современный инженерно-геологический облик территории сформировался в ходе всей геологической истории данного региона и отражает ее. Из этого положения следует, что одинаковыми или близкими по инженерно-геологическим условиям являются те территории, в пределах которых все инженерно-геологические компоненты — горные породы, рельеф, подземные воды, геологические процессы — имеют одинаковую историю формирования, т. е. при инженерно-геологическом анализе для выявления закономерностей формирования и пространственно-временной изменчивости необходимы изучение и учет историко-геологических связей между инженерно-геологическими факторами.

Однако практика региональных исследований показывает, что подобный подход к инженерно-геологическому изучению и описанию территорий реализуется далеко не всегда. Впервые наиболее последовательно он применен при создании восьмитомной монографии «Инженерная геология СССР». В предшествующих региональных описаниях, в том числе в соответствующих разделах многотомной «Гидрогеологии СССР», в многочисленных производственных отчетах, принят иной подход, достаточно традиционный для региональных геологических работ разного профиля. В них последовательно характеризуются современные, существующие в настоящее время черты геологического строения, рельефа, гидрогеологической и экзодинамической обстановки территории, которые необходимы для инженерно-геологической оценки ее применительно к различным видам освоения.

Подобный подход не является ошибочным. Он позволяет дать достаточно полное представление об инженерно-геологических особенностях того или иного региона, показать взаимосвязи инженерно-геологических факторов. Корректен подобный подход и с методологических позиций. Если вся геологическая история отражена в современном состоянии инженерно-геологических компонентов (составе, строении и свойствах горных пород, строении рельефа, гидрогеологических условиях, характере и интенсивности проявления современных геологических процессов), то нет необходимости в инженерно-геологическом, специальном анализе этой истории, реконструкции событий, происходивших в давние геологические эпохи, в мезозое, палеозое и даже докембрии. Работоспособность подобного подхода подтверждается и в общепринятых схемах общего инженерно-геологического районирования, морфолого-генетического по существу.

Не подвергая сомнению правомерность данного подхода, покажем здесь, что он все-таки обедняет методологию инженерно-геологического анализа, так как не использует все то богатство

Структурные этажи	П о р о д ы									
	О с а д о ч н ы е				Вулканогенно-осадочные	Метаморфические			Магматические	
	Несцементированные		Сцементированные		Слабометаморфизованные	Слабометаморфизованные	Среднеметаморфизованные	Сильнометаморфизованные	Эффузивные	Интрузивные
Неуплотненные	Уплотненные	Слабые	Прочные							
Четвертичный										
Палеоген-неогеновый										
Юрский-меловый										
Среднедевонский-нижнепермский										
Нижне-средне-девонский									Z Z	
Рифейский-силурийский									S S S	+
Верхне-протерозойский									N N N	+
Архей-нижне-протерозойский										+

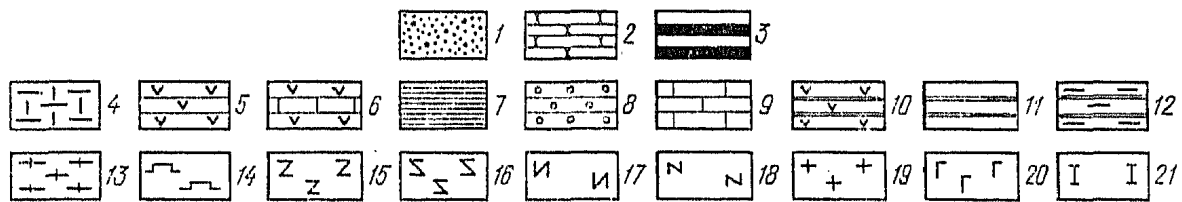


РИС. 37. Распределение формаций по структурным этажам и инженерно-геологическим группам пород в пределах восточной части Алтая-Саянской складчатой области.

Геолого-генетические комплексы: 1 — аллювиальные, флювиогляциальные, гляциальные. Формации: 2 — красноцветные; 3 — угленосные; 4 — туфогенно-терригенные; 5 — терригенно-вулканогенные; 6 — терригенно-карбонатно-вулканогенные; 7 — флишевые; 8 — молассовые; 9 — карбонатные; 10 — эффузивно-сланцевые; 11 — зеленосланцевые; 12 — графитистосланцевые; 13 — гнейсов и кристаллических сланцев; 14 — базальтовые; 15 — эффузивные; 16 — порфиоровые; 17 — порфиритовые; 18 — спилит-кератофировые; 19 — гранитоидные; 20 — типербазитовые; 21 — габброндные

методов, концепций, фактов, которые накопили к настоящему времени смежные геологические науки. Реконструкция геологической истории при инженерно-геологических исследованиях имеет и большое практическое значение. На это обстоятельство неоднократно указывал в своих работах И. В. Попов. В частности, он подчеркивал, что основным методическим приемом построения региональных инженерно-геологических выводов и оценок является установление обоснованных границ экстраполяции фактов, выявляемых специальными инженерно-геологическими работами. Непосредственное установление этих границ требует длительных и дорогих исследований, которые к тому же не всегда могут быть осуществлены из-за особенностей природной обстановки, целей и за-

Структурные этажи	П о р о д ы							
	О с а д о ч н ы е				М е т а м о р ф и ч е с к и е			М а г м а т и ч е с к и е
	Н е с ц е м е н т и р о в а н н ы е		С ц е м е н т и р о в а н н ы е		С л а б о - м е т а м о р ф и з о в а н н ы е	С р е д н е - м е т а м о р ф и з о в а н н ы е	С и л ь н о - м е т а м о р ф и з о в а н н ы е	И н т р у з и в н ы е
	Н е у п л о т н е н н ы е	У п л о т н е н н ы е	С л а б ы е	П р о ч н ы е				
Четвертичный								
Палеоген-неогеновый								
Юрский-меловой								
Верхнекаменноугольно-триасовый								
Верхнекембрийский-верхнедевонский								
Нижнекембрийский								
Рифейский								
Архей-протерозойский								

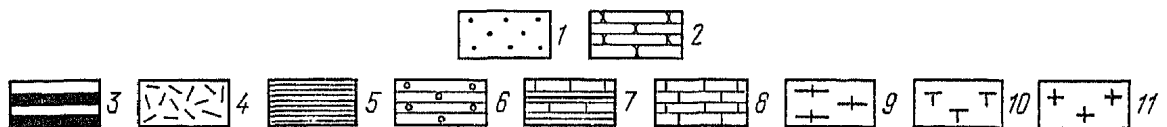


РИС. 38. Распределение формаций по структурным этажам и инженерно-геологическим группам пород в пределах юго-западной окраины Сибирской платформы.

*Геолого-генетические комплексы:* 1 — аллювиальные, флювиогляциальные. *Формации:* 2 — красноцветные; 3 — угленосные; 4 — туфогенные; 5 — терригенные; 6 — молассовые; 7 — терригенно-карбонатные; 8 — карбонатные; 9 — гнейсов и кристаллических сланцев; 10 — трапповые; 11 — гранитоидные

дач инженерно-геологических изысканий. Поэтому, отмечал И. В. Попов, единственным путем решения этой основной задачи региональной инженерной геологии является использование историко-геологических и генетических связей между геологическими факторами, изучаемыми всеми другими геологическими науками. Следовательно, обоснованное региональное инженерно-геологическое описание и оценка местности могут быть получены только на основе историко-геологического анализа геологического становления строения изучаемой территории и современной ее геологической жизни. Приведем несколько конкретных региональных примеров, иллюстрирующих это положение.

Как известно, зависимость между положением геологического тела (геологической формации) в земной коре и инженерно-геологическими особенностями слагающего это тело горных пород носит региональный характер. Породы одного и того же возраста и даже одинакового состава в разных регионах могут иметь различные

свойства в зависимости от геологической жизни этих регионов. В пределах единого тектонического региона наиболее существенные, часто качественные различия в свойствах пород отмечаются при перестройке структурного плана, изменении областей сноса, тектонического и палеогеографического режима осадконакопления, проявлений магматизма и др. На рис. 37, 38 приведены схемы, подтверждающие это положение. Они показывают, что в восточной части Алтае-Саянской области и сопряженных с нею регионах Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты одновозрастные и близкие по составу отложения могут быть представлены как близкими по свойствам, так и совершенно разными породами. Образования допалеозойского возраста в обоих случаях представлены регионально-метаморфизованными, прочными породами. В том и другом регионе степень метаморфизма пород (и, следовательно, их свойства) закономерно изменяется от древнейших образований к более молодым. Геологическая история раннего палеозоя этих двух регионов различна и соответственно существенно различны инженерно-геологические свойства пород. Отложения кембрия — ордовика — силура на Сибирской платформе образовались в условиях эпиконтинентального моря и хотя и пережили длительный и глубокий катагенез, но не метаморфизованы. Прочность песчаников и известняков составляет 50—60 МПа. Палеозойские толщи Алтае-Саянской складчатой области формировались в геосинклинальном бассейне, регионально метаморфизованы и имеют прочность более 100 МПа. В девоне на Сибирской платформе и в Алтае-Саянской области накапливались толщи орогенного генезиса, сопоставление инженерно-геологических свойств которых подтверждает большое сходство их в обоих регионах. Особенно убедительно влияние однотипного палеотектонического и палеогеографического режима и последующей сходной геологической истории проявилось на составе, строении и свойствах пород, которые близки в совершенно различных современных тектонических структурах: Канской впадине, принадлежащей Сибирской платформе; в Назаровской впадине, входящей в состав Алтае-Саянской складчатой страны, и в Чулымо-Енисейском районе, представляющем собой юго-восточную окраину Западно-Сибирской плиты. Приведенный пример убедительно показывает необходимость учета особенностей геологической истории при инженерно-геологическом классифицировании геологических тел, создании региональных инженерно-геологических классификаций горных пород, прогнозной оценке их свойств, экстраполяции результатов опробования.

Можно привести и другие примеры, когда знание геологической истории региона необходимо для правильного и оптимального планирования инженерно-геологических исследований. Так, существование внутриформационных перерывов в разрезе карбонатной формации карбона Московской синеклизы привело к формированию в ее толще на разных стратиграфических уровнях элювируемых повышенно закарстованных горизонтов, содержащих доломитовую муку. Это обстоятельство учитывается при определении



программы инженерно-геологических изысканий, глубины разведки, системы опробования, постановки опытных полевых работ.

Приведем другой пример; когда длительный континентальный период в мезозойской геологической истории Урала и Казахского щита привел, как известно, к формированию здесь мощных кор выветривания и элювиированных горизонтов, грунты которых по свойствам принципиально отличны от субстрата — прочных изверженных горных пород. Во многих районах эти коры погребены под осадками кайнозоя. Совершенно очевидно, что палеорекострукции и в этом случае позволяют более целенаправленно вести инженерно-геологические работы как регионального характера, так и выполняемые для обоснования проектов гидротехнических сооружений, промышленных объектов, карьеров по разработке месторождений полезных ископаемых.

Большое значение при выявлении региональных инженерно-геологических закономерностей имеет анализ истории развития рельефа. В существующей схеме инженерно-геологического районирования геоморфологические особенности территории учитываются на уровне областей. При этом принимаются во внимание генезис и морфология рельефа, его возраст. По таким признакам различают области, отвечающие аккумулятивным равнинам различного генезиса (морского, ледникового, озерного и т. д.) и возраста, денудационным равнинам и плато; сформированным на различных по составу и условиям залегания породах; эрозионно-тектоническим горам и нагорьям с различной выраженностью в рельефе древних тектонических структур. Инженерно-геологические особенности основных геоморфологических элементов суши приведены выше. Для многих регионов, например для Западно-Сибирской низменности, Русской равнины, Кавказа, Забайкалья и других, они описаны достаточно подробно. При более детальном районировании выделяются области 2-го, 3-го и т. д. порядков, обычно по морфологическим характеристикам (плоские, холмистые, холмисто-грядовые и другие равнины и плато, горные массивы и ориентированные хребты с различным развитием древних поверхностей выравнивания, в различной степени переработанные ледниковой экзарацией и т. д.).

В практике региональных инженерно-геологических исследований часто ограничиваются описанием этих типов рельефа и их форм, не реконструируя историю развития рельефа или не учитывая ее (в случае, когда она реконструирована предыдущими исследованиями) при инженерно-геологической оценке местности. Подобный подход, несомненно, обедняет инженерно-геоморфологический анализ и часто затушевывает особенности геоморфологии, имеющие большое значение для инженерно-геологической оценки той или иной области. В данном случае в полной мере справедливо приведенное ранее положение: одинаковыми (или близкими) в инженерно-геологическом отношении по геоморфологическому признаку являются те территории, которые имеют одинаковую (или близкую) историю развития рельефа.

Наиболее четко это проявляется при инженерно-геологическом изучении речных долин. Начало подобному изучению положили исследования погребенных долин Г. И. Горецкого в Волго-Камском бассейне в связи с проектированием каскада крупных гидроэлектростанций в конце 40-х — начале 50-х годов. Реконструкция истории развития речных долин Волго-Камского бассейна необходима не только для выбора оптимальных участков размещения гидроузлов, но и для оценки и прогноза таких опасных явлений, как карст и оползни. Классическими в этом отношении являются работы Д. С. Соколова и А. Г. Лыкошина в районе Павловской ГЭС на р. Уфе. Анализ истории формирования долин в течение неоген-четвертичного времени позволил авторам выявить основные этапы карстового процесса, установить закарстованность склонов и днища, пути обходной фильтрации и, в итоге, правильно оценить степень влияния карста на инженерно-геологические условия строительства и эксплуатации гидроузла. Приведенный пример опубликован во многих работах и хорошо известен специалистам.

Не менее убедительна значимость изучения истории развития долины и для оценки устойчивости оползневых склонов. Об этом свидетельствуют исследования Г. С. Золотарева на Средней Волге в начале 50-х годов. Учитывая особенности формирования долины реки на этом отрезке, в частности, устойчивое ее смещение на запад, автор выявил участки оползневых склонов разного возраста, находящиеся на различных стадиях развития, различные по степени устойчивости, и дал обоснованный прогноз поведения их после создания Волжских водохранилищ. Тот же историко-геологический подход последовательно применялся им при оценке устойчивости склонов в Крыму, на Кавказе, в Средней Азии и Карпатах и в настоящее время стал общепринятым этапом инженерно-геологического анализа при изучении оползней.

Огромное значение анализ истории геологического развития территории и, в частности, истории формирования рельефа, имеет для прогноза антропогенных изменений геологической среды. В этом отношении интересны работы, выполненные экспедициями Мингео РСФСР на территории г. Москвы и Московской области при ее комплексном гидрогеологическом и инженерно-геологическом изучении. Эти работы позволили провести палеогеографический анализ территории Подмосковья и показать его значение для инженерно-геологического районирования.

В континентальный период история геологического развития региона оказала существенное влияние на его современный инженерно-геологический облик. Выделяются три главных периода: доюрский (пермь — ранняя юра), дочетвертичный (конец позднего мела — плиоцен) и четвертичный. Доюрский период захватывает геологически весьма продолжительную часть времени, в течение которой в каменноугольных отложениях в Подмосковье сформировалась довольно пологая равнина, расчлененная сетью долин. Доюрская гидросеть на территории г. Москвы, впервые выявленная Б. М. Даньшиным, в настоящее время изучена достаточно хорошо.

Днища доюрских рек в современном рельефе находятся на глубинах 120—100 м в пределах так называемой «главной Московской долины» и на глубине 80—50 м в ее притоках — Мытищинской и Чертановской; под руслом современной Москвы-реки оно опущено на 20—40 м. Доюрский рельеф сильно денудирован, поэтому восстановить глубину доюрских долин невозможно. По имеющимся данным, уклоны их днищ в 2—3 раза превышали современные, а суммарный денудационный срез составлял 250—300 м. Несомненно, что в этот период интенсивно протекали процессы карстообразования в известняках карбона, что подтверждается площадным развитием карстовых пустот и каверн — в кровле каменноугольных отложений до глубины 40—60 м. Карстовые котловины, относительная глубина которых до 25 м, установлены на многих участках главной доюрской долины.

Современная долина Москвы-реки сдвинута к север-северо-востоку относительно доюрской и лишь в нижнем течении их долины совпадают. В современном рельефе доюрские долины не выражены, они погребены под толщей мезозойских и четвертичных осадков, но влияние их на инженерно-геологическую обстановку бесспорно: в их бортах и днищах, как правило, наблюдается особенно интенсивная закарстованность каменноугольных отложений. Эти зоны повышенной закарстованности, большей частью не совпадают с доледниковой и современной гидросетью, и только знание истории доюрского рельефа может помочь изыскателям правильно вести разведочные и опытные работы.

Еще большее инженерно-геологическое значение имеют доледниковые долины. В континентальный период, начавшийся в конце мела и продолжавшийся до начала плейстоцена, сформировался зрелый, разработанный эрозионный рельеф. На большей части Подмосковья были уничтожены меловые отложения, а на отдельных участках размыты и юрские. В местах выхода на поверхность известняков развивался карст. Особенно интенсивно карстовые процессы протекали вдоль речных долин. Доледниковые долины были глубокими, узкими, практически лишены отложений. Днища долин лежат ниже современных в Подмосковье на 50—60 м, на территории города — на 15—20 м. Все это говорит о том, что в плиоцене территория испытывала интенсивные дифференцированные поднятия, обусловившие интенсификацию карстового процесса.

Дочетвертичные долины Москвы-реки и ее притоков близки к современным их очертаниям. Поэтому участки, на которых дочетвертичные врезы вскрыли каменноугольные известняки и особенно сильно закарстованы, в ряде случаев оказались смещенными от современной реки на значительное расстояние и погребены под комплексом ледниковых, преимущественно флювиогляциальных песчаных отложений. В плейстоценовый период истории формирования рельефа Подмосковья ведущая роль принадлежит четвертичным оледенениям. В результате сложных соотношений циклов эрозии, ледниковой и речной аккумуляции на разных этапах этого периода, пространственных взаимоотношений древних и современ-

ных долин сложились его современные инженерно-геологические условия, главной особенностью которых является весьма изменчивый по фациальному составу и мощностям разрез четвертичных отложений как на междуречных пространствах, так и особенно в долинах. В последних в границах единого геоморфологического элемента (например, III надпойменной террасы) могут быть встречены самые разнообразные типы строения геологической среды. В одних случаях четвертичный комплекс залегает на юрских глинах, в других — на каменноугольных известняках; в разрезе плейстоцена в одних случаях абсолютно преобладают пески (аллювиального и флювиогляциального генезиса), в других — вскрывается слоистая толща чередующихся моренных глинистых и водных песчаных отложений.

Естественно, что все эти особенности строения долины, обусловленные ее геологической историей, отражены в схеме инженерно-геологического районирования территории г. Москвы и Московской области. Еще более важными они оказались при инженерно-геологической типизации территории для регионального прогноза ее техногенных изменений под воздействием инженерных сооружений и других видов хозяйственной деятельности, когда выяснилось, что активизация некоторых современных геологических процессов (в первую очередь суффозионно-карстовых), изменение качества подземных вод и другие явления наиболее часто приурочены к погребенным долинам, унаследованным современной речной сетью. Выявленные закономерности заставили отказаться от традиционных приемов инженерно-геологического районирования и выполнить его путем выделения различных типов строения геологической среды, наиболее полно учитывающих всю геологическую историю региона.

Подобный подход в последнее время все больше применяется и при мелкомасштабных инженерно-геологических исследованиях. Например, он оказался достаточно эффективным при создании серии карт изменения геологической среды под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности на территории Восточной Европы и Нечерноземной зоны РСФСР. Опыт составления этих карт показал, что анализ геологической истории позволяет вскрыть причинность (природу) связей между отдельными компонентами инженерно-геологической обстановки, оценить тесноту этих связей, объяснить аномалии и, в общем случае, более глубоко анализировать инженерно-геологические закономерности, как существующие, так и ожидаемые при освоении геологической среды.

## ГЛАВА 20.

### СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

#### КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

Первая классификация горных пород при региональных инженерно-геологических исследованиях была предложена И. В. Поповым в 1947 г. и уточнена и дополнена перед изданием монографии «Инженерная геология СССР» в 1973 г.

Принципиальная классификационная схема И. В. Попова выдержала испытание временем. Эта схема принята при государственном инженерно-геологическом картировании территории СССР. Те же принципиальные положения отражены в классификациях, рекомендованных рабочей комиссией Международной ассоциации инженеров-геологов (МАИГ) в методическом руководстве по инженерно-геологическому картированию, составленном по поручению ЮНЕСКО для развивающихся стран. Вместе с тем в инженерно-геологической литературе все еще появляются публикации, в которых критикуется принцип построения классификации И. В. Попова, отмечается ее малая инженерно-геологическая информативность по сравнению с классификациями грунтов, например, Ф. П. Саваренского, В. Д. Ломтадзе, СНИП и отдается предпочтение последним. Неправомерность подобного вывода очевидна. Она неоднократно отмечалась Г. А. Голодковской, обстоятельно рассмотрена Г. К. Бондариком. Это совершенно разные классификации. Они имеют разные цели и отражают различный подход к изучаемому объекту. Возможно, неудачное название «классификация горных пород» послужило одной из причин рассмотрения ее некоторыми авторами в одном ряду с классификациями грунтов. Классификация И. В. Попова основана на последовательном вычленении в геологическом пространстве тел, характеризующихся, по мере членения, все большей инженерно-геологической однородностью, тогда как все классификации грунтов (общие, частные, специальные) построены без учета условий нахождения выделяемых по тем или иным признакам грунтов в геологическом пространстве.

В классификационной схеме И. В. Попова [35], как известно, выделены формации, геолого-генетические комплексы (макрофации и фации), литолого-петрографические комплексы (микрофации), петрографические (литологические) типы пород, инженерно-геологические виды и разновидности пород.

В настоящее время в инженерной геологии под формацией единодушно понимается геологическое тело, сформировавшееся в определенной тектонической и физико-географической обстановке, пережившее в дальнейшем определенную геологическую историю и представляющее собой комплекс парагенетически связанных по-

род, слоев, пачек и т. д. (генетических комплексов отложений), взаимное расположение которых определяет структуру формации.

Наименование геологических тел двух последующих рангов менее бесспорно. В самом названии «геолого-генетический комплекс» подчеркивается, что речь идет о геологических телах, имеющих не только одинаковый генезис, но и одинаковый возраст. Подобный акцент может привести к неправильному представлению о том, что возраст отложений важен при инженерно-геологическом анализе, лишь начиная с этого уровня исследования (или только на этом уровне исследования). В действительности, возраст каждой конкретной формации имеет не меньшее значение в процессе их исследований, так как во многом определяет ее современный инженерно-геологический облик. Неправомерно, по-видимому, и приравнивать геолого-генетические комплексы к макрофациям (фациям). При всей неопределенности последнего термина в практике геологических и инженерно-геологических исследований в качестве фаций принято выделять геологические тела более низкого ранга, чем генетические типы отложений. По приведенным соображениям представляется более строгим на данном таксономическом уровне выделять генетический комплекс отложений, понимая под последним часть формации — единое в генетическом отношении тело, сформировавшееся в одинаковой физико-географической (физико-химической для магматических и метаморфических образований) обстановке и сложенное определенным набором фаций, формирующих его внутреннюю структуру. В этом случае фации пород смещаются на следующий таксономический уровень и выделяются как части генетического комплекса — геологические тела одного генетического типа и возраста, образованные в одинаковых физико-географических (физико-химических) условиях и отличающиеся от других фаций того же генетического типа динамикой среды породообразования (например, русловые, пойменные, старичные и другие фации аллювия; амфиболовая, гиперстенная и другие фации метаморфических толщ и т. д.).

«Принципиальная схема классификации горных пород при региональных инженерно-геологических исследованиях» И. В. Попова представляет собой по существу реализацию системного подхода к изучению геологических объектов в инженерной геологии.

В практике региональных инженерно-геологических исследований, в научных публикациях, к сожалению, нередко не реализуются возможности, заложенные в классификации геологических тел. Обычно, определив объем геологической формации, исследователи переходят непосредственно к характеристике инженерно-геологических свойств слагающих ее пород. Подобный прием используется и при изучении континентальных четвертичных отложений, когда характеризуется генетический тип, а затем описываются состав и свойства пород, минуя фации. Подобный подход неверен методологически и обедняет инженерно-геологическую информацию. Инженерно-геологический анализ должен проводиться последовательно, на всех иерархических уровнях. Только в этом

случае может быть получена информация, необходимая для установления закономерностей распределения в земной коре геологических тел с одинаковыми инженерно-геологическими свойствами. Детальность и методы инженерно-геологического анализа зависят от уровня рассмотрения. Важнейшее значение при этом имеют представления о размерах, содержании и взаимном расположении структурных элементов, определяющих степень однородности геологического тела на каждом иерархическом уровне. На уровне формаций в качестве структурных элементов выступают генетические комплексы, набор и взаимоотношения которых являются признаками однородности формации. Следовательно, инженерно-геологический анализ на этом уровне должен заключаться в выделении генетических комплексов, установлении их положения в структуре формации, выявлении изменчивости этой структуры в разрезе и по латерали.

Структурные элементы генетических комплексов — фации, следовательно, итогом инженерно-геологического анализа на этой стадии должно явиться представление о фациальной изменчивости толщи. На следующем уровне исследуются состав пород и внутреннее строение фации, и лишь затем правомерно изучать свойства отдельных грунтов.

Важное методологическое значение имеет стандартизация характеристик геологических тел при региональном описании территории, ее инженерно-геологическом картировании. Такими обязательными характеристиками для геологических формаций, например, являются тектонический класс формаций, возраст формаций, принадлежность их к определенным структурным элементам земной коры, объем (размеры), характер границ с соседними формациями, породный состав (литологический тип), дислоцированность, внутренняя структура, степень и характер постгенетических изменений, общие закономерности изменчивости состава и строения формаций. Для генетических комплексов отложений обязательно указывать принадлежность к определенной формации со всеми характеристиками последней, приведенными выше, а также положение комплекса в структуре формации, его объем, внутреннюю структуру, фациальную изменчивость, для континентальных четвертичных отложений — приуроченность к определенным элементам и формам рельефа и климатическим зонам.

При инженерно-геологическом описании фаций необходимо определить их положение в структуре генетического комплекса, морфологическую характеристику фации; оценить ее внутреннюю однородность по составу, условиям залегания, важнейшим инженерно-геологическим свойствам пород, слагающих фации. Фации при региональных исследованиях можно рассматривать как инженерно-геологический элемент, в границах которого допустим статистический анализ состава, структуры и свойств грунтов (горных пород), слагающих ее.

Особое внимание, которое уделено здесь геологическим телам на уровне формаций, генетических комплексов и фаций, вовсе не

значит, что последующие таксономические единицы рассматриваемой классификационной схемы (петрографический тип, инженерно-геологический вид и инженерно-геологическая разновидность пород) не относятся к категории геологических тел. Значение и информативность последних достаточно полно изложена И. В. Поповым [35].

## **ЗНАЧЕНИЕ УЧЕНИЯ О ФОРМАЦИЯХ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ**

Одна из наиболее важных теоретических и практических проблем региональной инженерной геологии — выявление и исследование связей между составом, состоянием и свойствами горных пород и закономерностями их распределения в земной коре. Наиболее полно и успешно эта проблема разрабатывается в учении о формациях, которое связывает порообразование с геотектоникой земной коры. Значение учения о формациях для инженерной геологии было показано И. В. Поповым и в настоящее время широко применяется в региональных исследованиях.

Использование учения о формациях в инженерно-геологических исследованиях открывает новые возможности в познании характера связей между свойствами геологической среды — компонентами инженерно-геологических условий. Формационный анализ позволяет установить закономерности образования геологических тел, обладающих определенной инженерно-геологической структурой и свойствами, выяснить закономерности распространения таких геологических тел в земной коре, выявить зависимости между формированием инженерно-геологических свойств горных пород и геологической историей того или иного региона. Тесная связь формаций с тектоническими структурами позволяет на основе общегеологических материалов установить особенности залегания и тектонической нарушенности горных пород того или иного формационного комплекса. Совершенно закономерно, что преимущества формационного анализа при изучении толщ горных пород особенно убедительно проявляются при региональных исследованиях, когда сравниваются комплексы пород широкого стратиграфического диапазона, залегающих в различных тектонических регионах.

Применение формационного метода в инженерной геологии сопряжено, однако, с трудностями. Многочисленные определения понятия «формация», отсутствие общепринятых классификаций геологических формаций и их наименований, несомненно, задерживают внедрение формационного анализа в практику региональных инженерно-геологических исследований.

Широкое использование понятия о формациях в современной геологии справедливо связывают с именем Н. С. Шатского. В 1945 г. он дал известное определение формации: «Формациями мы называем такие естественно выделяемые комплексы, сообщества или ассоциации горных пород, отдельные части которых (породы, слои, отложения) тесно, парагенетически связаны друг с дру-



гом, как в возрастном (переслаивание, последовательность), так и в пространственном отношении (фациальные смены и др.)». Такая формулировка, а также подчеркивание самим Н. С. Шатским и особенно его учениками «эмпирического» подхода к выделению формаций позволили критиковать Н. С. Шатского за отсутствие историко-генетического подхода к формациям. Вряд ли, однако, эта критика целиком справедлива. Н. С. Шатский по существу не отвергал генетического подхода к исследованию формаций. Об этом свидетельствуют следующие его пояснения: «Формации связаны с определенными тектоническими структурами и изменяются с изменением тектонического режима и структурного развития земной коры». По его представлениям, «...характер формаций определяется несколькими факторами, главнейшими из них являются тектоника, тектонические процессы и движения, выражающиеся в рельефе и вулканизме и, следовательно, в мощности слоистых образований, в их составе, структуре, текстуре и т. д.; вторым фактором надо считать климат, косвенным образом также связанный с тектоникой и являющийся одним из главнейших условий образования различных типов формаций. Наконец, свойства формаций определяются также возрастом, временем их образования, что связано с общим развитием земной коры».

Об определяющем влиянии на формирование формаций как тектонического режима, так и климатической обстановки говорится и в трудах Н. М. Страхова: «...Сохранение на достаточно большом участке земной коры в течение длительного времени одного и того же тектонического режима, при одинаковых (а точнее — достаточно близких) климатических и гидрологических условиях (или при закономерно повторяющейся смене их) приводит к формированию единого в структурно-вещественном отношении сообщества горных пород, которое мы называем формацией горных пород». По определению Н. Б. Вассоевича, геологическая формация (геогенерация, по его определению) «это — крупный комплекс отложений, отвечающий свите и чаще ряду свит и характеризующийся определенной общностью в отношении состава, строения и распространения», который сформировался «в определенных палеогеографических условиях, господствовавших на определенном этапе развития определенной геотектонической области (зоны) со свойственным ей режимом и климатом».

Наиболее отчетливо генетическое понимание формаций отражено в определении Г. Ф. Крашенинникова: под формацией он понимает геологическое тело, представленное комплексом генетических типов отложений, парагенетически тесно связанных друг с другом и образовавшихся в единой тектонической и климатической обстановке.

В том же методологическом ключе даны определения формаций магматических и метаморфических пород. По определению Б. Я. Хоревой, метаморфическая формация — это естественно-историческая ассоциация метаморфических пород, возникших в результате регионального метаморфизма осадочных и вулканических

формаций, проявляющегося на определенной стадии данного тектоно-магматического цикла. И, наконец, Ю. А. Кузнецов определяет магматическую формацию как совокупность пород одной петрографической ассоциации, приуроченных к определенной тектоно-магматической обстановке.

Генетическое понимание формаций принимается по существу всеми советскими геологами, так как парагенез, по замечанию В. Е. Хаина, подразумевает не только сонахождение, но и общность происхождения. В этом смысле выделение формаций при региональных инженерно-геологических исследованиях является вполне правомерным. Формация как естественно-историческое геологическое тело обладает следующими главнейшими признаками: 1) каждая геологическая формация состоит из определенного набора горных пород; 2) каждая геологическая формация имеет определенную, присущую только ей внутреннюю структуру, т. е. характеризуется определенным сочетанием слагающих ее пород; 3) каждая геологическая формация занимает совершенно определенное место в современной структуре земной коры. Очевидно, что выделенные по этим признакам геологические тела должны обладать одинаковыми или близкими свойствами, важными и характерными при оценке занимаемого ими пространства в целях выбора места для инженерного строительства, разработки его проекта и выполнения для этого инженерно-геологических изысканий [35].

Инженерно-геологические особенности формации следует рассматривать как «коллективные свойства» данного геологического тела, в соответствии с термином П. Н. Панюкова. Эти инженерно-геологические свойства индивидуальны для каждой конкретной геологической формации и отличают ее от других формаций. Такие свойства формации определяются не только (часто и не столько) физико-механическими свойствами формациеобразующих пород, но и ее структурными характеристиками — мощностью, однородностью, изотропностью, обводненностью, напряженным состоянием и др.

Формацию, как и предлагает Г. Ф. Крашенинников, следует рассматривать как парагенез генетических типов отложений, т. е. как крупное и по физическим, и по стратиграфическим объемам геологическое тело, занимающее наиболее высокий уровень в иерархической схеме: горная порода → фация → генетический комплекс ⇒ → геологическая формация.

Следует полностью согласиться и с соображениями В. Е. Хаина о номенклатуре формаций, сохранив за некоторыми из них исторически сложившиеся названия (меловая, флишевая, молассовая, красноцветная и т. д.). Однако во всех других случаях в названии формации отражаются их состав (как для осадочных, так и для метаморфических и магматических), физико-географические и тектонические условия образования. Именно по этому принципу построены классификации геологических формаций, предложенные В. Е. Хайным [46]. В основу общей классификации геологических формаций им положен тектонический фактор. В работе 1980 г.

В. Е. Хаин достаточно подробно показал, что тектонический фактор универсален, определяет объем и тип осадков, направленность процессов литогенеза, интенсивность и характер вулканизма, энергию рельефа, от которой зависят скорость размыва, переноса и накопления осадков. В той же работе он подчеркнул важную роль климатического фактора, особенно в формировании континентальных и шельфовых отложений (даже предлагаемая в работе классификация названа тектоно-климатической), и стадийность развития структурных элементов земной коры. Сочетание и соотношение перечисленных факторов определяют облик конкретной формации. При этом общий характер формации устанавливается такими факторами, как: 1) общий тектонический режим областей размыва и накопления; 2) положение обеих областей в определенной климатической зоне; 3) состав пород в области размыва. Эти факторы сохраняются постоянными на все время образования формации. Переменными факторами, изменяющимися за время накопления данной формации, являются: 1) соотношение скорости поднятия в области размыва и скорости погружения в области накопления, 2) положение области накопления относительно уровня океана или замкнутого водоема (эвстатические колебания уровня), 3) размер привноса вулканогенного материала (интенсивность вулканизма). Такие факторы определяют переслаивание пород в составе формации.

Методологические положения, изложенные выше, важны при анализе осадочных формаций. Вместе с тем они справедливы и применительно к магматическим формациям. Так, Ю. А. Кузнецов составил классификацию магматических формаций с учетом как тектонического режима (различаются подвижные зоны, устойчивые области, щиты и др.), так и стадии развития того или иного структурного элемента (например, геосинклинальный и орогенный этапы развития подвижных зон).

Таково современное состояние учения о формациях в общегеологическом аспекте. Инженерно-геологическое изучение формаций предусматривает их специализированный анализ. Подобный анализ должен опираться на общие теоретические разработки учения о формациях с учетом главной задачи региональной инженерной геологии — выявления закономерностей распространения в земной коре геологических тел (в данном случае формаций) с одинаковыми (или схожими) инженерно-геологическими особенностями. По нашему мнению, современный инженерно-геологический облик формаций сложился под воздействием тектонических и климатических условий, существовавших в том или ином регионе как во время накопления толщи, так и на всех последующих этапах ее геологической истории. Руководящая роль при этом отводится тектоническому фактору, по которому определяются генезис формации (осадочный, магматический, метаморфический), ее строение (набор генетических или фациальных комплексов) и современное состояние (стадии литогенеза, дислоцированность и т. д.). Влияние тектонического режима на формирование осадочных толщ и слагаю-

ших их пород рассмотрено в главе 2 настоящей работы, роль геологической истории отмечена в главе 19, основные инженерно-геологические особенности главнейших тектонических классов формаций описаны в книге [17]. Такие важнейшие инженерно-геологические характеристики формаций, как их структура (мощность, однородность, слоистость, блочность), характер залегания формациеобразующих пород, относительное количественное участие последних в строении формации, целиком определяются тектоническим режимом и совершенно различны для формаций, образовавшихся в платформенных условиях, в геосинклиналях или в переходных зонах. Тектонический режим определяет и характер изменчивости строения формации, состава и свойств слагающих их пород. Хорошо известно, что в общем случае для платформенных формаций типично закономерное изменение их свойств по глубине (уменьшение пористости, влажности, нарастание плотности) и от прибрежных зон осадконакопления к глубоководным (радиальный сходящийся тип изменчивости). В геосинклинальных толщах не отмечается резких различий в свойствах пород по глубине (исключая, конечно, приповерхностные зоны выветривания и разгрузки), а наибольшая изменчивость наблюдается вкрест простирания тектонических структур. Особенно неоднородны по строению орогенные формации, изменчивость их состава и свойств обусловлена сложным тектоническим планом орогенов, часто она имеет радиальный расходящийся характер.

Действие тектонического фактора универсально. Тектонические процессы контролируют постгенетические изменения как осадочных, так и изверженных пород. Важно при этом отметить, что их определяющая роль отчетливо выступает как в процессах прогрессивного породообразования, т. е. в процессах превращения осадка в горную породу и дальнейшего преобразования последней в ходе прогрессивного литогенеза и метаморфизма, так и при регрессивном ходе литогенетических преобразований — разгрузке и выветривании, выщелачивании и др. Очевидно, и при инженерно-геологическом классифицировании формаций наиболее крупные их таксономические единицы — классы — должны обособляться по тектоническим факторам.

Влияние климатогенных факторов на формирование инженерно-геологических особенностей геологических формаций менее универсально. Наиболее ярко их действие сказывается на минеральном составе пород осадочных формаций. В инженерной геологии стали хрестоматийными примеры различия в свойствах осадочных формаций одного класса, например орогенного, породы которого образовались в гумидных условиях (угленосные) и накопились в аридном климате в бассейне повышенной солености (гипсово-доломитовые, красноцветные и эвапоритовые). Здесь хочется обратить внимание на то, что на данном иерархическом уровне, вероятно, следует учитывать влияние среды, в которой образуется формация, на ее свойства. При этом имеется ввиду не только физико-географическая обстановка (морская или континентальная), но и физи-

ко-химические особенности среды (окислительно-восстановительный потенциал, рН, состав флюидов и др.), от которых зависят процессы минералообразования, т. е. в значительной степени состав формациеобразующих пород. При таком «экологическом» подходе роль физико-географических и физико-химических факторов в формировании инженерно-геологического облика формаций становится более универсальной, так как указанные факторы существенны не только для осадочного породообразования, но и для формирования вещественного состава и строения магматических и метаморфических толщ. С этих позиций естественно разделение классов формаций на подклассы по климатогенным или, правильнее, по «экологическим» признакам.

Совместное действие эндогенных и экзогенных процессов на той или иной стадии развития различных тектонических элементов земной коры определяет петрологический (литологический) тип конкретной формации — объект непосредственного инженерно-геологического изучения описываемых геологических тел. Инженерно-геологическое изучение конкретных литологических типов формаций показывает, что свойства их зависят от геологического возраста. Это должно быть отражено в инженерно-геологических классификациях формаций.

Совершенно очевидно, что даже общее изучение геологических формаций по приведенной выше схеме позволяет получить обширную информацию об инженерно-геологических особенностях их структуры и свойствах. Однако для полной инженерно-геологической характеристики конкретной формации и оценки ее поведения при взаимодействии с разнообразными источниками техногенного возмущения подобная информация недостаточна. Необходимы прямые признаки, позволяющие охарактеризовать такие важные параметры формации, как ее деформируемость и прочность, влагоемкость и водопроницаемость, водоустойчивость и устойчивость к воздействию агентов выветривания и др. Несомненно, определенные качественные представления о перечисленных свойствах содержатся уже в литологических (петрологических) названиях формаций (карбонатная известняковая, карбонатная доломитовая, гранит-гнейсовая, базальтовая, глинисто-сланцевая и др.). Однако для значительного ряда формаций, в первую очередь терригенных, подобного названия недостаточно. В самом деле, морская терригенная формация платформенного чехла может быть представлена песками и глинами (например, мезозойская формация Русской плиты), но также может быть сложена и песчаниками, и аргиллитами (например, глубокие горизонты кембрийской формации того же региона), т. е. обладать иными инженерно-геологическими свойствами.

Для отражения указанных особенностей автором было предложено различать инженерно-геологические виды формаций, которые И. В. Попов предлагает называть эпиформациями. Номенклатура инженерно-геологических видов формаций требует разработки. Поэтому для их наименования нельзя использовать понятия,

заимствованные из классификаций Ф. П. Саваренского и В. Д. Ломтадзе, так как формация — единое геологическое тело — может быть сложена грунтами различных классов. Подробно данный вопрос рассмотрен Г. К. Бондариком в 1981 г. [4].

Более правильно связывать инженерно-геологические особенности осадочных формаций со степенью литификации слагающих их пород. В этом случае могут быть выделены три вида терригенных формаций: слаболитифицированные, умереннолитифицированные и сильнолитифицированные. К первому виду относятся толщи нецементированных уплотненных песчано-глинистых пород современных морских отложений, большинство континентальных четвертичных образований, лёссов и т. д. Ко второму могут быть отнесены формации, сложенные уплотненными как нецементированными (плотные глины), так и слабоцементированными (слабые песчаники) породами. Именно они характерны для верхних структурных этажей чехла древних платформ и молодых плит. Наконец, третий вид образуют осадочные формации, породы которых претерпели длительный и глубокий катагенез. Они сложены крепкими песчаниками, алевролитами и аргиллитами, обычно залегают в нижних структурных этажах платформенного чехла, характерны для горно-складчатых областей. Естественно, литологические изменения в разных породах одной и той же формации проявляются различно. Одни породы (глины) особенно чутко реагируют на изменения обстановки в процессе литогенеза, другие (известняки) уже на ранних стадиях катагенеза приобретают устойчивые кристаллизационные связи, помогающие им сохранять свой облик без существенных катагенетических преобразований. Существенно, что при подобном подходе все породы данной конкретной формации претерпели одинаковый литогенез и находятся на одной и той же его стадии. Указанный подход наиболее полно реализует основной методологический принцип региональной инженерной геологии — представления о том, что современный инженерно-геологический облик формации есть результат ее геологической истории.

В соответствии с изложенными положениями в табл. 24 приведена классификация геологических формаций с инженерно-геологическими целями. В основу классификации положены некоторые идеи В. Е. Хаина, разработанные в 1980 г.

### **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НЕКОТОРЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ ОТЛОЖЕНИЙ И ИХ ФАЦИИ**

Большое значение генетического подхода выявляется при инженерно-геологическом изучении поверхностных новейших отложений, а среди них — четвертичных континентальных, сформировавшихся в непродолжительный этап геологической истории Земли и не подвергшихся существенным постгенетическим изменениям. Эти отложения сохранили наиболее четкую связь с обстановкой осадконакопления: современными или древними элементами и формами рельефа земной поверхности и особенностями новейших тектониче-

## Классификация геологических формаций с инженерно-геологическими целями

Иерархический уровень. Формация	Признаки классифицирования	Получаемые инженерно-геологические характеристики	Примеры наименований
Класс	Тектонические условия времени образования	Мощность и структура формации. Общие закономерности изменчивости строения и состава	Платформенные, геосинклинальные, переходные (орогенные)
Подкласс	Физико-географические (физико-химические) условия среды	Минералогические особенности формации образующих пород, важные для инженерно-геологической оценки формации	Аридные, гумидные
Тип	Литологический (петрографический) состав	Литологическая (петрографическая) характеристика пород, слагающих формацию	Песчано-глинистые, карбонатные, флишевые и др. Слитит-кератофировые, гранитоидные, гипербазитовые и др., гранит-гнейсовые, глинисто-сланцевые, зеленосланцевые и др.
Подтип	Возраст отложений	Длительность и характер постгенетических преобразований	Нижнекембрийские, мезозойские, девонские и др.
Вид (эпиформация)	Степень постгенетических изменений	Современные инженерно-геологические свойства формации	Неуплотненные, несцементированные; уплотненные, слабосцементированные и др.; слабоитаморфизованные, среднетаморфизованные, сильнометаморфизованные

ских движений, климатической обстановкой и, главное, динамикой процесса аккумуляции. Поэтому для осадочных четвертичных отложений наиболее отчетливо прослеживается зависимость инженерно-геологических свойств пород от их генезиса и фациальных условий образования.

Учение о генетических типах отложений в геологии достаточно хорошо разработано в трудах А. П. Павлова, Н. И. Николаева, Е. В. Шанцера, Г. И. Горецкого, К. И. Лукашева, Ю. А. Лаврушина и др. Общепризнанной в основном считается классификация генетических типов континентальных отложений Е. В. Шанцера [49], приведенная в табл. 25.

В трудах В. А. Приклонского, И. В. Попова, Е. М. Сергеева, а также Г. А. Голодковской, В. Т. Трофимова, И. С. Комарова, П. И. Фадеева, Г. А. Сулакшиной, А. В. Миневрина и других показано, насколько важен генетический подход к изучению инженерно-геологических особенностей горных пород.

Генетический тип отложений обуславливает такие важнейшие инженерно-геологические особенности толщи пород, как ее строение и состав, условия и формы залегания, соотношение с отложениями других генетических типов, сочетание пород определенного фациального и гранулометрического состава в разрезе и в плане, преобладание определенных литологических типов пород, характер слоистости, переслаивания и особенности текстуры, изменчивость мощностей. Все это определяет физико-механические свойства пород и закономерности их изменчивости в массиве. Так, например, пролювий и аллювий сложены одинаковыми петрографическими типами пород, являются образованиями русловых потоков, но сформированными в разных динамических условиях среды, что в корне изменяет закономерности строения их толщ, сортировку и окатанность частиц, характер слоистости, а в связи с этим инженерно-геологические особенности и закономерности их изменчивости. Элювий, делювий, торфяники и основные морены — все это типы отложений специфического состава, строения, свойств, связанных в первую очередь с условиями их накопления.

Каждый генетический тип отложений — сложное закономерное сочетание осадков, на образование которых влияют определенные особенности динамики среды осадконакопления, обусловленные их приуроченностью к различным элементам и формам рельефа или стадиям развития. Поэтому очень важно выделить фаций, что позволяет обособить толщи более однородные по литологическому составу, а следовательно, и по их инженерно-геологическим свойствам. Такой подход очень важен в инженерно-геологическом изучении континентальных отложений. В этом можно убедиться на основании данных работ С. И. Черноусова, А. И. Сергеева, Д. Г. Зилинга, В. И. Бехера и др. Наиболее полно изучены инженерно-геологические особенности фаций аллювия, пролювия, делювия, а также торфяников.

Аллювий — один из наиболее распространенных генетических типов отложений среди континентальных осадочных формаций лю-



Таблица 25

Классификация генетических типов отложений континентального осадочного комплекса. По Е. В. Шанцеру

Класс	Ряд	Группа, подгруппа	Генетический тип
Коры выветривания	Элювиальный	Элювиальная (элювий)	Климато- и литогенные типы элювия
		Почвы Автоморфные	Зональные типы автоморфных почв
		Гид оморфные	Интразональные типы гидроморфных почв
Осадочные отложения	Субаэрально-фитогенный	Автохтонных торфяников	Низинные торфяники Верховые торфяники
	Склоновый (коллювиальный)	Гравитационная Коллювия обрушения	Обвальные накопления Осыпные накопления
		Коллювия сползания	Оползневые накопления (делювий) Солифлюкционные накопления (дефлюксий, солифлюксий)
	Водный (аквальный)	Делювиальная (коллювия смывания)	Делювий
		Русловых водных потоков (флювиальная)	Аллювий Проллювий
		Озерная (лимническая)	Озерные накопления (лимний)
	Подземно-водный (субтермальный)	Пещерная (спелеогенная)	Терригенные и натечные типы пещерных отложений
Отложения источников (фонтанальная)		Известковые туфы, травертины	

Класс	Ряд	Группа, подгруппа	Генетический тип
Осадочные отложения	Ледниковый (гляциальный)	Собственно ледниковая (ортогляциальная)	Основные (донные) морены Абляционные морены Краевые морены
		Водноледниковая (пара- гляциальная) Ледниково-речная (флю- виогляциальная)	Внутриледниковый (интрагля- циальный). Приледниковый (пе- ригляциальный)
		Ледниково-озерная (лимногляциальная)	Ледниково-озерный (лимногля- циальный)
	Ветровой (эоловый)	Перевейные отложения (перфляционная)	Эоловые (перевейные) пески
		Навеянные отложения (суперфляционная)	Эоловые (навеянные) лёссы

бого возраста, в том числе новейших и особенно четвертичных. Исчерпывающее изучение закономерностей его формирования и строения проведено Е. В. Шанцером на примере аллювия равнинных рек умеренного пояса, обладающего наиболее характерными чертами строения. Общие закономерности, присущие аллювию равнинных рек, видоизменяются в той или иной степени в зависимости от тектонического режима, геоморфологических и климатических условий, режима стока и наносов.

Теоретические и методические вопросы изучения инженерно-геологических особенностей аллювия рассмотрены в работах В. А. Приклонского, И. В. Попова, В. Д. Ломтадзе, Е. М. Сергеева, И. С. Комарова, а по отдельным регионам в монографии «Инженерная геология СССР», в работах П. И. Фадеева, С. И. Черноусова, В. И. Бехера и многих других. В разрезе аллювия по инженерно-геологическим особенностям прежде всего четко обособляются толщи руслового и пойменного аллювия, а среди них отдельные фации.

Отложения руслового аллювия наименее дисперсны. По составу преобладают кварцевые пески. Свойства их зависят от формы зерен, степени их окатанности, примеси глинистого материала и естественного сложения. Крупнообломочные отложения пристрежневой фации, подстилающие аллювий, практически несжимаемы, имеют самое плотное сложение и наиболее водопроницаемы. В русловом аллювии снизу вверх по разрезу вместе с увеличением дис-

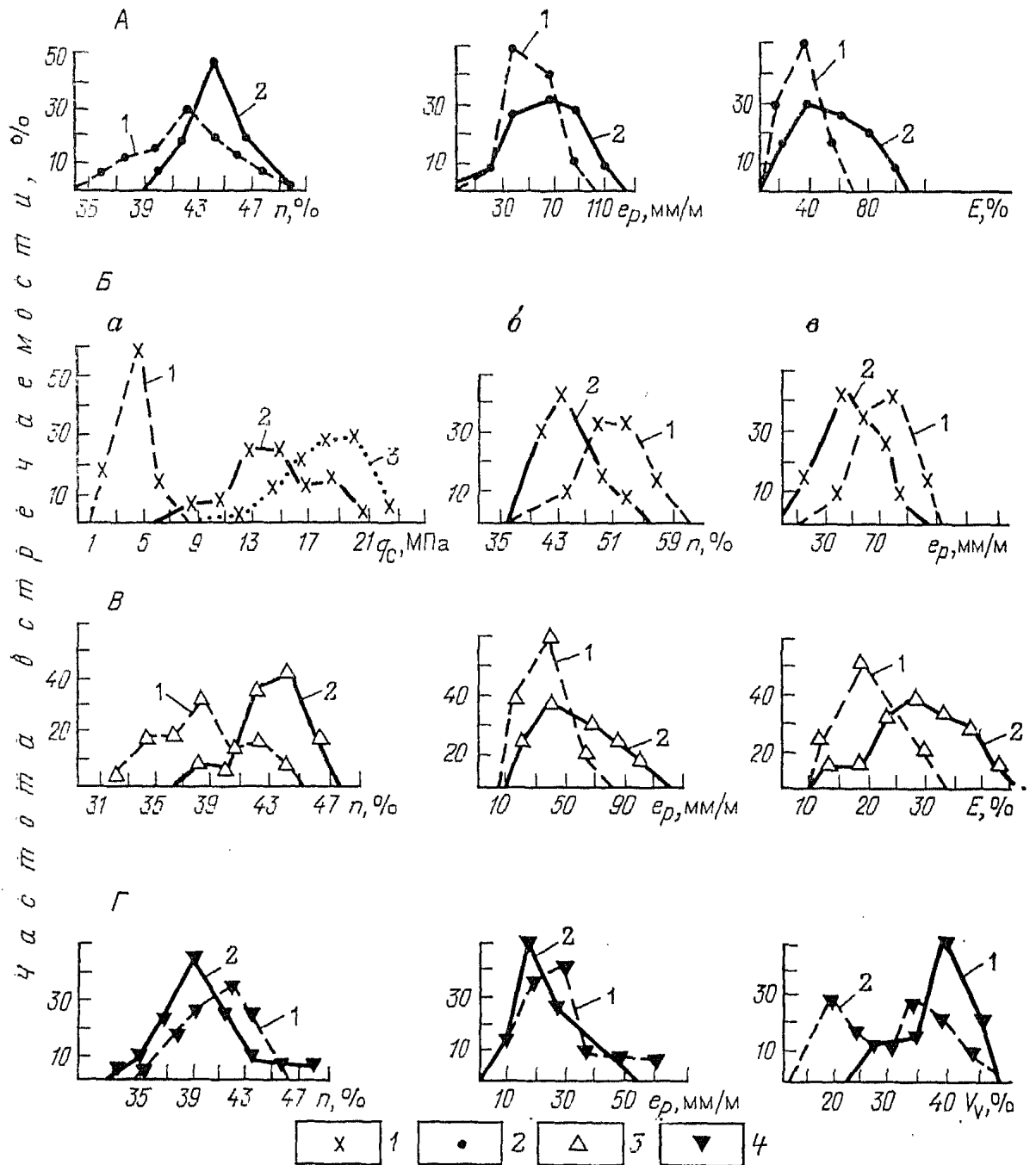


РИС. 39. Полигоны распределения значений показателей свойств грунтов фаций некоторых генетических типов континентальных отложений для районов Общего Сырта. По В. И. Бехеру.

Генетические типы отложений: А — делювиальные (1 — фация средней части делювиального шлейфа, 2 — периферическая фация); Б — аллювиальные (а: 1 — фация прирусловых валов, 2 — фация прирусловой отмели, 3 — пристержневая фация; б, в: 1 — фация вторичных водоемов поймы, 2 — старичная макрофация); В — аллювиальные (1 — фация приречной поймы, 2 — фация внутренней поймы); Г — озерные (1 — прибрежная фация, 2 — фация внутренних частей озера). Возраст отложений: 1 — современные, 2 — верхнечетвертичные; 3 — среднечетвертичные, 4 — апшерон-нижнечетвертичные;  $n$  — пористость,  $e_p$  — модуль осадки,  $E$  — относительная просадочность,  $q_c$  — сопротивление конуса при статическом зондировании,  $V_v$  — объемная усадка

персности происходит уменьшение плотности сложения и объемной массы скелета, увеличение пористости и углов естественного откоса. Плотность сложения песков повышается с возрастом террас.

Наиболее тонкозернистые и глинистые пески фации прирусловых валов, а также сезонные прослойки заиления русловых отмелей способствуют некоторой сжимаемости верхних горизонтов руслового аллювия. Коэффициент фильтрации песков руслового аллювия значителен (на реках Оби и Иртыше достигает 37 м/сут). Наибольшая водопроницаемость наблюдается параллельно слоистости, а минимальная — перпендикулярно. Пойменный аллювий также разнороден по фациальному составу, строению и инженерно-геологическим особенностям. В направлении от русла к притеррасной зоне наблюдается четкое увеличение дисперсности пород. Аллювий приречной зоны, имеющий наименее дисперсный состав, характеризуется среди пойменных отложений наименьшей сжимаемостью и наименьшим модулем осадки (рис. 39). Отложения внутренней зоны поймы отличаются повышенным содержанием окислов железа и возрастанием содержания воднорастворимых солей. Ухудшаются показатели их физико-механических свойств — понижаются значения объемной массы скелета, повышаются пористость, сжимаемость, относительная просадочность.

Старичный аллювий и отложения вторичных водоемов поймы богаты органическими остатками и содержат закисные формы железа. По данным С. И. Черноусова, высокое содержание органических кислот способствует большой скорости коагуляции минеральных и органических коллоидов, что ведет к образованию осадков низкой плотности. Они характеризуются наихудшими показателями физико-механических свойств среди аллювиальных отложений, причем показатели свойств ухудшаются от старичных отложений к отложениям вторичных водоемов: уменьшается их плотность, возрастают пластичность, пористость, сжимаемость (см. рис. 39). Водопроницаемость этих пород очень мала, что вызывает медленную осадку сооружений.

Необходимо подчеркнуть также, что аллювий современных пойменных террас характеризуется наибольшей изменчивостью показателей свойств пород и наиболее тесной их связью с фациальными различиями по сравнению с более древними аллювиальными отложениями. Это вызвано начальной стадией формирования структурных свойств в этих породах. Молодые осадки современных пойм отличаются повышенной активностью глинистых частиц, имеют наихудшие показатели физико-механических свойств. Глинистые отложения в большинстве случаев полностью водонасыщены, поэтому их влажность определяется пористостью.

Для отложений террас, прошедших начальные стадии литогенеза, характерны более стабильные показатели свойств пород. Пойменный аллювий террас, особенно высоких, характеризуется достаточно благоприятными показателями физико-механических свойств: консистенция пород твердая и полутвердая, сцепляемость средняя и повышенная, водопроницаемость малая.

Верхняя часть разреза пойменного аллювия террас часто представлена лёссовидными суглинками, обладающими в разной степени просадочными свойствами. Они характеризуются невысокой водопрочностью, повышенной сжимаемостью.

Основная особенность пролювиальных отложений и их отличие от аллювиальных — радиальная механическая и фациальная дифференциация, выражающаяся в концентрической зональности в плане, направленной от вершины конуса выноса к периферии, в смене грубых галечных или щебнистых накоплений более тонкозернистыми осадками до супесей и суглинков, иногда лёссовидного облика.

Зоны, выделенные Е. В. Шанцером в пролювии по условиям формирования и особенностям геологического строения, отличаются по физико-механическим свойствам слагающих их пород и инженерно-геологическим условиям территории, что было показано в работах В. А. Приклонского, П. И. Фадеева и др. Наиболее благоприятны инженерно-геологические условия вершинной зоны крупных конусов выноса, сложенной галечниками. Галечники имеют большую водопроницаемость, высокое сопротивление сдвигу, практически несжимаемы, грунтовые воды в них залегают глубоко и слабоминерализованы.

Конусы временных потоков сложены плохо сортированным, плохо промытым, более глинистым материалом с низкой пористостью, часто с плохой водопроницаемостью. Они содержат воднорастворимые соли. Периодическое пересыхание способствует цементации и уплотнению пород. Грубозернистые прослои могут содержать напорные воды.

В периферической зоне отрицательным моментом является близкое залегание грунтовых вод, заболачивающих местность, их сильная засоленность у дневной поверхности. Широкое развитие тонкодисперсных засоленных, а также лёссовидных грунтов определяет специфические инженерно-геологические особенности и особые условия строительства в районах этой зоны. Глинистые засоленные породы при увлажнении легко размокают, становятся вязкими, липкими, пластичными, обладают большой гидрофильностью. Растворение кристаллических солей при увлажнении вызывает явление просадок. Лёссовидным породам пролювиальных шлейфов также свойственна просадочность при увлажнении под нагрузкой.

В отложениях делювиальных шлейфов по динамике осадконакопления достаточно четко выделяются три зоны, соответствующие фациальным разновидностям, — привершинная, средней части шлейфа и периферическая. Для строения делювия характерны смена грубых осадков более тонкими при движении от вершины шлейфа к подошве и напластование параллельно поверхности склона. Привершинная фация сложена плохо сортированными щебнистыми или гравелисто-песчанистыми накоплениями. Фация средней части шлейфа состоит из отложений более тонкого состава с ритмичной слоистостью, обусловленной чередованием тонких прослоев

разного гранулометрического состава и разной степени сортировки. Однородные тонкозернистые осадки суглинистого состава характерны для периферической фации. Медленный прерывистый процесс осадконакопления в периферической зоне способствует переработке осадков процессами субаэрального диагенеза и появлению новых текстурных признаков — вертикальной трещиноватости и макропористости.

Выделенные фации заметно отличаются по свойствам пород и инженерно-геологическим особенностям. Так, в районе Общего Сырта с широким развитием делювия отложения периферической фации характеризуются по сравнению с другими более высокими значениями пористости (см. рис. 39), сжимаемости, относительной просадочности и более низкой плотностью сложения.

Инженерно-геологические особенности торфов рассмотрены в работах В. Д. Ломтадзе, Е. М. Сергеева и других, а также в специальной монографии А. И. Сергеева [37]. Развитие торфяных болот — сложный процесс, характеризующийся последовательной сменой растительных группировок, изменением микрорельефа болот и их гидрологического режима, что приводит к образованию различных торфов — низинных и верховых, которые надо рассматривать как фации единого генетического типа.

С инженерно-геологическими целями торфяники разделяются по степени разложения. Верховые слаборазложившиеся торфы ( $R=5-20\%$ ) — непластичные, чрезвычайно и сильно сжимаемые, чрезвычайно влажные (до  $1500\%$ ), пористые ( $18-26\%$ ), недоуплотненные (показатель уплотненности 1,03) с объемной усадкой  $40-74\%$ . Среднеразложившиеся верховые, переходные и низинные торфы — слабопластичные и очень сильно сжимаемые. Хорошо разложившиеся ( $R=30-40\%$ ) — пластичные. Сильноразложившиеся ( $R>40\%$ ) преимущественно низинные, отличаются высокой пластичностью и очень сильной сжимаемостью. Естественная структура верховых торфов слабой степени разложения тесно связана с ботаническим составом. Коэффициент фильтрации уменьшается от верховых торфов к низинным, величина его резко снижается при уплотнении под нагрузкой, после чего торф делается практически водонепроницаемым. Надо отметить также низкую способность торфов к набуханию. Неоднородность состава, строения и состояния торфяных грунтов в значительной степени определяются закономерностями фациальных изменений, которые необходимо учитывать и изучать, особенно при детальном работ.

Знание инженерно-геологических особенностей генетических и фациальных типов пород позволяет наметить самые общие закономерности строения и свойств толщи пород. Однако свойства пород определяются не только их генезисом, но и, как отмечал И. В. Попов, «...условиями и ходом их дальнейшей жизни...». Характер и степень эпигенетических преобразований пород определяются их длительностью, т. е. возрастом пород, а также тектонической обстановкой, положением их в рельефе, климатическими условиями. Стратиграфо-генетические комплексы, учитывающие как

генезис, так и возраст конкретных геологических тел, являются неотъемлемым элементом регионального инженерно-геологического анализа.

Разделение толщи четвертичных отложений и тем более толщи пород новейшего структурно-тектонического этажа только на стратиграфо-генетические комплексы недостаточно для выявления закономерностей изменения инженерно-геологических свойств пород и условий больших регионов, так как существует множество климатических вариантов основных генетических типов, отличающихся спецификой инженерно-геологических особенностей, а также вариантов, связанных с тектонической обстановкой их формирования. Региональный характер закономерных сочетаний генетических комплексов пород связан с ходом новейшего развития данного участка земной коры и в первую очередь с неотектоническими процессами и изменениями климата. Для правильной оценки региональных закономерностей, по-видимому, целесообразно выделить геологические формации новейших континентальных отложений как ассоциаций стратиграфо-генетических комплексов пород, образовавшихся в сходной тектонической и климатической обстановке. Примеры такого расчленения новейших отложений Западной Сибири приведены в работах А. С. Герасимовой, В. М. Семенова, В. Т. Трофимова. Учет принадлежности стратиграфо-генетического комплекса к определенной геологической формации связывает размещение пород с этапами эволюции крупных структурных элементов земной коры и изменений физико-географической обстановки земной поверхности, с ходом историко-геологического процесса в целом.

## ГЛАВА 21.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

#### **РАЙОНИРОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ**

Инженерно-геологическое районирование—специальный вид геологического районирования. Оно рассматривается как один из методов систематизации знаний об инженерно-геологических условиях территории, оценки их неоднородности и сложности. В такой трактовке инженерно-геологическое районирование широко используется на разных стадиях инженерно-геологических исследований. Особенно велика его роль при средне- и мелкомасштабных работах, что позволяет рассматривать районирование в качестве важнейшего метода региональных исследований. И. В. Попов в 1961 г. отмечал, что инженерно-геологическое описание, «...чтобы быть систематичным и удобным для практического использования, всегда требует районирования территория. В данном случае для сис-

темагической региональной инженерно-геологической характеристики территория СССР необходимо разделять эту территорию на однородные по инженерно-геологическому характеру части и описать их, указывая сходство и различие, закономерности и обусловленность характерных инженерно-геологических черт».

Какое же содержание вкладывают различные исследователи в понятие «инженерно-геологическое районирование»? А. А. Маккавеев в 1971 г. приводит такое определение: инженерно-геологическое районирование — разделение исследуемой территории на соподчиненные таксономические элементы, характеризующиеся внутренней общностью и внешними различиями инженерно-геологических условий. И. С. Комаров указывал, что инженерно-геологическое районирование — это последовательное деление изучаемой территории на отдельные части (территориальные единицы), которые характеризуются все большей однородностью по инженерно-геологическим условиям. Г. А. Голодковская под районированием понимает выделение и описание отдельных территорий, объединенных общностью определенных показателей.

Все эти определения не отражают сущность инженерно-геологического районирования в полной мере. Это обусловлено тем, что под районированием понимается не только разделение и описание, а прежде всего выявление, а затем уже выделение (ограничение) в сложной и многосторонней геологической системе территориальных инженерно-геологических элементов разного порядка, отличающихся друг от друга по современным морфологическим особенностям вследствие различной истории их формирования; систематизация выявленных территориальных элементов в определенную таксономическую систему, картографическое их отображение, а также их последовательная качественная и количественная характеристика и оценка. Отсюда следует, что инженерно-геологическое районирование — выявление в сложной и многосторонней геологи-

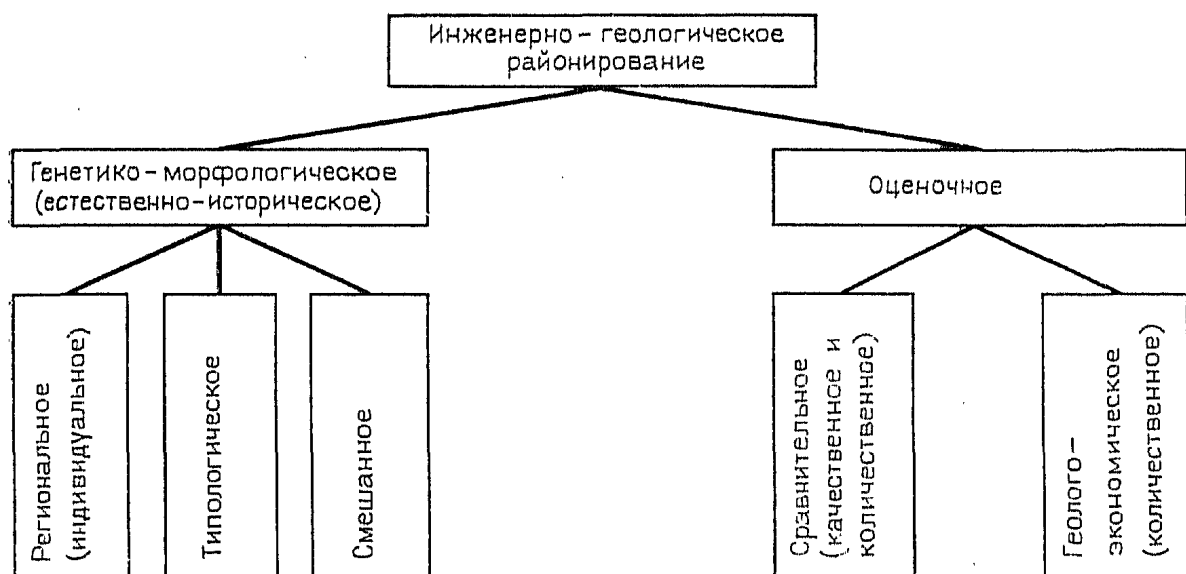


РИС 40. Систематика типов инженерно-геологического районирования. По В. Т. Трофимову.



ческой среде на основе совокупности теоретических положений и методических приемов системы территориальных элементов, обладающих какими-либо общими инженерно-геологическими признаками, отграничение их от территорий, не обладающих этими признаками, систематика, картографирование и описание.

В практике инженерно-геологических исследований применяются различные варианты районирования. Они подразделены В. Т. Трофимовым [42] на 2 типа, 5 видов (рис. 40) и 10 разновидностей. Первый тип районирования—генетико-морфологическое, или естественно-историческое, районирование, при котором на основе определенных принципов и классификационных признаков выявляют, обособляют, классифицируют территориальные единицы разного порядка. Второй тип—оценочное районирование; оно предусматривает оценку сложности инженерно-геологических условий различных территориальных комплексов на основе использования различных качественных и количественных показателей, в том числе экономических.

В практике инженерно-геологических исследований используются три вида генетико-морфологического районирования: региональный (индивидуальный), типологический и смешанный. При региональном виде районирования, разработанного в основном Н. И. Николаевым и И. В. Поповым, изученная местность подразделяется на территориальные единицы разного порядка (ранга), причем каждая последующая единица выделяется из предыдущей (более крупной) делением ее на отдельные части на основе выбранных исследователем классификационных признаков (осуществляется логическая операция «расчленение целого на части»). При этом любая территориальная единица обособляется как целостный, непрерывный в пространстве элемент, разобщенный (окруженный) другими территориальными единицами. Каждая такая единица характеризуется ясно выраженной индивидуальностью, получает персональную характеристику и, как правило, собственное название [40, 42].

Региональный вид генетико-морфологического инженерно-геологического районирования, обладая определенными достоинствами (в первую очередь тем, что каждый контур, выделенный на карте, получает собственную характеристику), имеет и ряд недостатков. И. С. Комаров показал, что основной недостаток такого районирования заключается в трудности экстраполяции данных, полученных при изучении одной территориальной единицы (при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений), на другие территориальные единицы одного с ней ранга, так как остается неизвестным: 1) где располагаются территориальные единицы, обладающие сходством по инженерно-геологическим условиям с изучаемой, 2) в чем заключается и какова степень сходства и различия между сопоставляемыми единицами.

Типологический вид генетико-морфологического районирования предусматривает выявление и выделение определенных типов территориальных единиц того или иного порядка на основе учета на-

более общих и существенных признаков, свойственных им, и отказа от учета многих частных особенностей этих единиц. При этом характеристика дается не каждому конкретному контуру, выделенному на карте (как при региональном виде районирования), а группе контуров данного типа. Обособленные типологические территориальные единицы в отличие от региональных могут существовать в виде разрозненных участков, расположенных в различных частях изучаемой территории, на любом расстоянии друг от друга. Они могут перемежаться с территориальными единицами других типов.

Следует подчеркнуть, что в практической работе типологический вид районирования очень часто используют после осуществления регионального. При его выполнении проводят типизацию ранее выделенных региональных территориальных единиц, причем она может проводиться на любом уровне — на уровне регионов, провинций, зон, областей, районов и т. д. Однако на каждом этапе типизации оно проводится применительно к какому-либо одному таксономическому уровню [42].

Использование результатов типологического вида районирования (карт, схем) позволило по И. С. Комарову: 1) экстраполировать данные инженерно-геологического изучения одной территориальной единицы на другие территориальные единицы в соответствии с установленной степенью сходства; 2) обобщать на этой основе результаты инженерно-геологических изысканий, опыт проектирования и строительства сооружений; 3) разрабатывать рекомендации по различным вопросам изысканий, проектирования и строительства сооружений.

Однако типологическое районирование имеет и недостатки. Выше отмечалось, что выявление и выделение типов территориальных единиц любого порядка проводится на основе учета наиболее общих и существенных признаков. Специфические индивидуальные черты отдельных территориальных единиц данного порядка (ранга) при этом приходится не учитывать. Частичное уменьшение этого недостатка возможно, как отмечено в работе [41], при увеличении числа типов территориальных единиц данного ранга, выделяемых в процессе районирования. Полностью этот недостаток исключается лишь в том случае, когда число типов единиц данного ранга равно числу индивидуальных единиц, т. е., когда типологическое районирование превращается в индивидуальное. Однако здесь мы вновь приобретаем ряд недостатков и, главное, теряем достоинства типологического районирования.

Региональный и типологический виды генетико-морфологического районирования строги с позиций формальной логики (при первом осуществляются операции, подобные расчленению целого на части, при втором — подобные делению понятия). Смешивать их нельзя. Однако это смешивание недопустимо лишь на одной и той же ступени (стадии) районирования. В процессе практической работы на определенных ее этапах часто бывает целесообразно переходить от одного вида генетико-морфологического райониро-

вания к другому, а затем, на последующем этапе, нередко совершать обратный переход. Такой вид районирования назван смешанным. В практике инженерно-геологических работ он очень широко распространен. Обычно наиболее крупные территориальные единицы обособляются как региональные (индивидуальные), а более мелкие — как типологические единицы.

Каждый вид генетико-морфологического инженерно-геологического районирования подразделяется по содержанию на две разновидности. В первой из них — общем районировании на обзорных, мелко- и среднемасштабных картах выявляются и обособляются территории, близкие по всем главным параметрам, определяющим их инженерно-геологический облик. Такие карты по существу многоцелевые. Они в первую очередь предназначены для решения вопросов, связанных с планированием и проектированием массовых видов строительства. При крупномасштабных, а нередко и среднемасштабных работах обычно переходят к специальной разновидности районирования, в процессе выполнения которого на картах территориальные элементы выявляются и обособляются с учетом специфики определенного вида строительства.

Оценочное инженерно-геологическое районирование\* подразделяется на два вида — сравнительное (качественное и количественное) и геолого-экономическое (количественное). Первый вид по своему содержанию, подобно видам генетико-морфологического районирования, может быть общим и специальным; они могут широко применяться при всех видах инженерно-геологических исследований. Второй вид оценочного районирования должен шире использоваться при крупномасштабных работах. В подавляющем большинстве случаев этот вид районирования должен носить специальный характер.

Оценочное районирование, безусловно имеющее самостоятельное и очень важное практическое значение, целесообразно в большинстве случаев использовать на втором этапе работ по инженерно-геологическому районированию. Его предпочтительнее проводить на основе результатов генетико-морфологического районирования [16, 42]. При такой последовательности оно должно заключаться в оценке сложности инженерно-геологических условий выделенных территориальных единиц. В этом случае оценочное районирование станет более глубоким по содержанию, а формальные категории сложности получают материальное обоснование и содержание (например, одинаковые по сложности инженерно-геологические условия в одном случае могут быть обусловлены развитием

---

\* Следует подчеркнуть, что оценочное районирование, с точки зрения логики, районирование типологическое. Однако оно по сути отлично от типологического генетико-морфологического инженерно-геологического районирования, при котором большинство исследователей чаще всего классифицируют (типизируют) выделенные при региональном районировании территориальные таксономические единицы одного ранга на основе генетико-морфологических признаков (типологическая группировка индивидуальных территориальных единиц на уровне регионов, провинций, зон, областей и т. д.).

«сильнольдистых многолетнемерзлых пород, в другом — исключительно сильной заболоченностью, в третьем — развитием мощных толщ сильнопросадочных лёссовых пород, в четвертых — высокой сейсмичностью территории, в пятых — сложным, сильно расчлененным рельефом и т. д.)».

## **ПРИНЦИПЫ И ПРИЗНАКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ**

Инженерно-геологическое районирование выполняется по определенным принципам на основе выбранных исследователем классификационных признаков. Принципы и признаки районирования — понятия различные, смешивать их нельзя. Принципы — те логические правила, важнейшие методические положения, которые должны соблюдаться при проведении любого типа, вида и разновидности районирования. Под признаками (классификационными) районирования понимают те выбранные и обоснованные исследователем признаки, на основе которых происходит деление территории при региональном (индивидуальном) районировании, классификация (типизация) территориальных единиц определенного ранга при типологическом районировании или оценке сложности инженерно-геологических условий при оценочном районировании.

На основании критических оценок имеющихся по этим вопросам предложений в инженерной геологии и смежных дисциплинах геолого-географического цикла в работах [40, 42] были сформулированы основные принципы инженерно-геологического районирования.

1. Районирование должно проводиться по вещественно-морфологическим глубоко инженерно-геологическим признакам, отражающим важнейшие закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий, обусловленных взаимодействием региональных и зональных геологических факторов.

2. Сумма выделенных при районировании территориальных единиц должна быть равна объему (площади) делимой территории при региональном виде районирования или объему классифицируемого (делимого) понятия в случае типологического и оценочного районирования.

3. При районировании должно соблюдаться требование соразмерности — территориальные комплексы, выделяемые на определенной ступени районирования, должны относиться к одному порядку (рангу). Несоблюдение этого положения, выделение элементов, принадлежащих к разным порядкам, и последующее сопоставление их друг с другом (например, при оценке сложности условий) может, как указывал Ю. А. Косыгин, «...привести к смешению понятий и путанице в раскрытии закономерностей».

4. Признаки, по которым проводится деление территории (или классифицируются территориальные единицы), должны выбираться так, чтобы каждая точка (территориальная единица) попадала только в одну из выделяемых категорий.

5. В пределах одной (любой) таксономической единицы все границы единиц следующего более высокого ранга должны проводиться по признакам одного порядка (должно использоваться одно основание деления по принятой в логике терминологии). Классификационный признак может изменяться от одной ступени районирования к другой.

6. Каждая группа между выделяемыми таксономическими единицами должна проводиться по вполне определенному (в идеале — одному) классификационному признаку.

Вопрос о классификационных признаках районирования также имеет очень важное значение. Ведь правильный выбор этих признаков по существу определяет содержание и глубину инженерно-геологического районирования. Этот вопрос чрезвычайно принципиален еще и потому, что выбор и систематизация классификационных признаков представляют собой первый этап районирования, предшествующий выявлению и выделению территориальных единиц разного ранга, проведению на карте границ между выделенными единицами в тех местах, где эти признаки изменяются (второй этап районирования).

Инженерно-геологические условия, как показано выше, — очень сложная, многофакторная система, обладающая большим числом существенных и второстепенных признаков. Из этого многообразия необходимо выбрать те главные признаки, которые в наибольшей степени важны для инженерно-геологической оценки территории. К их числу относятся параметры, характеризующие горные породы, слагающие местность, рельеф, подземные воды, современные геологические процессы и явления. Главнейшими из них, как признается большинством инженеров-геологов, являются признаки, характеризующие распространение комплексов горных пород, которым свойственны однотипное строение, состав, состояние и инженерно-геологические свойства.

При установлении значимости и очередности признаков в случае использования многоступенчатых схем районирования на первых ступенях предпочтение всегда следует отдавать тем признакам, которые коррелируют с наибольшим числом отдельных компонентов инженерно-геологических условий, изменение которых особенно резко сказывается на всей обстановке. В дальнейшем, при все более детальном делении, последовательно используются все менее и менее существенные признаки. Только такой подход — от общего к частному, от важнейших черт к менее существенным — позволит выполнить основную задачу — разделить изучаемую территорию уже на ранних стадиях районирования на части, в пределах которых инженерно-геологические условия действительно относительно однородны по своим коренным особенностям, задачи инженерных изысканий, методы их осуществления и методы возведения сооружений достаточно однотипны.

На каждой ступени районирования важно выбрать один ведущий признак и по нему проводить границы между территориальными единицами, помня, что невозможно выполнить логичное райо-

нирование, положив в основу выделения определенной таксономической единицы одновременно несколько классификационных признаков. Сделать это часто очень трудно, поскольку при наличии взаимосвязей изменение любого фактора, определяющего инженерно-геологические условия, обычно влечет за собой изменение и многих других. «Поэтому может показаться, — писал Д. Л. Арманд, — что проведение границ по нескольким взаимосвязанным признакам возможно. Это так и было бы, если бы в природе существовали функциональные связи, т. е. определенному значению независимого переменного соответствовало бы также определенное значение зависимого. Однако в природе каждый фактор зависит от многих других, и поэтому все связи здесь корреляционные, статистические. Каждому значению аргумента соответствует известный ряд (диапазон) значений функций. Поэтому нельзя брать за классификационный признак одновременно аргумент и функцию».

Не менее важен вопрос о соотношении морфологического и историко-генетического при выборе классификационных признаков (философский вопрос о следствии и причине), поскольку все еще нередки противопоставления историко-генетического и морфологического подходов к районированию. При решении этого вопроса следует исходить из того, что в процессе своих исследований мы изучаем прежде всего морфологические особенности территории, по ним воссоздаем историю формирования инженерно-геологических условий. Именно эти особенности, а не история их возникновения определяют оценку территории, способы ее освоения. Поэтому классификационные признаки должны всегда быть морфологическими по содержанию. Действительное объективное районирование можно составить только на основе глубокого анализа морфологии территории, понимая под ней совокупность вещественного состава, строения, состояния и внешней формы грунтовых массивов разного порядка.

Признание морфологической природы классификационных признаков не означает, что в какой-то степени игнорируется историко-генетический аспект районирования. Ведь в геологической науке именно по специфике современной формы (в широком смысле слова) мы судим о типе и ходе геологических процессов, протекавших в прошлом и протекающих сейчас. Поэтому районирование по морфологии явлений одновременно является, как уже отмечал Д. Л. Арманд, и районированием по типам процессов, их создавших, «то есть истинно генетическим районированием».

С вопросом о классификационных признаках тесно связан вопрос о логических вариантах районирования. При инженерно-геологическом районировании, как и при любом природном районировании, Д. Л. Армандом, И. С. Комаровым и другими исследователями использовались три логических варианта районирования (рис. 41).

В практике работ чаще всего применяют логические варианты *а* и *б*. Вариант *а* предусматривает введение все более и более жест-

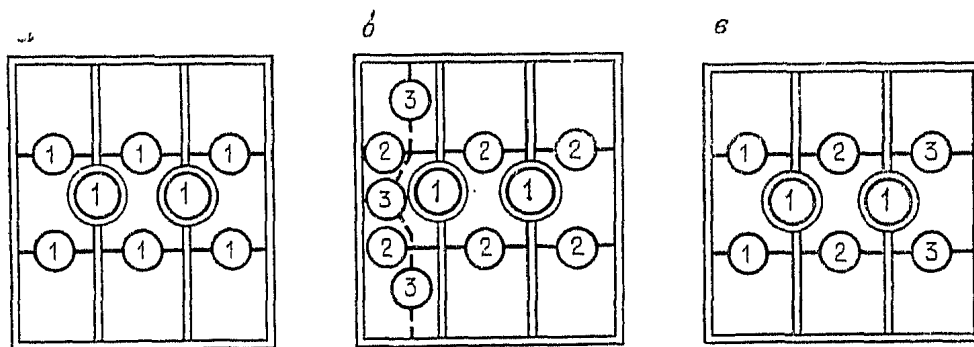


РИС. 41. Логические варианты районирования. По Д. Л. Арманду.

*а* — с единственным классификационным признаком; *б* — с последовательно вводимыми классификационными признаками; *в* — с бифуркацией признаков. Цифры в кружках — классификационные признаки, по которым выделяются таксономические единицы: чем ниже ранг ступени районирования, тем крупнее кружок

ких качественных или количественных ограничений классификационных признаков в процессе районирования. При общем генетико-морфологическом инженерно-геологическом районировании этот строгий логический вариант использовать трудно, поскольку инженерно-геологические условия представляют собой сложную многокомпонентную систему. Однако он может широко использоваться при выполнении специального генетико-морфологического районирования в так называемом аналитическом варианте. Например, при районировании инженерно-геологического массива по составу грунтов, состоянию, температуре, сжимаемости или другому параметру. Этот вариант также может оказаться приемлемым при оценочном районировании.

Вариант *б* предусматривает выявление и обособление территориальных единиц сначала по одному признаку, потом вводится второй признак, третий и т. д. Именно такой вариант используется наиболее широко в практике инженерно-геологических работ.

Теперь кратко рассмотрим конкретные признаки, которые используются при инженерно-геологическом районировании.

В практической работе, по решению совещания по инженерно-геологическому районированию и картированию (Москва, 1962 г.) и предложению И. В. Попова, чаще всего используются следующие классификационные признаки генетико-морфологического районирования для обособления территориальных таксономических единиц разного ранга: регионы выделяются по структурно-тектоническому, области — геоморфологическому, районы — литолого-генетическому признакам. Подрайоны выделяются по гидрогеологическому признаку или по особенностям состава и состояния пород, или по особенностям геологических процессов и др. Обоснование инженерно-геологического значения и содержания этих признаков в наиболее полной форме проведено И. В. Поповым, Г. А. Голодковской.

Именно эти признаки наиболее широко используются в практике региональных работ. Иногда их даже называют «общепринятыми» [17], хотя они неоднократно подвергались критике Л. Д. Бе-

лого, Е. С. Мельникова, В. Т. Трофимова. Это обусловлено тем, что схемы районирования, составленные на их основе, не учитывают многие важные закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий, в частности, широтный характер их изменения в пределах платформенных и горно-складчатых структур и высотное (поясное) изменение в пределах последних. Кроме того, в этих признаках недостаточное внимание обращено на учет особенностей пространственной изменчивости состава и состояния (а, следовательно, и свойств) грунтов, но все инженеры-геологи считают эти признаки главнейшими при районировании. Особенно резко эти недостатки проступают при районировании крупных геолого-структурных элементов земной коры, континентов и Земли в целом.

С целью устранения этих недостатков в работе [42] были предложены и обоснованы следующие классификационные признаки для обособления таксономических единиц разного ранга при генетико-морфологическом районировании крупных территорий. Регион как наиболее крупная инженерно-геологическая единица выделяется по структурно-тектоническому признаку; подразделяется на провинции, выделяемые на основе учета характера грунтов (классов грунтов — в соответствии с общей классификацией грунтов Е. М. Сергеева и др.), слагающих территорию региона. Провинция подразделяется на зоны и подзоны по современному состоянию грунтов (в широком региональном плане), представляющих верхнюю часть разреза. В пределах подзон по характеру рельефа как конкретному выражению неотектоники выделяются области. Районы как часть области обособляются по особенностям геологического строения верхней части разреза и обычно охватывают территорию развития одной геологической формации или одного стратиграфо-генетического комплекса. Подрайоны и участки целесообразно выделять в соответствии с решением Совещания по проблемам инженерно-геологического районирования и картирования (Москва, 1962 г.).

При использовании этих классификационных признаков уже на уровне провинций учитывается характер грунтов, развитых в пределах региона. При выделении зон и подзон отражаются важнейшие закономерности зонального (широтного на платформах — равнинах и высотного в пределах горно-складчатых структур) изменения инженерно-геологических условий, обусловленного прежде всего зональной изменчивостью современного состояния грунтов, а при выделении областей, районов и более мелких по площади территориальных единиц — закономерности внутризонального изменения разного уровня. Такой подход позволяет более успешно выполнить основную задачу районирования, сформулированную выше.

Для выполнения оценочного инженерно-геологического районирования в качестве классификационных признаков до последнего времени чаще всего использовали степень пригодности, степень благоприятности или необходимость и характер инженерной под-



готовки территории. На основе первого из них выделялись пригодные, ограниченно пригодные и непригодные участки (районы, подрайоны), второго — благоприятные, условно благоприятные и неблагоприятные участки, третьего признака — участки, не требующие специальной инженерной подготовки, участки, требующие специальной инженерной подготовки, и т. д. В последние годы созданы новые оригинальные классификационные схемы, позволяющие более обоснованно оценивать сложности инженерно-геологических условий и проводить оценочное районирование территории [1, 7]. Интересные предложения об использовании с этими целями факторного анализа в модификации анализа соответствий сделаны Г. Л. Коффом и Е. Н. Коломенским.

Следует подчеркнуть, что в последние годы при оценке сложности инженерно-геологических условий на основе материалов съемки и оценочном районировании стал более широко использоваться метод баллов, введению которого в практику работ по инженерно-геологическому районированию способствовала работа Л. Д. Белого. Наиболее полно его применили В. И. Клименко и В. Ф. Безруков. Они на основе фактического материала по Черноморскому побережью Кавказа разработали частные алгебраические шкалы оценки сложности каждой группы факторов, определяющих инженерно-геологические условия, — состав и свойства пород, рельеф, гидрогеологическую обстановку и современные геологические процессы и явления. Интегральная оценка сложности, позволяющая перейти к осуществлению сравнительного оценочного инженерно-геологического районирования, получается в результате простого суммирования оценок баллов всех составляющих их компонентов.

Существенные перспективы в совершенствовании методики оценки сложности инженерно-геологической обстановки и развития сравнительного количественного оценочного инженерно-геологического районирования связаны с использованием метода взвешенных баллов. Интересные разработки в этом плане опубликованы Г. К. Бондариком и В. В. Пендиным.

#### **СИСТЕМЫ И ТАКСОНОМИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ РАЙОНИРОВАНИЯ**

При инженерно-геологических исследованиях обычно используются многоступенчатые схемы районирования, которые позволяют учесть при делении территории (при региональном виде районирования) или делении понятия (при типологическом виде) набор классификационных признаков, вводя их последовательно для единиц все более и более высоких рангов. Однако подходить к классификационным построениям при районировании можно разными способами, что позволяет выделить две различные системы районирования [42].

Наиболее широко используется система однорядного последовательного районирования, предложенная еще Н. И. Николаевым

и И. В. Поповым. Точнее, ее следовало именовать системой районирования, при которой осуществляется однорядная последовательная классификация региональных или типологических таксономических единиц одного или нескольких уровней. В большинстве случаев при ее применении используется логический вариант (см. рис. 41, б) районирования — с последовательно вводимыми классификационными признаками; нередко приходится использовать и вариант с бифуркацией признаков в. При типологической группировке региональных территориальных единиц одного уровня (например, регионов) применяется и первый логический вариант районирования — с единственным классификационным признаком (см. рис. 41, а).

При использовании этой системы районирования предусматривается, в соответствии с предложениями И. В. Попова, обособление следующей системы таксономических единиц: регион — область — район — участок. В. Т. Трофимов, развивая эти предложения и учитывая важнейшие закономерности зонального изменения инженерно-геологических условий крупных геолого-структурных зон земной коры, ввел более широкую гамму таксономических единиц районирования: регион — провинция — зона — подзона — область — район — участок. Эти единицы основные, но исследователи используют дополнительные таксономические единицы, в качестве которых выступают регионы и области второго и более высоких порядков, подрайоны и т. д.

Каждая из названных таксономических единиц выделяется по одному определенному классификационному признаку. При этом общность выделенных единиц по этому признаку будет только относительная. Каждой из них свойственны особенности, которые на данной ступени мы рассматриваем как несущественные, договариваемся их не учитывать. Чем дробнее по рангу таксономические единицы, тем больше будет их однородность. В связи с этим наибольший диапазон изменения инженерно-геологических условий характерен для регионов, наименьший, как правило, очень узкий — для участков.

Степень дифференциации территории при районировании связана с характером ее изученности, сложностью структуры инженерно-геологических условий и масштабом исследований. При мелко- и среднемасштабных (1:100 000 и мельче) исследованиях с целью использования рассматриваемой системы районирования выделяют все таксономические единицы до инженерно-геологического района включительно; на схемах районирования масштаба 1:50 000—1:25 000 обычно удается обособить области, районы и подрайоны, а на крупномасштабных схемах (1:10 000 и крупнее) — районы, подрайоны и главное — участки.

Система инженерно-геологического районирования, которая называется двухрядной системой районирования, стала использоваться в практической работе лишь в последние годы. Она предусматривает разделение территории и классификацию инженерно-геологических обстановок с помощью двухкоординатной таблицы-ре-

шетки (матрицы). При ее применении важнейшие закономерности пространственного изменения инженерно-геологических условий учитываются на основе последовательного, но обязательно сопряженного на каждом (или определенном) этапе анализа изменчивости региональных и зональных геологических факторов инженерно-геологических условий. Первые рассматриваются по одной оси таблицы-матрицы, вторые — по другой. Производные единицы, представляющие собой как бы клетки разного размера в указанной таблице, являются таксономическими единицами разного ранга (региональными или типологическими — в зависимости от характера принятых классификационных признаков, рассматриваемых по осям таблицы-матрицы).

При использовании этой системы в процессе выполнения регионального районирования для наименования обособляемых таксономических единиц в настоящее время целесообразнее всего пользоваться терминами «инженерно-геологический таксон первого (второго и т. д.) уровня». Это неизбежное следствие того, что в настоящее время не предложено совокупности (системы) названий инженерно-геологических таксонов, выделяющихся с целью применения двухрядной системы инженерно-геологического районирования в региональном варианте. Применение же названий таксонов однорядной (последовательной) системы районирования (инженерно-геологический регион, провинция, зона, подзона, область\*, район и т. д.) с установившимся содержанием нецелесообразно, а без специального пояснения по существу невозможно, так как при использовании разных систем районирования с одинаковым числом операций деления территории (на части) образуются неодинаковые по объему и содержанию таксоны. Разработка совокупности наименований таксонов двухрядной системы районирования и рассмотрение их соотношения с таксонами первой системы районирования — задача дальнейшей работы.

При осуществлении типологического генетико-морфологического инженерно-геологического районирования по системе двухрядного районирования можно в качестве обособляемых таксонов использовать типы, подтипы, виды и т. п. В целом они соответствуют площади распространения типов, подтипов, видов и других инженерно-геологических условий, выделенных, например, Л. В. Бахиревой. Типы отвечают инженерно-геологической обстановке части крупного геолого-структурного региона, расположенной в пределах одного температурного пояса (пояс преимущественного распространения многолетнемерзлых пород или пояс развития немерзлых пород). Обстановка в пределах площади распространения формации

---

\* Термины «инженерно-геологическая провинция» и «инженерно-геологическая область» при использовании двухрядной системы районирования впервые применил Е. С. Мельников. Первая из них отвечает части конкретной палеогеографической провинции, расположенной в определенном геокриологическом поясе. Инженерно-геологические области, выделяемые в пределах провинций, представляют часть геоморфолого-неотектонической области, расположенной в границах геокриологической подзоны.

дочетвертичных пород, расположенной в границах одной температурной зоны, отвечает подтипу инженерно-геологических условий. Используя на последующих этапах работы иные признаки, отражающие закономерности пространственного распределения региональных и зональных факторов, можно обособить серию типологических таксонов более высокого порядка.

Обе описанные системы инженерно-геологического районирования в одинаковой степени логически правомерны. В итоге (на последнем этапе районирования) они приводят к обособлению одних и тех же по свойствам территориальных единиц (при использовании одинаковых по числу и содержанию классификационных признаков, но разного числа этапов деления объекта — в случае применения однорядной системы число таких этапов в два раза больше). Первая из систем имеет преимущества при осуществлении регионального (индивидуального) и типологического районирования одного, даже очень крупного региона; вторая — при типологическом районировании нескольких смежных или разобщенных геолого-структурных элементов Земли. Она может также применяться при выполнении регионального (индивидуального) районирования таких территорий.

Необходимо подчеркнуть, что в практической работе систему двухрядного районирования на всех этапах разработки многоступенчатых схем инженерно-геологического районирования, как правило, не используют. Ее применяют для обособления таксономических единиц низкого ранга, а затем переходят к однорядной системе районирования. Такой способ работы был использован Е. С. Мельниковым, В. Т. Трофимовым и Г. Лхан-Аасуреном.

С вопросом о системе таксономических единиц инженерно-геологического районирования и классификационных признаках их обособления тесно связан вопрос о границах между различными территориальными единицами разных уровней. В пределах любой территории между отдельными ее частями существуют многочисленные границы, каждая из которых в соответствии с работой Г. К. Бондарика представляет собой поверхность, выделенную на основании каких-либо геологических параметров. При переходе через такую границу параметры (признаки) терпят разрыв непрерывности и вдоль нее, хотя бы с одной стороны, они остаются непрерывными. Одни из границ будут резкими, другие — постепенными, одни имеют существенное инженерно-геологическое значение, другие — второстепенное. Выявить и учесть при районировании все эти границы нередко просто невозможно, а часто и нет необходимости. Важнейшая задача исследователя при районировании заключается в другом — в необходимости выделения главных границ, существенных для решения поставленной задачи. Поэтому всегда следует иметь в виду, что при региональном районировании выделяют территории (а, следовательно, и проводят границы) по принципу преобладания определенного комплекса инженерно-геологических условий в пределах какой-то территории. Следовательно, на низких ступенях районирования степень однород-

ности выделяемых единиц будет наименьшей, поскольку в каждую из них как правило, вкраплены различные по площади «чуждые» образования, которые невозможно отграничить на данном этапе районирования. На последующих этапах эти образования могут быть выделены в самостоятельные единицы. Соответственно степень однородности выделяемых единиц увеличивается, процесс проведения границ облегчается.

Выше уже отмечалось, что границы могут быть резкими и постепенными. Проведение резких границ (например, между скальными и дисперсными грунтами, массивами многолетнемерзлых и немерзлых грунтов и т. п.) не вызывает трудностей. При наличии между территориальными единицами постепенных границ возникает необходимость проведения границы на основе каких-либо фиксированных значений (качественных или количественных) выбранного классификационного показателя. Такие границы называют условными, они удовлетворяют некоторому заранее заданному условию. Такие границы широко используются при всех видах и масштабах инженерно-геологических исследований.

В процессе инженерно-геологического районирования часто приходится сталкиваться и с так называемыми комбинаторными границами — границами, которые могут быть выделены по серии (совокупности) нескольких разнородных качественных или количественных признаков.

Кратко рассмотрим содержание и типы таксономических единиц разного ранга, которые выделяются при районировании с использованием системы однорядного районирования.

Наиболее обширной из них по площади является инженерно-геологический регион, под которым (в соответствии с предложениями Н. И. Николаева и И. В. Попова) понимают своеобразную в инженерно-геологическом плане крупную геолого-структурную единицу земной коры. Г. А. Голодковская предложила при выделении региона в качестве классификационного признака использовать возраст складчатости, т. е. время превращения геосинклинальной области в платформенную. Исходя из этого она выделила семь типов инженерно-геологических регионов: 1) древние платформы, 2) молодые платформы (эпипалеозойские плиты); регионы, 3) складчатости байкальской, 4) раннепалеозойской (каледонской), 5) позднепалеозойской (герцинской), 6) мезозойской и 7) альпийской.

Несколько по-иному обособили типы инженерно-геологических регионов М. В. Чуринов, В. П. Лазарева и И. М. Цыпина. Применительно к территории СССР они выделили три типа регионов: 1) геосинклинального развития с преимущественным распространением формаций и комплексов пород с жесткими связями, проявлением устойчивых интенсивных новейших поднятий и местных внутренних относительно интенсивных опусканий; 2) платформенного развития с преимущественным распространением формаций и комплексов рыхлых пород различного генезиса и проявлением преимущественно слабых новейших поднятий и 3) платформенного

развития с преимущественным распространением формаций и комплексов рыхлых пород и проявлением опусканий.

Для выделения типов регионов можно также воспользоваться классификацией геоструктурных единиц типологического инженерно-геологического районирования Земли (см. табл. 26), составленной С. Б. Ершовой [13] на основе классификации новейших тектонических структурных элементов, разработанной Н. И. Николаевым с соавторами при создании Карты новейшей тектоники Мира. Учет новейшей тектонической структуры уже на этом уровне районирования — подход, безусловно, прогрессивный. Он позволяет учесть многие важнейшие инженерно-геологические особенности территории, в том числе характер современного рельефа, сформировавшегося на новейшем этапе развития Земли.

Используя построения Н. И. Николаева, С. Б. Ершова наиболее полно рассмотрела и обосновала эту классификацию в отношении материков. Для переходных областей и океанов обоснование необходимости выделения принятых классификационных подразделений при инженерно-геологических исследованиях по существу не приводится, хотя ряд из них вызывает вопросы (например, столь дробное деление океанов, отсутствие впадин окраинных и внутренних морей и др.). Следует также отметить, что на уровне подклассов регионов платформы может быть целесообразнее подразделить на устойчивые и подвижные, поскольку они достаточно резко отличаются по комплексу развитых формаций (в частности, широким распространением магматических формаций в пределах подвижных платформ), разломной тектонике, современному рельефу. Эти различия в инженерно-геологическом отношении в общем плане не менее (а скорее всего, более) существенны, чем различия между молодыми и древними платформами. Щиты и плиты не следует рассматривать в ранге типов; их целесообразно обособлять на следующем этапе и сопоставлять с орогенными поднятиями и прогибами (впадинами).

Второе место в иерархии таксономических единиц (предложенной В. Т. Трофимовым) занимает инженерно-геологическая провинция — крупная часть региона, в пределах которой развиты породы определенного инженерно-геологического класса или определенного по строению сочетания пород разных классов и отличающаяся поэтому от смежных частей всем комплексом инженерно-геологических условий. Среди них В. Т. Трофимовым [42] выделены два типа: провинция распространения пород с жесткими и без жестких связей в пределах континентальной (наземной) части региона и провинция распространения пород и осадков без жестких связей в пределах морской (подводной) части региона. Первый тип включает три вида провинций: 1) преимущественного распространения\* пород с жесткими связями, локально перекрытых

---

\* В зоне активного влияния данного типа инженерных сооружений (при специальном районировании) или определенной их группы (при общем районировании).

маломощным чехлом дисперсных грунтов; 2) распространения пород с жесткими связями, перекрытых породами без жестких связей; 3) преимущественного распространения пород без жестких связей. Второй тип провинций подразделяется на два вида: 1) преимущественного распространения осадков (без жестких связей) и 2) распространения пород с жесткими и без жестких связей, перекрытых чехлом молодых осадков. Типы инженерно-геологических провинций в процессе районирования целесообразно выделять в ранге провинций, а виды — в ранге подпровинций.

Инженерно-геологическая зона — крупная часть провинции, в пределах которой современное состояние пород в разрезе грунтовой толщи, обусловленное главным образом особенностями фазового состояния воды в них, является достаточно однотипным с инженерно-геологических позиций и регионально выдержанным. В. Т. Трофимов [42] предложил выделять три типа зон, каждый из которых объединяет два вида. Основными типами являются: 1) зона практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород, 2) зона совместного распространения многолетнемерзлых и талых пород, 3) зона распространения талых и немерзлых пород. Первый тип включает в качестве видов зону практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород и зону распространения ледников и многолетнемерзлых пород; второй — зону массивно-островного и островного распространения многолетнемерзлых пород и зону редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород, третий — зону распространения сильноувлажненных пород и зону распространения слабо- и умеренноувлажненных пород. Типы зон при районировании обособляются в ранге инженерно-геологических зон, виды — в ранге инженерно-геологических подзон. В качестве подзоны при таком подходе выделяется крупная часть инженерно-геологической зоны, в пределах которой состояние пород грунтовой толщи вполне определено, отлично от смежных частей этой же зоны и регионально выдержано.

Для выделения видов зон В. Т. Трофимовым введены следующие признаки. В зоне практически сплошного распространения многолетнемерзлые породы занимают более 95 % территории, в зоне массивно-островного и островного — от 30 до 95 %, а в зоне редкоостровного — менее 30 %. В зоне распространения сильноувлажненных пород степень влажности их практически повсеместно выше 0,5 и чаще всего близка к 0,8—1, консистенция глинистых пород пластичная или скрытотекучая, глубина залегания грунтовых вод в плакорных условиях часто менее 2 м, грунты незасолены. Учитывая последнее обстоятельство, в ряде работ [40] эта зона названа зоной распространения сильноувлажненных практически незасоленных пород. В зоне распространения слабо- и умеренноувлажненных пород степень влажности грунтов на глубину 10 м обычно не выше половины полной влагоемкости при данной пористости. Консистенция глинистых пород, как правило, полутвердая или твердая, местами тугопластичная, в нижней части толщи породы часто засолены, местами очень сильно. Последнее обстоя-

тельство побудило дать более полное название этой зоны — зоны распространения слабо- и умеренноувлажненных, часто засоленных пород [40].

Инженерно-геологическая область — крупная часть подзоны (по В. Т. Трофимову) или региона (по И. В. Попову), относительно однородная по характеру рельефа (мезо- и макрорельефу) и генетико-возрастным особенностям четвертичных отложений. Вопросы выделения типов инженерно-геологических областей (типологическая группировка типологических единиц) рассматривалась Л. Д. Белым, Н. Г. Верейским, Г. А. Голодковской и другими исследователями. В частности, Г. А. Голодковская предложила совокупность классификационных признаков для выделения областей 1—4-го порядка (ранга). Области первого порядка (тип) выделяются по различиям в морфологии и генезисе рельефа, определяемым направленностью и интенсивностью новейших тектонических движений; области второго порядка (подтип) отражают различия в морфоструктуре и морфоскульптуре рельефа, обусловленные совместным воздействием древней геологической структуры, новейших движений и экзогенных процессов. Области третьего порядка (вид) обособляются по возрасту (истории развития рельефа), а четвертого (разновидность) — по степени расчлененности и сочетанию форм рельефа.

Инженерно-геологический район рассматривается как часть области, в пределах которой развиты определенные комплексы пород (определенная формация или геолого-генетический комплекс). Интересные разработки в области типологической группировки типологических инженерно-геологических районов выполнены И. С. Комаровым. Класс районов в его построении объединяет инженерно-геологические районы, сложенные с поверхности отложениями одного генезиса или определенным закономерным сочетанием отложений различного генезиса. При выделении подкласса районов дополнительно учитывается возраст отложений, типа — состав и строение подстилающих более древних отложений (при глубине залегания менее 15—20 м), группы — направление и интенсивность современных тектонических движений, подгруппы — пространственное строение мерзлых толщ (только в пределах криолитозоны), вида — ландшафтно-климатическая зональность (провинциальность), разновидности — особенности гидрогеологических условий или характер современных экзогенных геологических процессов.

Использование этих классификационных признаков для выделения названной совокупности типологических единиц вполне правомерно. Однако типизация районов стала бы, несомненно, более эффективной, если бы при выделении классов и подклассов районов учитывались не только генезис и возраст развитых в их пределах отложений, но и столь важные в инженерно-геологическом отношении показатели, как состав и строение этих отложений. Группы районов следовало бы выделять не по причине (направленность и интенсивность современных тектонических движений), а по ее следствию — морфологическим признакам (например, мощ-



ность отложений, расчлененности рельефа района и др.). Следует также подчеркнуть, что ландшафтно-климатическая зональность не должна использоваться как классификационный признак при выделении вида районов, поскольку это явно не отвечает масштабу такого явления в природе.

### **ТИПОЛОГИЧЕСКОЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ**

Инженерно-геологическое районирование всей Земли с общих позиций необходимо для правильного решения проблемы районирования отдельных регионов. Такой подход позволяет составить наиболее полное представление о всем разнообразии возможных типов территорий и оценить место каждого типа в стройной системе таксономических единиц.

Принципиальное решение этой проблемы стало возможно на базе накопленных знаний по региональной инженерной геологии и основных теоретических положений этой науки, разработанных в трудах И. В. Попова, Н. И. Николаева, И. С. Комарова, Г. А. Голодковской, Е. М. Сергеева, В. Т. Трофимова, М. В. Чуринова и многих других исследователей, а также трудов ученых смежных наук геологического и географического профиля: тектонистов, неотектонистов, гидрогеологов, географов, геоморфологов, климатологов, гляциологов и др.

В формировании современных инженерно-геологических условий всей Земли в целом, являющихся сложной многокомпонентной системой, особенно наглядно проявляется взаимодействие двух ведущих групп факторов — региональных геологических и зонально-геологических, а также определенные закономерности их пространственной изменчивости.

Для полного и последовательного совместного учета этих двух ведущих групп факторов при инженерно-геологическом районировании была выбрана двухрядная перекрестная система классификации с построением двух независимых систем таксономических единиц: одной — по геоструктурным, другой — по зонально-геологическим признакам.

Выбор классификационных признаков геоструктурного ряда позволяет учесть тесную взаимосвязь таких региональных факторов, как тектоническое и геологическое строение, развитие разных групп формаций, основных типов рельефа и бассейнов подземных вод, а также общих закономерностей распределения напряжений в земной коре — не только с крупными тектоническими, но и с основными неотектоническими структурами земной коры. При этом приобретает большое значение современная эндогенная активность Земли в развитии процессов вулканизма, сейсмичности, гравитационных склоновых, эрозионных и других, что отражается в приуроченности наиболее сложных в инженерно-геологическом отношении территорий к переходным структурам, эпигеосинклинальным орогенам и рифтогенам материков [31]. Поэтому в основу клас-

## Классификация геоструктурных единиц для типологического инженерно-геологического районирования Земли

Планетарная структура	Регионы			Тип	Типологический ряд
	Класс	Подкласс			
Материки	Платформы	Древнейшие	Щиты Плиты		I II
		Молодые	Щиты Плиты		III IV
	Орогены и рифтогены	Эпиплатформенные	На палеозойском и более древнем складчатом основании		V
		Эпигеосинклинальные	На мезозойском складчатом основании		VI
Переходные структуры	Новейшие геосинклинали	Островные дуги	На мезо-кайнозойском складчатом основании		VII
		Глубоководные котловины			
	Материковые склоны		Геосинклинальные Вулканические		VIII IX
					X
Океаны	Платформы				—
	Орогены				—
	Рифтогены				—

сификации таксономических единиц геоструктурного ряда (табл. 26) было положено неотектоническое районирование мира Н. И. Николаева, которое помимо возраста складчатости учитывает современный рельеф, созданный новейшими тектоническими движениями. В этой классификации выделены планетарные структуры, классы, подклассы и типы регионов по ряду признаков: типу глубинного строения земной коры, режиму новейших тектонических движений и типам мегарельефа, тектоническому строению основания и возрасту складчатости, типу геоструктур, типу геологического строения и другим, которые последовательно усложняются и чередуются при переходе от одного ранга единиц к другому. Такая система позволяет, последовательно углубляя и детализируя признаки, выделить крупные естественные таксономические единицы, сформировавшиеся в результате длительной геологической истории и обладающие определенной общностью региональных факторов инженерно-геологических условий. Расположены они могут быть на различных континентах и в разных зонах земного шара (например, эпигеосинклинальные орогены Кавказа, Анд, Камчатки; щиты древних платформ — Балтийский, Канадский, Индостанский и др.).

Ряд факторов инженерно-геологических условий, таких, как современное состояние пород, типы грунтовых вод, их минерализация и глубина залегания, особенности рельефа и современных отложений, развитие и интенсивность многих экзогенных геологических процессов и явлений связаны с различными соотношениями тепла и влаги на земле и имеют четкое зональное распространение на ее поверхности. Это убедительно было показано В. Т. Трофимовым для Западной Сибири [40]. Такая закономерность прослеживается и для всей Земли в целом, но при этом выявляется важная особенность: зональное распределение экзогенных по генезису инженерно-геологических факторов наиболее четко наблюдается в областях проявления слабых новейших тектонических движений с равнинным рельефом. В областях горообразования зональное распределение подобных факторов существенно нарушается вертикальной зональностью. В классификации таксономических единиц второго ряда (табл. 27) в качестве первого ранга единиц выделена среда, что позволяет в пределах материков обособить обширные шельфовые моря, составляющие в структурном отношении единое целое с регионами суши, но резко отличающиеся от них по условиям седиментации, диагенеза, влажностным, температурным, развитию процессов и др. Далее в наземной среде по особенностям состояния грунтовых толщ, связанным с условиями теплообеспеченности и увлажнения выделены пояса, зоны и подзоны. При составлении этой классификации использованы разработки из книг [40, 42]. Пояса и зоны выделялись с учетом фазового состояния влаги в грунтах и степени увлажнения грунтовой толщи, а подзоны — по условиям теплообеспеченности, выражающимся в наличии или отсутствии сезонного промерзания-оттаивания грунтовой толщи, сплошном или прерывистом развитии мерзлоты.

Т а б л и ц а 27

## Классификация зонально-геологических единиц для типологического инженерно-геологического районирования Земли

Среда	Состояние грунтовой толщи			Типологи- ческий ряд
	Пояс	Зона	Подзона	
Подводная	—	—	—	А
Наземная	Мерзлых пород	Многолетнемерзлых пород и льда	Без сезонного оттаивания	Б
			Сплошного распространения многолетнемерзлых пород с сезонным оттаиванием	В
			Прерывистого распространения многолетнемерзлых пород с сезонным оттаиванием	Г
	Немерзлых и талых пород	Сильноувлажненных пород	С сезонным промерзанием	Д
			Без сезонного промерзания	Е
		Умеренноувлажненных пород с признаками континентального засоления	С сезонным промерзанием	Ж
			Без сезонного промерзания	З
		Слабоувлажненных засоленных пород	С сезонным промерзанием	И
			Без сезонного промерзания	К

Такой подход позволяет в вертикальном ряду выделить и охарактеризовать крупные территориальные единицы, располагающиеся зонально на поверхности Земли и обладающие общностью условий по ряду вышеперечисленных взаимосвязанных зонально-геологических факторов, определяемых различными соотношениями тепла и влаги. Например, подзона сплошного распространения многолетнемерзлых пород в Евразии и Америке, подзона слабоувлажненных засоленных пород без сезонного промерзания в Америке, Евразии, Африке, Австралии и др.

Инженерно-геологические типы территорий обособляются при пересечении последних клеток горизонтального и вертикального рядов таблицы (рис. 42). При выделении этих клеток классифика-

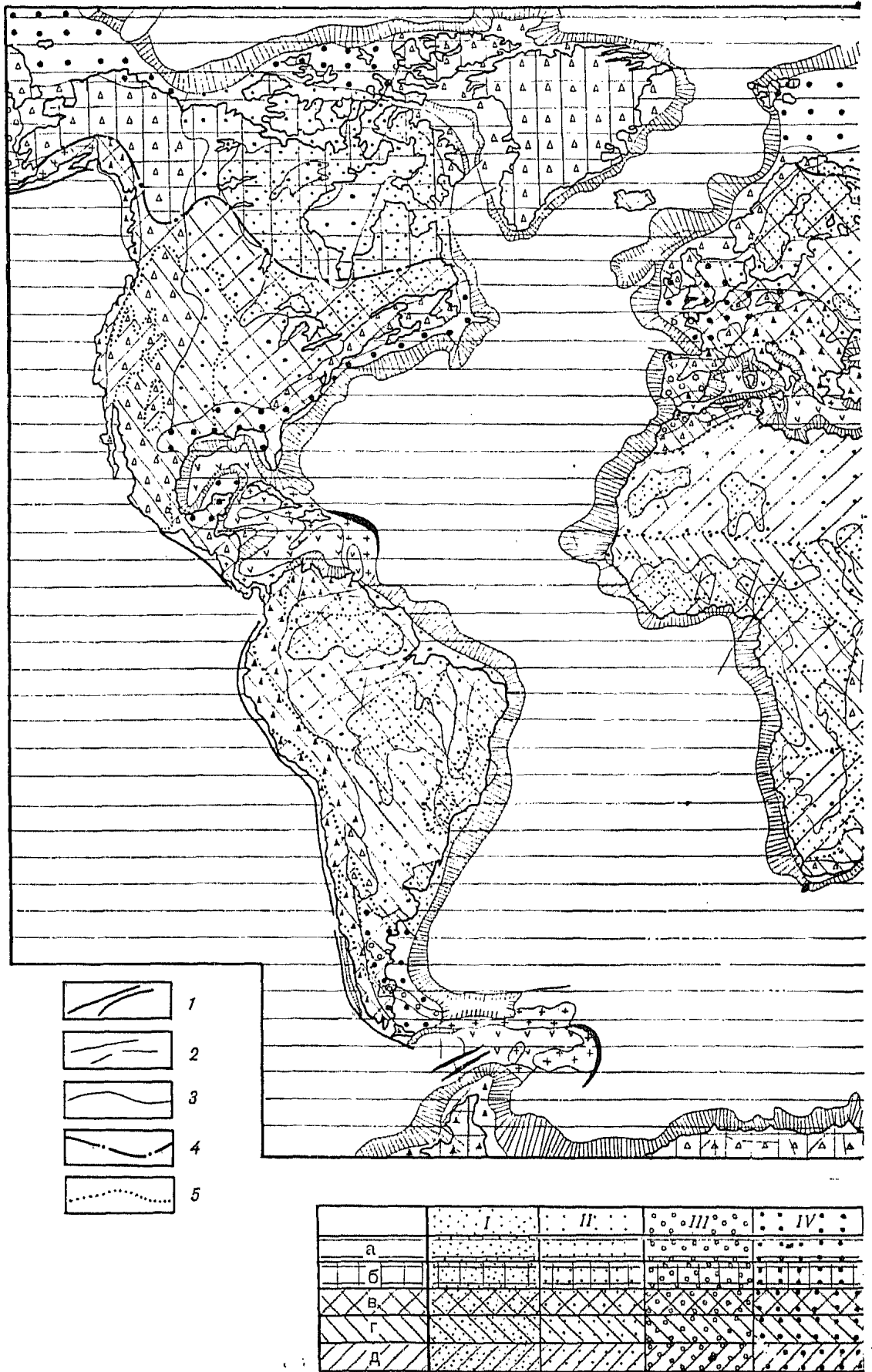
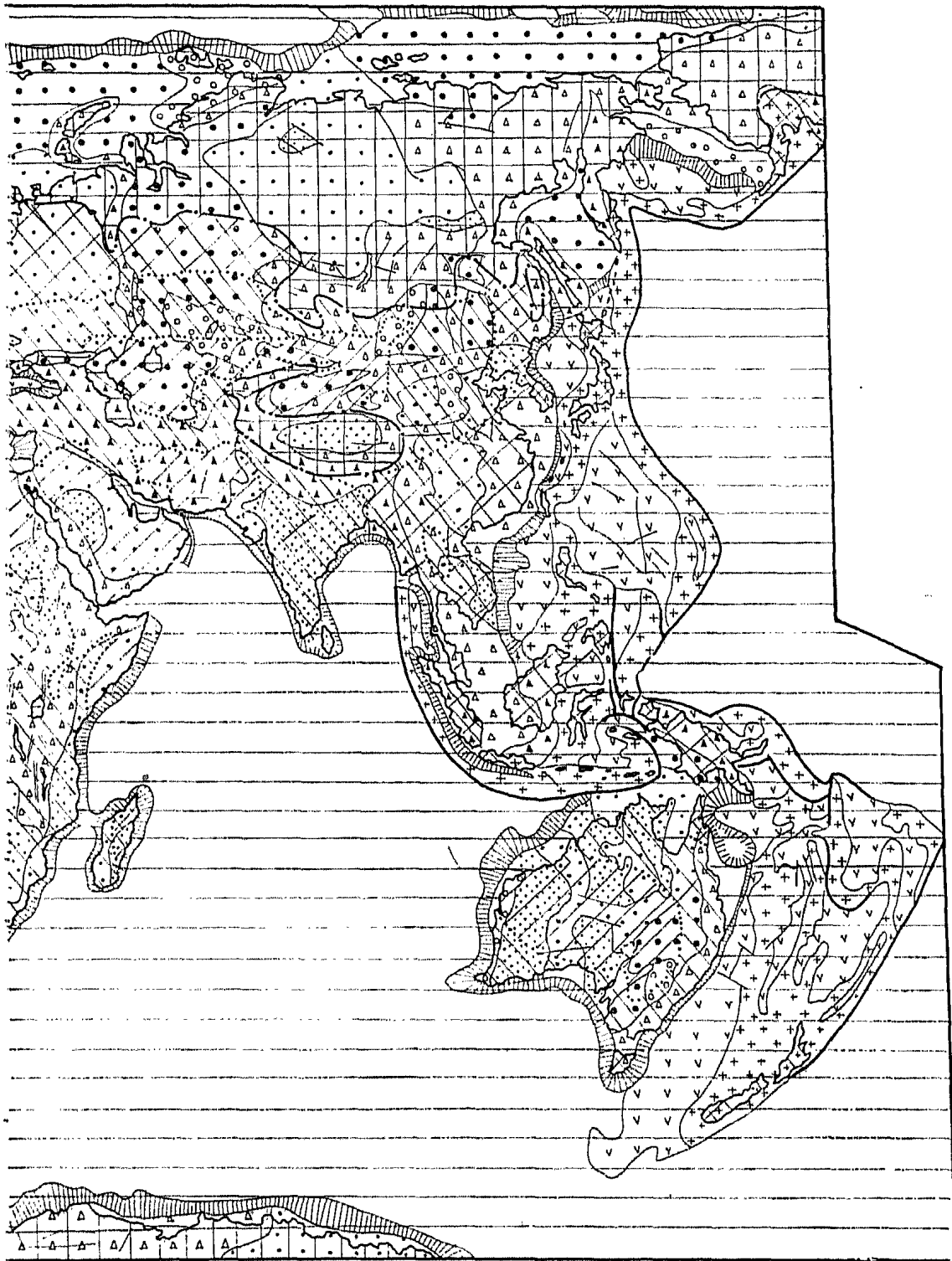


РИС. 42. Схема типологического инженерно-геологического районирования Земли. Геоструктурные единицы: *Материки*: древние платформы — I — щиты, II — рифтогены; VI — эпигеосинклинальные орогены и рифтогены. *Переходные структуры*: IX — материковые склоны. *Сред а*: а — подводная, б, в, г, д — наземная. *Состояние пород*: г — умеренноувлажненных пород с признаками континентального засоления; д — единицы геоструктурных единиц (3), распространения многолетнемерзлых пород (4): зо-



△ △ V △ △	△ VI △ △	+ VII + +	v VIII v	IX
△ △ △ △ △	△ △ △ △ △	+ + + + +	v v v v v	
△ △ △ △ △	△ △ △ △ △	+ + + + +	v v v v v	
△ △ △ △ △	△ △ △ △ △	+ + + + +	v v v v v	
△ △ △ △ △	△ △ △ △ △	+ + + + +	v v v v v	

плиты; молодые платформы — III — щиты, IV — плиты; V — эпиплатформенные орогены и VII — геосинклинальные и вулканические островные дуги; VIII — глубоководные котлови-  
 грунтовой толщи для зон: б — многолетнемерзлых пород и льда; в — сильноувлажненных  
 слабоувлажненных засоленных пород; 1 — глубоководные желоба; 2 — разломы; 3—5 — гра-  
 нально-геологических единиц (5)

ция каждого ряда доведена до определенного (для масштабов всей Земли) логического конца путем введения все новых признаков. Поэтому инженерно-геологический тип территорий, выделяющийся при их объединении, учитывает все основные региональные геологические и зонально-геологические признаки. Инженерно-геологические типы территорий — части крупных геоструктурных единиц или отдельные единицы, в пределах которых поверхностные отложения характеризуются определенной общностью состояния пород и основных зонально-геологических факторов, обусловленных особенностями развития этой территории в четвертичное и настоящее время в конкретных климатических условиях, опреде-

Т а б л и ц а 28

**Классификация инженерно-геологических типов территорий разного уровня в пределах материков**

Зонально-геологические единицы	Геоструктурные единицы	
	Подклассы регионов по возрасту платформ (древнейшие, молодые) или по типу тектонического строения основания орогенов и рифтогенов (эпи-платформенные, эпигеосинклинальные)	Типы регионов по типу геологического строения, определяемого длительной направленностью тектонических движений на платформах (щиты и плиты), возрасту складчатого основания орогенов и рифтогенов (на <i>Pz</i> , на <i>Mz</i> , на <i>Mz—Kz</i> )
Среда по условиям среды (наземная, подводная)	Инженерно-геологический мегатип территорий	—
Пояс по фазовому состоянию влаги в грунтах (мерзлых, немерзлых и талых пород)	Инженерно-геологический макротип территорий	—
Зона по степени увлажнения грунтовой толщи (сильно-, умеренно- и слабоувлажненных пород)	—	Инженерно-геологический мезотип территорий
Подзона по теплообеспеченности — наличию, или отсутствию сезонного промерзания, сплошному или прерывистому развитию мерзлоты	—	Инженерно-геологический тип территорий

ляемых соотношением тепла и влаги [13]. Это основная единица предлагаемой типизации инженерно-геологических условий Земли.

Однако формально при проведении инженерно-геологической типизации с учетом двух групп факторов по перекрестной системе можно выделить ряд промежуточных таксономических единиц более крупных рангов, образующихся при пересечении границ геоструктурного и зонально-геологического рядов (табл. 28) — инженерно-геологические мега-, макро- и мезотипы территорий. Причем это пересечение для достижения большего практического смысла целесообразно осуществлять, начиная с подклассов геоструктурных регионов, учитывая главенствующее значение геоструктурных факторов в формировании инженерно-геологических условий.

На основе разработанной типологической классификации была составлена схематическая карта типологического инженерно-геологического районирования Земли, на которой выделено около 80 инженерно-геологических типов территорий [13], характеризующихся общностью основных факторов инженерно-геологических условий, как региональных, так и зонально-геологических. Составление такой карты сопряжено с большими сложностями, так как связано со спорными проблемами как в геотектонике, так и в географии и инженерной геологии. Поэтому карта должна рассматриваться как принципиальная схема. Границы между территориальными единицами на мелкомасштабной схеме должны быть грубо генерализованными, подчеркивающими лишь основные закономерности распределения инженерно-геологических типов. На рис. 42 приведен упрощенный вариант этой схемы, показывающий принцип выделения мезотипов территории в пределах материков и переходных структур Земли.

Принцип типизации предполагает объединение в один тип однородных территорий, где бы они ни находились. Поэтому на карте типологического районирования показаны все районы развития однородных инженерно-геологических типов территорий в разных частях поверхности Земли. Она позволяет судить о своем многообразии инженерно-геологических условий на Земле, о площади распространения и закономерностях распределения выделенных инженерно-геологических типов; наглядно демонстрирует различия инженерно-геологических обстановок в пределах крупных геоструктурных регионов в зависимости от изменчивости зонально-геологических условий. Самые большие площади в пределах суши занимают плиты и щиты древних платформ, расположенные в разных подзонах и относящиеся к 17 инженерно-геологическим типам территорий, значительно отличающихся друг от друга, хотя региональные геологические условия их сходны. Даже щиты, расположенные в одной зоне сильноувлажненных пород, но относящиеся к различным подзонам по теплообеспеченности, такие, как Балтийский (Северная Европа), Индо-Синийский (Индокитай) и Камерунский (Экваториальная Африка), резко отличны по интенсивности развития процессов выветривания, составу и минерализации грунтовых вод. В южной подзоне, получающей максималь-



ное количество осадков и тепла, повсеместно распространены латеритовые коры выветривания, имеющие четкое зональное строение и мощность 100—120 м. Это связано, как считает Н. М. Страхов, с максимальными скоростями выветривания, протекающими здесь в 20—40 раз быстрее, чем в умеренном поясе. Породы в верхней части разреза — в зоне латеритов, относятся к среднесжимаемым грунтам. К ним приурочено активное развитие оплывин, оползней, термоползучести. Грунтовые воды ультрапресные и пресные, характеризуются повышенным содержанием органических кислот и железа. На Балтийском щите, расположенном в подзоне с сезонным промерзанием пород, древние коры выветривания уничтожены ледником, а современные развиты слабо, мощность их не превышает 0,5—1 м, к северу они постепенно замещаются каменными россыпями. Эти различия говорят о необходимости отнесения регионов щитов к разным инженерно-геологическим типам территорий.

Орогены и рифтогены различного возраста занимают меньшие площади, чем платформы. Наиболее распространены среди них эпигеосинклинальные орогены, принадлежащие к Средиземноморскому и Тихоокеанскому поясам, пересекающим все подзоны. Это и горы Камчатки, расположенные в зоне многолетнемерзлых пород, и горы островов Калимантан и Новой Гвинеи — в подзоне сильноувлажненных пород, получающей максимальное количество осадков и тепла, и горы южных районов Ирана, Афганистана и Пакистана — в подзоне слабоувлажненных засоленных пород без сезонного промерзания и отличающиеся в связи с этим развитием интенсивной аридной денудации, преобладанием физического выветривания, образованием мощных осыпей, конусов выноса, известково-гипсовых и кремнистых кор, глубокими засоленными водами в депрессиях. Это также разные типы территорий.

Эпиплатформенные орогены и рифтогены на палеозойском складчатом основании также относятся к различным инженерно-геологическим типам территорий, связанным со сменой зонально-геологических условий. Горы южного обрамления Азиатской части СССР: Тянь-Шань, Алтай, Саяны, горы Прибайкалья и Забайкалья — характеризуются сходством основных черт геологического строения и других региональных геологических факторов. Однако при переходе через границу развития пояса мерзлых пород и его подзон инженерно-геологические условия изменяются очень резко. Тип территорий со сплошным развитием многолетнемерзлых пород — северное Прибайкалье, включающее Байкальскую рифтовую зону, характеризуется, по данным В. П. Солоненко, исключительно сложными и высокодинамичными инженерно-геологическими условиями. Это определяется сочетанием резкого проявления новейших тектонических движений с повышенными градиентами скоростей и амплитудами до 7000 м, высококонтрастного рельефа, исключительно высокой сейсмичности, перенапряженного состояния массивов горных пород, сплошной вечной мерзлоты и сложных гидрогеологических условий. К этому типу приурочены быстрое обра-

зование мощных кор выветривания, мировые сейсмические катастрофы, сейсмогравитационные обвалы, оползни, гигантские наледи и термокарстовые провалы. С землетрясениями связана мгновенная активизация всех процессов.

С применением двухрядной перекрестной системы типизации и районирования значительно упрощается задача, позволяющая характеризовать многочисленные инженерно-геологические типы территорий Земли. Все выделенные типы естественно объединены в 14 геоструктурных типологических рядов с близкими регионально-геологическими и различными зонально-геологическими условиями и 9 типологических рядов с близкими зонально-геологическими и различными геоструктурными условиями. Поэтому все типы территорий, принадлежащие к одному структурному ряду (в каких бы подзонах они ни находились), будут иметь общие закономерности тектонического и геологического строения, единый характер новейших движений и структур, а также рельефа, четвертичных отложений и др. В то же время все типы территорий, относящиеся к одному зонально-геологическому ряду (к каким бы типам регионов они при этом ни принадлежали), будут иметь много общих черт состояния и свойств пород, фазового состояния подземных вод, развития комплекса экзогенных процессов, явлений и т. д.

Очень важно, что такой подход предопределяет возможность рассмотрения каждого инженерно-геологического типа, с одной стороны, как части крупной геоструктурной единицы со своими региональными закономерностями, сформировавшимися в ходе геологического развития, а с другой — как части определенной зональной единицы с присущими ей закономерностями распределения тепла и влаги и связанными с ними зонально-геологическими условиями. Это позволит более правильно и объективно оценить инженерно-геологические условия конкретной территории исходя из общих закономерностей.

Инженерно-геологическое типологическое районирование Земли, проведенное на основе совместного учета как региональных геологических, так и зонально-геологических признаков, позволило достаточно объективно выделить все многообразие инженерно-геологических типов территорий, имеющих сходные условия. Такое районирование позволяет определить положение любого региона в системе таксономических единиц всей Земли для более правильного его дальнейшего районирования. Типологическое районирование Земли облегчает возможности обобщений, экстраполяции и самого общего прогноза инженерно-геологических условий для неизученных территорий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Рассмотрев современное состояние трех основных теоретических разделов инженерной геологии: грунтоведения (изучение горных пород), инженерной геодинамики (изучение геологических процессов) и региональной инженерной геологии (изучение территорий), можно сделать следующие выводы.

1. В современной инженерной геологии широко применяются достижения фундаментальных геологических наук. Грунтоведение базируется главным образом на науках геохимического цикла минералогии, литологии, петрографии, геохимии. Методы, разработанные этими геологическими науками, в грунтоведении используются для изучения состава и строения горных пород. Выделение генетических и петрографических типов пород при их инженерно-геологическом изучении обязательно, так как дает представление об общих закономерностях и частных особенностях изучаемых грунтов. Общая теория литологии позволяет сформулировать основное методологическое положение грунтоведения: состав, строение и свойства грунтов не остаются неизменными, а изменяются под влиянием тех процессов, которые воздействуют на них с момента формирования породы до настоящего времени. Стратиграфия древних и четвертичных отложений, петрография и литология, геотектоника и в том числе неотектоника необходимы для анализа региональных условий территорий и их оценки в инженерно-геологическом отношении. Инженерная геодинамика опирается на достижения динамической геологии, тектоники, литологии и стратиграфии. Данные этих наук закладываются в основу инженерно-геологических прогнозов развития геологических процессов.

2. Инженерная геология использует достижения фундаментальных геологических наук не механически, а применительно к своим задачам и исходит из инженерно-геологических аспектов проблемы изучения горных пород, геологических процессов и территорий.

Грунтоведение рассматривает горные породы как многокомпонентные системы, в состав которых входят минеральная часть породы, твердое органическое вещество, различные формы воды, существующие в горных породах, газы, живые организмы и в первую очередь микроорганизмы. Такое изучение горных пород при характеристике их как грунтов необходимо потому, что под воздействием человека в первую очередь изменяются соотношения компонентов (прочностные, деформационные, физико-химические и другие). Свойства пород зависят от соотношений в них твердой, жидкой, газовой и живой компонентов.

Инженерная геодинамика, в отличие от динамической геологии, изучает как природные геологические процессы, так и процессы, возникающие под влиянием деятельности людей, т. е. инженерно-геологические (техногенные, антропогенные), которые отличаются от природных большей интенсивностью и сравнительно

малой площадью распространения. Инженерно-геологические процессы рассматриваются как аналоги геологических и как крупномасштабный эксперимент при изучении таких природных процессов, как карст, суффозия, процессы литогенеза и т. д.

Региональная инженерная геология, в отличие от стратиграфии, литологии, петрографии, динамической геологии, гидрогеологии, изучает не просто горные породы, геологические процессы, подземные воды и другие геологические условия территории, она изучает их взаимосвязи, закономерности пространственно-временной изменчивости в зависимости от региональных и зональных факторов.

3. Инженерная геология не только использует достижения фундаментальных геологических наук, но и в процессе развития обогащает эти смежные науки новыми данными, полученными инженерно-геологическими методами, что способствует дальнейшему развитию этих наук.

Инженеры-геологи много сделали в изучении связанной воды в глинистых породах, создании ее классификации, исследовании зависимости свойств пород от содержания в них различных видов связанной воды, а также роли воды в формировании состава, строения и свойств пород в процессе литогенеза.

Важная проблема уточнения границ подзон катагенеза, остающаяся актуальной на протяжении нескольких десятилетий и в равной степени интересующая специалистов, работающих в области нефтяной и угольной геологии, геологии полезных ископаемых, гидрогеологии, т. е. являющаяся общегеологической задачей, в последнее время получила новые данные в процессе инженерно-геологических исследований. Специалисты, работающие в области инженерной геологии, предложили новый критерий для определения степени катагенетических преобразований пород, в основу которого положен комплекс инженерно-геологических свойств глинистых пород (пористость, минеральная плотность, объемная масса, прочность и водопрочность, скорость распространения упругих волн), что позволяет более точно и однозначно судить о положении границ подзон катагенеза.

Именно инженерно-геологическое изучение геологических процессов, основанное на знании истории развития территорий и склонов, взаимосвязей эндогенных и экзогенных факторов, дало таким наукам, как динамическая геология, геоморфология, палеогеография и другие, возможность уточнить генетические особенности геологических процессов, их взаимосвязь и взаимообусловленность. В инженерной геодинамике геологические процессы, например, такие, как оползни, и факторы их развития получили всесторонние характеристики, что открыло дорогу созданию моделей этих процессов. Последнее важно и для практики, и для дальнейшего научного познания самих процессов.

В инженерной геодинамике впервые установлено качественное отличие гравитационных смещений больших объемов, что прежде всего выражается в быстроте и дальности их смещения. Установле-

но, что смещение крупных лавин, оползней, обвалов, селей управляется сходными механизмами. Эти закономерности должны учитываться при изучении обвально-оползневых процессов не только на Земле, но и на других планетах.

Именно инженерной геодинамикой установлено, что развитие гравитационных процессов зависит от структуры литосферы, тектонических полей напряженности Земли, региональных зон растяжений и сжатий. Следовательно, данные инженерной геодинамики по изучению гравитационных процессов могут служить одним из научных методов геотектоники.

4. Достижения всех направлений инженерной геологии, ее влияние на развитие смежных наук геологического цикла позволяет говорить о том, что современная инженерная геология стала одной из фундаментальных геологических наук наравне с литологией, петрографией, геотектоникой и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. *Абрамов С. П.* Техническое нормирование и стандартизация инженерно-геологических изысканий в строительстве. М., Стройиздат, 1974.
2. *Беликов Б. П., Александров К. С., Рыжова Т. В.* Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М., Наука, 1975.
3. *Белый Л. Д.* Теоретические основы инженерно-геологического картирования. М., Наука, 1984.
4. *Бондарик Г. К.* Общая теория инженерной (физической) геологии. М., Недра, 1981.
5. *Герасимова А. С., Маркевич Т. Н.* Инженерно-геологическое районирование Западной Сибири на основе анализа показателей некоторых свойств глинистых пород. — *Инженерная геология*, 1980, № 1, с. 44—57.
6. *Гзовский М. В.* Основы тектонофизики. М., Наука, 1975.
7. *Голодовская Г. А., Демидюк Л. М., Шоумян Л. В.* Инженерно-геологические исследования при разведке месторождений полезных ископаемых. М., Изд-во МГУ, 1975.
8. *Голодковская Г. А., Шоумян Л. В.* К природе прочности массивов скальных горных пород. — *Вестник МГУ. Сер. геол.*, 1974, № 1, с. 33—48.
9. *Грунтоведение*/Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Р. С. Зиангиров и др., М., Изд-во МГУ, 1971.
10. *Грунтовые толщи* Нечерноземной зоны РСФСР /В. Т. Трофимов, П. И. Фадеев, М. П. Кропоткин и др./ — В кн.: *Вопросы инженерной геологии и грунтоведения*. М., 1983, с. 317—335.
11. *Гупта Х., Растоги Б.* Плотины и землетрясения. М., Мир, 1979.
12. *Емельянова Е. П.* Анализ методов и особенности прогноза оползней в горноскладчатых областях. — В кн.: *Геологические закономерности развития оползней, обвалов и селевых потоков*. М., 1976, вып. 1, с. 35—62.
13. *Ершова С. Б., Сергеев Е. М.* Особенности инженерно-геологического типологического районирования Земли. — В кн.: *Вопросы инженерной геологии и грунтоведения*. М., 1983, вып. 5, с. 289—303.
14. *Золотарев Г. С.* Инженерная геодинамика. М., Изд-во МГУ, 1983.
15. *Золотарев Г. С.* Оползни, обвалы, эрозионные явления и инженерно-геологическое районирование Черноморского побережья Крыма. — В кн.: *Вопросы формирования и устойчивости высоких склонов*. М., 1983, с. 21—52.
16. *Инженерно-геологические аспекты рационального использования и охраны геологической среды*. М., Наука, 1981.
17. *Инженерная геология СССР*. Под ред. Е. М. Сергеева. М., Изд-во МГУ, т. I—III, 1976—78.
18. *Коробанова И. Г.* Закономерности формирования свойств терригенных отложений. М., Наука, 1983.
19. *Котлов Ф. В.* Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М., Недра, 1978.
20. *Красилова Н. С.* Формирование физико-механических свойств некоторых породообразующих минералов. — В кн.: *Вопросы инженерной геологии и грунтоведения*. М., 1983, вып. 4, с. 146—163.
21. *Красилова Н. С., Ладыгин В. М.* К вопросу о методике изучения петрографических особенностей скальных пород при инженерно-геологических исследованиях. — *Вестник МГУ. Сер. геол.*, 1975, № 5, с. 106—112.
22. *Кривошева З. А.* Изучение характера структурных связей глинистых пород зоны катагенеза методом микротвердометрии. — В кн.: *Вопросы инженерной геологии и грунтоведения*. М., 1983, вып. 4, с. 99—115.
23. *Кюнцель В. В.* Закономерности оползневого процесса на европейской территории СССР. М., Недра, 1980.
24. *Ломтадзе В. Д.* Инженерная геология. Инженерная петрология. Л., Недра, 1970.

25. *Лыкошин А. Г.* Гидродинамические закономерности развития карста платформенных и горно-складчатых областей. — Тр. МОИП, 1972, т. XLVII, с. 40—45.
26. *Лыкошин А. Г.* Вопросы изучения фильтрационных деформаций и неоднородность водопроницаемости горных пород. — Тр. Гидропроекта, 1976, № 48, с. 61—72.
27. *Методика инженерно-геологических исследований высоких обвальных и оползневых склонов/Под ред. Г. С. Золотарева и М. Янича.* М., Изд-во МГУ, 1980.
28. *Миرونенко В. А., Шестаков В. М.* Основы гидрогеомеханики. М., Недра, 1974.
29. *Монюшко А. М.* О влиянии тектонического фактора на формирование инженерно-геологических свойств глинистых пород. — Инженерная геология, 1979, № 3, с. 55—64.
30. *Мюллер Л.* Инженерная геология. Механика скальных массивов. М., Мир, 1971.
31. *Николаев Н. И., Наймарк А. А.* Карта новейшей тектоники СССР и сопредельных областей. М., 1979. (ВСЕГЕИ).
32. *Ниязов Р. А.* Формирование крупных оползней Средней Азии. Ташкент, ФАН, 1982.
33. *Общее мерзлотоведение/В. А. Кудрявцев, Б. Н. Достовалов, Н. Н. Романовский и др.* М., Изд-во МГУ, 1978.
34. *О природе изменения состава и свойств глинистых пород в процессах литогенеза./З. А. Кривошеева, Р. И. Злочевская, В. А. Королев, Е. М. Сергеев.* — Вестник МГУ. Сер. геол., 1977, № 4, с. 60—73.
35. *Попов И. В.* Инженерная геология СССР. М., Изд-во МГУ, 1973.
36. *Розовский Л. Б., Зелинский И. П.* Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Одесса, Изд-во Одесского ун-та, 1975.
37. *Сергеев А. И.* Методика инженерно-геологического изучения торфяных массивов, М., Наука, 1974.
38. *Сергеев Е. М.* Инженерная геология. М., Изд-во МГУ, 1978.
39. *Сергеев Е. М.* Инженерная геология. М., Изд-во МГУ, 1982.
40. *Трофимов В. Т.* Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. М., Изд-во МГУ, 1977.
41. *Трофимов В. Т.* Зональность инженерно-геологических условий континентов Земли. — Вестник МГУ. Сер. геол., 1983, № 6, с. 3—11.
42. *Трофимов В. Т.* Теоретические вопросы инженерно-геологического районирования. — Вестник МГУ. Сер. геол., 1979, № 1, с. 64—76.
43. *Тхань Н.* Закономерности формирования инженерно-геологических особенностей четвертичных глинистых грунтов влажных тропиков. Автореф. докт. дис. М., 1982.
44. *Федоренко В. С.* Обвально-оползневые зоны и их связи с глубинными разломами и трансорогенными структурами. — Инженерная геология, 1983, № 2, с. 3—14.
45. *Формирование структурных элементов лёссовых пород./А. В. Минервин, Н. Н. Комиссарова, В. Н. Соколов и др.* — Инженерная геология, 1982, № 2, с. 44—58.
46. *Хашин В. Е.* Общая геотектоника. М., Недра, 1973.
47. *Цытович Н. А.* Механика мерзлых грунтов. М., Высшая школа, 1973.
48. *Цытович Н. А., Тер-Мартirosян З. Г.* Основы прикладной геомеханики в строительстве. М., Высшая школа, 1981.
49. *Шанцер Е. В.* Генетические типы четвертичных отложений. М., Недра, 1982.
50. *Шеко А. И.* Закономерности формирования и прогноз селей. М., Недра, 1980.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

---

- Аллювий:**  
пойменный 292  
руслый 289, 291  
старичный 291  
Аномальный горизонт 104
- Воды:**  
грунтовые 258  
подземные 256, 259
- Геологическое:**  
подобие 230  
геологическая среда 10, 275  
Геолого-генетический комплекс 277  
Геоструктурные единицы 312  
Гипергенез 21, 22, 114, 115  
Горная порода 17  
Грунт 11, 50, 53
- Делювий 293**  
Диagenез 21, 35, 89, 91, 93, 95, 96  
Диафторез 69, 85, 86
- Зоны**  
инженерно-геологическая 310  
рифтовая 255  
сейсмогенная обвально-оползнева  
214
- Зональность**  
грунтовых вод 258  
инженерно-геологических условий  
244  
климатическая 187  
мерзлотной обстановки 265  
природная 186
- Инверсия свойств горных пород 40, 41**  
Инженерная геодинамика 11, 322, 323  
Инженерная геология 3, 4, 10, 322, 324  
Инженерно-геологический (ая):  
компонент 268  
массив 127  
область 311  
подзона 310  
потенциал 260  
провинция 309  
район 311  
регион 308  
тип территорий 315, 318  
Интенсивность проявления экзогенных процессов 179
- Карст 166, 167, 168, 194**  
Катагенез 21, 35, 90, 97, 98, 103, 108
- Катаклиз 69**  
Классификация:  
геологических формаций 286  
грунтов (общая) 48, 49, 50  
Кольматаж 166
- Литогенез 36, 42, 89, 116.**  
Литификация 94  
Литификационное:  
уплотнение 94, 95  
упрочнение 94, 95
- Модели:**  
литолого-структурные 237  
морфогенетические 237  
зон разгрузки 237  
фильтрационные 240  
прогнозные 240  
напряженности 240  
ретроспективные 240
- Напряженное состояние массива 206, 208, 209**
- Определяющая область процесса 235**
- Плотностная неоднородность ионов 64**  
Поле напряжений 246  
Прогнозы 156, 157, 229
- Районирование комплексов процессов 215**
- Сели 164, 165**  
Система:  
информационно-поисковая 230  
природно-техногенная 234  
Седиментогенез 21  
Структурная связь 19, 20, 50  
Структурный элемент 122  
Суффозия 165, 168, 196  
Сфера воздействия инженерного сооружения 127  
Схема природного процесса 218
- Теоретическая прочность минералов 57**  
Термоабразия 227  
Термокарст 227  
Техногенное воздействие 219, 221  
Техногенный обмен веществ 220  
Тип:  
генетический 20  
геодинамического режима 175



геодинамической обстановки 175,  
179, 183  
Типологический ряд геодинамических  
режимов 176, 178, 181

Упругие свойства минералов 57

Факторы инженерно-геологических  
условий 312, 314

Фация 78, 277, 278  
Формация 276, 278, 294

Характеристическая точка оползне-  
вого массива 218

Экзодиagenез 119

Экстенсивность проявления экзоген-  
ных процессов 180

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

Предисловие <i>Е. М. Сергеев</i> . . . . .	3
Введение <i>Е. М. Сергеев, В. Т. Трофимов</i> . . . . .	6
<b>Часть I. ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И СЛАГАЕМЫХ ИМИ МАССИВОВ</b> . . . . .	17
Глава 1. Петрогенетическая обусловленность инженерно-геологических особенностей горных пород . . . . .	17
Влияние петрографического состава горных пород на их инженерно-геологические особенности. <i>Е. М. Сергеев</i> . . . . .	17
Влияние генезиса на инженерно-геологические особенности горных пород. <i>Е. М. Сергеев, П. И. Фадеев</i> . . . . .	19
Влияние возраста на инженерно-геологические особенности горных пород. <i>Е. М. Сергеев, П. И. Фадеев</i> . . . . .	23
Влияние пространственного положения горных пород на их инженерно-геологические особенности. <i>В. Т. Трофимов</i> . . . . .	26
Глава 2. Влияние тектонических процессов на формирование инженерно-геологических особенностей горных пород. <i>Г. А. Голодковская</i> . . . . .	30
Тектонический фактор — один из главных факторов формирования инженерно-геологических особенностей горных пород . . . . .	30
Влияние колебательных тектонических движений на формирование свойств горных пород . . . . .	33
Влияние складчатости на формирование свойств горных пород . . . . .	39
Глава 3. Геологическая история развития территории — методологическая основа инженерно-геологического изучения горных пород. <i>Е. М. Сергеев</i> . . . . .	42
Изменения инженерно-геологических особенностей горных пород в процессе петрогенеза . . . . .	42
Инженерно-геологические особенности горных пород различных структурных этажей . . . . .	44
Изменение горных пород под влиянием тектонических процессов и процессов гипергенеза . . . . .	46
Глава 4. Общая инженерно-геологическая классификация горных пород. <i>Е. М. Сергеев</i> . . . . .	48
Принципы построения классификаций горных пород . . . . .	48
Общая классификация горных пород . . . . .	49
Глава 5. Формирование инженерно-геологических особенностей магматических пород . . . . .	56
Влияние условий образования на формирование инженерно-геологических особенностей магматических пород. <i>Н. С. Красилова</i> . . . . .	56
Инженерно-геологические особенности основных типов интрузивных пород. <i>Н. С. Красилова</i> . . . . .	63
Инженерно-геологические особенности основных типов эффузивных пород. <i>В. М. Ладыгин</i> . . . . .	71
Глава 6. Формирование инженерно-геологических особенностей метаморфических пород. ( <i>Н. С. Красилова</i> ) . . . . .	74
Влияние условий образования метаморфических пород на формирование их инженерно-геологических особенностей . . . . .	74
	329

Инженерно-геологические особенности основных типов метаморфических пород . . . . .	78
Изменение инженерно-геологических особенностей пород под действием гидротермальных процессов . . . . .	86
<b>Глава 7. Формирование инженерно-геологических особенностей осадочных пород в процессе литогенеза . . . . .</b>	<b>89</b>
Формирование инженерно-геологических особенностей осадочных пород на стадии диагенеза. <i>И. Г. Коробанова, П. И. Фадеев</i> . . . . .	90
Формирование инженерно-геологических особенностей осадочных пород на стадии катагенеза. <i>З. А. Кривошеева, П. И. Фадеев</i> . . . . .	97
Формирование инженерно-геологических особенностей осадочных пород в процессе континентального литогенеза. <i>А. С. Герасимова, А. В. Минервин, П. И. Фадеев</i> . . . . .	114
<b>Глава 8. Массивы и толщи горных пород в инженерной геологии . . . . .</b>	<b>125</b>
Понятие о массиве и грунтовой толще. <i>В. Т. Трофимов, Л. В. Шаумян</i> . . . . .	125
Грунтовые толщи, признаки их выделения и классификация. <i>В. Т. Трофимов</i>	
Массивы скальных горных пород. <i>Л. В. Шаумян</i> . . . . .	137
<b>Часть II. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОДИНАМИКИ . . . . .</b>	<b>150</b>
<b>Глава 9. Методологические основы инженерной геодинамики. <i>Г. С. Золотарев</i> . . . . .</b>	<b>150</b>
Геологические и инженерно-геологические процессы и явления как отражение современного развития верхней части литосферы . . . . .	150
Общие закономерности и факторы развития процессов . . . . .	152
О прогнозе геологических и инженерно-геологических процессов и о «риске» при решении задач практики . . . . .	156
<b>Глава 10. Общая классификация геологических и инженерно-геологических процессов и явлений. <i>Г. С. Золотарев</i> . . . . .</b>	<b>160</b>
<b>Глава 11. Типы и механизмы геологических процессов в разных комплексах пород и тектонических структурах. <i>Э. В. Калинин</i> . . . . .</b>	<b>163</b>
Типы и механизмы процессов, обусловленные деятельностью поверхностных вод . . . . .	163
Процессы, обусловленные деятельностью подземных вод . . . . .	165
Проявление склоновых процессов в различных породах и тектонических условиях . . . . .	169
Подземные и наземные деформации горных пород, обусловленные изменением их напряженного состояния . . . . .	172
<b>Глава 12. Неотектонические движения как фактор формирования типов геодинамической обстановки. <i>Т. Ю. Пиотровская</i> . . . . .</b>	<b>174</b>
Типы геодинамических режимов . . . . .	176
Связь экзогенных процессов с типами геодинамических режимов и выделение типов геодинамической обстановки . . . . .	179
<b>Глава 13. Роль климата и поверхностных вод в формировании геологических процессов. <i>В. С. Федоренко</i> . . . . .</b>	<b>184</b>
Климат и поверхностные воды как факторы развития геологических процессов . . . . .	185
Широтная и высотная климатическая зональность и ее влияние на парагенезис и интенсивность геологических процессов . . . . .	186
Климатические ритмы и их инженерно-геологическое значение . . . . .	188
Оледенение и активизация геологических процессов . . . . .	190

Глава 14. Подземные воды и их режим как фактор развития геологических процессов. <i>Э. В. Калинин</i> . . . . .	193
Растворение подземными водами горных пород как фактор развития геологических процессов . . . . .	194
Деформации пород при взаимодействии их с подземными водами как причина формирования геологических процессов . . . . .	195
Силовое воздействие подземных вод как фактор развития геологических процессов . . . . .	198
Глава 15. Поля естественных напряжений как фактор развития геологических процессов. <i>Э. В. Калинин</i> . . . . .	200
Напряженное состояние верхней части земной коры . . . . .	201
Рельеф как фактор, изменяющий поле естественных напряжений . . . . .	203
Влияние подземных вод на изменение напряжений в горных породах . . . . .	207
Роль подземных полостей в изменении напряженного состояния горных пород . . . . .	209
Глава 16. Региональные и локальные закономерности развития геологических процессов. <i>В. С. Федоренко</i> . . . . .	212
Среда формирования геологических процессов и ее значение . . . . .	212
Локальные закономерности развития геологических процессов . . . . .	216
Глава 17. Особенности развития геологических процессов под влиянием техногенных факторов. <i>А. А. Махорин</i> . . . . .	219
Техногенные факторы, определяющие развитие инженерно-геологических процессов . . . . .	220
Влияние техногенных факторов на развитие геологических процессов . . . . .	222
Глава 18. Основы прогноза геологических и инженерно-геологических процессов. <i>А. А. Махорин</i> . . . . .	229
Существующие методы прогноза процессов . . . . .	230
Системный подход к прогнозу геологических процессов . . . . .	232
Использование системных моделей для оценки и прогноза геологических процессов . . . . .	236
<b>Часть III. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ</b> . . . . .	242
Глава 19. Факторы инженерно-геологических условий и закономерности их формирования . . . . .	242
Региональные геологические и зональные факторы формирования инженерно-геологических условий. <i>В. Т. Трофимов</i> . . . . .	242
Роль геолого-структурных факторов в формировании инженерно-геологических условий. <i>Г. А. Голодковская</i> . . . . .	244
Неотектоно-геоморфологические факторы, их роль в формировании инженерно-геологических условий. <i>С. Б. Ершова</i> . . . . .	252
Гидрогеологические условия как фактор формирования инженерно-геологического облика территории. <i>Г. А. Голодковская</i> . . . . .	256
Мерзлотная обстановка как фактор формирования инженерно-геологических условий. <i>В. Т. Трофимов</i> . . . . .	260
Современные геологические процессы и явления как фактор формирования инженерно-геологических условий. <i>В. Т. Трофимов</i> . . . . .	266
Инженерно-геологические условия — результат геологического развития территории. <i>Г. А. Голодковская</i> . . . . .	268
Глава 20. Структурно-вещественные комплексы в региональной инженерной геологии . . . . .	276
Классификация геологических тел в региональной инженерной геологии. <i>Г. А. Голодковская</i> . . . . .	276
	331

Значение учения о формациях для региональной инженерной геологии. <i>Г. А. Голодковская</i> . . . . .	279
Инженерно-геологические особенности некоторых генетических типов отложений и их фаций. <i>С. Б. Ершова</i> . . . . .	285
<b>Глава 21. Теоретические и методологические основы инженерно-геологического районирования</b> . . . . .	<b>294</b>
Районирование в инженерной геологии. <i>В. Т. Трофимов</i> . . . . .	294
Принципы и признаки инженерно-геологического районирования. <i>В. Т. Трофимов</i> . . . . .	299
Системы и таксономические единицы районирования. <i>В. Т. Трофимов</i>	304
Типологическое инженерно-геологическое районирование Земли. <i>С. Б. Ершова</i> . . . . .	312
Заключение. <i>Е. М. Сергеев</i> . . . . .	322
Список литературы . . . . .	325
Предметный указатель . . . . .	327

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ**

Редакторы издательства **Н. В. Венгерцева, Р. В. Добровольская**  
Переплет художника **И. А. Слюсарева**  
Художественный редактор **В. В. Шутько**  
Технический редактор **Л. Г. Лаврентьева**  
Корректор **Э. А. Ляхова**

**ИБ № 5558**

Сдано в набор 19.11.84. Подписано в печать: 29.01.85. Т-04740.  
Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 1. Гарнитура «Литературная».  
Печать высокая. Усл.-печ. л. 21,0. Усл.-кр. отт. 21,0. Уч.-изд. л. 23,56.  
Тираж 3500 экз. Заказ 1972/9416—2. Цена 2 руб.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,  
Третьяковский проезд, 1/19

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном  
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.