

Е. М. Сергеев

Инженерная  
ГЕОЛОГИЯ

551/071  
С-322

Е. М. Сергеев

# ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,  
ПЕРЕРАБОТАННОЕ

Допущено Министерством высшего  
и среднего специального  
образования СССР  
в качестве учебника  
для студентов  
геологических специальностей  
вузов

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
1982

453404



Сергеев Е. М. Инженерная геология, изд. 2. М., Изд-во Моск. ун-та, 1982. 248 с., с ил.

В учебнике рассматриваются основные вопросы грунтоведения, инженерной геодинамики, региональной инженерной геологии; значительное внимание уделяется проблемам охраны и рационального использования геологической среды.

Для студентов геологических специальностей, а также для специалистов, работающих в области инженерной геологии, гидрогеологии, мерзлотоведения, почвоведения, строительства, гидротехники и др.

Рецензенты:

кафедра инженерной геологии  
Московского геологоразведочного ин-та  
им. Серго Орджоникидзе;  
профессор,  
доктор геолого-минералогических наук  
Г. А. Голодковская.

ЕВГЕНИЙ МИХАИЛОВИЧ  
СЕРГЕЕВ  
ИНЖЕНЕРНАЯ  
ГЕОЛОГИЯ,  
изд. 2

Заведующая редакцией И. И. Щехура  
Редакторы И. И. Щехура, Р. И. Кривило  
Художественный редактор М. Ф. Евстафиева  
Переплет художника М. М. Мерзеевского  
Технический редактор Е. Д. Захарова  
Корректоры Л. А. Костылева, Т. С. Милякова

Тематический план 1982 г. № 171  
ИБ № 1364

Сдано в набор 28.07.81. Подписано к печати 15.02.82.  
Л-80543 Формат 70x100<sup>1/16</sup>. Бумага тип. № 1. Гарни-  
тура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л.  
20,15. Уч.-изд. л. 21,02. Тираж 11600 экз. Заказ 190.  
Цена 1 р. 20 к. Изд. № 1667.  
Орден «Знак Почета» издательство  
Московского университета.  
103009, Москва, ул. Герцена, 5/7.  
Типография ордена «Знак Почета»  
издательства МГУ.  
Москва, Ленинские горы

С 3202000000-021 171-82  
077(02)-82

© Издательство Московского университета, 1982 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	5
Введение . . . . .	6
<i>Часть I</i> . . . . .	11
<b>ГРУНТОВЕДЕНИЕ</b> . . . . .	11
Глава 1 . . . . .	11
Особенности инженерно-геологического изучения состава и строения горных пород и почв . . . . .	11
§ 1. Роль генезиса и петрографических особенностей горных пород при их инженерно-геологической оценке . . . . .	11
§ 2. Изучение горных пород как многокомпонентных систем . . . . .	13
§ 3. Влияние минерального состава и органического вещества на свойства грунтов . . . . .	13
§ 4. Влияние строения грунтов на их свойства . . . . .	17
§ 5. Вода в грунтах . . . . .	23
§ 6. Обменные ионы в грунтах и влияние их на микростроение и свойства грунтов . . . . .	27
§ 7. Газовый компонент в грунтах и влияние его на свойства грунтов . . . . .	30
§ 8. Влияние макро- и микроорганизмов на свойства грунтов . . . . .	31
Глава 2 . . . . .	34
Инженерно-геологическое подразделение горных пород . . . . .	34
§ 1. Структурные связи в горных породах и влияние их на свойства пород . . . . .	34
§ 2. Формирование структурных связей в процессе генезиса пород и под влиянием постгенетических процессов . . . . .	39
§ 3. Классификация грунтов, построенная с учетом структурных связей . . . . .	40
Глава 3 . . . . .	41
Свойства грунтов и их изменения под влиянием различных факторов . . . . .	41
§ 1. Физические свойства грунтов . . . . .	41
§ 2. Физико-химические свойства грунтов . . . . .	46
§ 3. Физико-механические свойства грунтов . . . . .	60
Глава 4 . . . . .	67
Инженерно-геологическая характеристика массивов горных пород . . . . .	67
§ 1. Понятие о массиве горных пород . . . . .	67
§ 2. Факторы, определяющие поведение массива грунтов . . . . .	70
Глава 5 . . . . .	75
Скальные грунты . . . . .	75
§ 1. Инженерно-геологические особенности магматических пород . . . . .	75
§ 2. Инженерно-геологические особенности метаморфических пород . . . . .	78
§ 3. Инженерно-геологические особенности осадочных сцементированных пород . . . . .	80



Глава 6		87
Дисперсные грунты		87
§ 1. Инженерно-геологические особенности несвязных грунтов		87
§ 2. Инженерно-геологические особенности связных грунтов		89
§ 3. Инженерно-геологические особенности почв и торфов		100
Глава 7		102
Искусственные грунты		102
§ 1. Подразделение искусственных грунтов		102
§ 2. Искусственные скальные грунты		102
§ 3. Искусственные дисперсные грунты		104
<b>Часть II</b>		
<b>ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА</b>		110
Глава 8		110
Изучение геологических процессов в инженерной геологии		110
§ 1. Особенности изучения геологических процессов при инженерно-геологических исследованиях		110
§ 2. Понятие об инженерно-геологических (антропогенных) процессах		115
§ 3. Факторы, определяющие развитие геологических и инженерно-геологических процессов		118
§ 4. Классификация процессов в инженерной геологии		123
Глава 9		126
Эндогенные процессы и вызванные ими явления		126
§ 1. Инженерно-геологическое значение новейших и современных тектонических движений		126
§ 2. Задачи инженерной геологии в изучении природных сейсмических явлений		128
§ 3. Движение верхней части земной коры под влиянием производственной деятельности человека		131
Глава 10		133
Экзогенные процессы климатического характера и вызванные ими явления		133
§ 1. Выветривание		133
§ 2. Криогенные и посткриогенные геологические процессы и явления		139
§ 3. Эоловые процессы и явления		151
Глава 11		154
Экзогенные процессы водного характера и вызванные ими явления		154
§ 1. Растворение		154
§ 2. Суффозия		158
§ 3. Размывание		159
§ 4. Заболачивание		164
Глава 12		169
Гравитационные (склоновые) процессы и вызванные ими явления		169
§ 1. Обвалы и осыпи		169
§ 2. Оползни		172
§ 3. Сели		178
§ 4. Снежные лавины		182
<b>Часть III</b>		
<b>РЕГИОНАЛЬНАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ</b>		184
Глава 13		184
Общие положения региональной инженерной геологии		184
§ 1. Инженерно-геологическое изучение территорий		184
§ 2. Инженерно-геологическая типизация территорий		184
§ 3. Инженерно-геологическое районирование территорий		188
Глава 14		190
Инженерно-геологические особенности территории СССР		193
§ 1. Общая инженерно-геологическая характеристика территории СССР		193
§ 2. Шиты древних и молодых платформ на территории СССР		193
§ 3. Плиты древних и молодых платформ на территории СССР		196
§ 4. Складчатые области, не испытавшие существенного влияния альпийского орогенеза		201
§ 5. Складчатые области альпийского орогенеза и складчатые области, испытывавшие на себе его существенное влияние		225

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1978 г. вышел учебник «Инженерная геология», написанный автором и предназначенный для студентов геологических специальностей вузов. Он нашел многих читателей как среди студентов вузов, так и среди специалистов, работающих в области инженерной геологии и смежных наук. Это вполне объяснимо, так как с каждым годом становится все более и более ясна огромная роль поверхностной части литосферы, той части Земли, где живет и трудится человек, на которую человек постоянно оказывает влияние и которая сама, влияя на характер его деятельности. Эту часть литосферы целесообразно назвать геологической средой, что будет подчеркивать ее принадлежность к окружающей среде, связь ее с другими компонентами окружающей среды.

Геологическая среда является объектом изучения ряда геологических наук. Связь между этими науками постоянно возрастает. На наших глазах формируется новое направление в геологической науке — геология окружающей среды, в пределах которого геологические науки сохраняют свои особенности, хотя и имеют общую задачу: рациональное использование геологической среды.

Важность этой задачи неоднократно подчеркивалась на последних съездах КПСС. Проиллюстрировать ее можно такой цифрой: 15% поверхности суши к 2000 г. будут заняты сооружениями человека, находящимися во взаимосвязи с геологической средой. Эти сооружения создаются в связи с добычей полезных ископаемых, при различных видах строительства, в результате промышленной деятельности и сельскохозяйственного производства. Проектирование и эксплуатация этих разнообразных сооружений осуществляются при участии не только специалистов, работающих в области инженерной геологии, гидрогеологии и мерзлотоведения. В решении проблем геологии окружающей среды все большее участие принимают геологи, занимающиеся геологическим картированием, стратиграфией, тектоникой, поиском и разведкой полезных ископаемых. Поэтому в 1974 г. было решено, что курс инженерной геологии должны слушать большинство студентов, обучающихся на геологических факультетах.

Автор читал этот курс на протяжении ряда лет на геологическом факультете Московского университета имени М. В. Ломоносова. Приобретенный опыт позволяет предложить несколько иной вариант учебника по инженерной геологии, оставаясь в пределах программы, утвержденной Минвузом СССР. Основное отличие настоящего учебника от учебника, изданного в 1978 г., состоит в большей концентрации основных положений и исключении второстепенного материала, в результате чего уменьшился объем учебника. Основные его методологические положения остались неизменными.

Автор надеется, что книга будет представлять интерес для специалистов различного профиля и квалификации, сталкивающихся в своей научной и производственной деятельности с вопросами инженерной геологии.

Автор пользуется случаем выразить искреннюю благодарность всем, кто просмотрел рукопись учебника, участвовал в ее оформлении, особенно В. Т. Трофимову, В. И. Осипову, Г. А. Голодковской, Г. С. Золотареву, С. В. Дроздову, И. С. Комарову, Н. К. Новик, М. В. Фламинной.



Возникновение инженерной геологии и развитие ее на первых этапах были связаны со строительством. Исследования горных пород в строительных целях начали проводиться задолго до появления термина «инженерная геология». Поэтому можно говорить о предистории инженерной геологии, которая, по существу, складывается из двух этапов.

Первый этап — когда строители и горные инженеры самостоятельно изучали горные породы, являющиеся основанием, средой и материалом для различных сооружений. Вряд ли можно, хотя бы приблизительно, указать, когда начали изучаться горные породы в связи со строительством. Началом же научных исследований и обобщения накопленного материала инженерно-геологического характера, т. е. началом первого этапа предистории инженерной геологии, можно считать первые десятилетия XIX в. Оно было, безусловно, связано с развитием промышленного капитализма в Европе, и в частности в России. Строительство заводов, фабрик, плотин и других сооружений требовало наиболее рациональных решений: достаточной их надежности при наименьших затратах. Достигнуть этого без изучения горных пород было нельзя, поэтому строители начали уделять им гораздо больше внимания, чем ранее. При этом в их работах горные породы назывались грунтами.

С целью обобщения накопившегося опыта строительства и использования его в сходных условиях строителям самим пришлось разрабатывать классификации грунтов, описывать их особенности, характеризовать свойства грунтов, учитывать воздействие геологических процессов на различные сооружения.

Второй этап предистории инженерной геологии связан с привлечением геологов к изысканиям под строительство (с начала XIX по 20-е годы XX в.). В это время геологи начали привлекаться к решению вопросов в связи со строительством железных дорог, каналов и других крупных сооружений. Среди геологов, консультировавших строителей, было немало известных ученых. В качестве примера можно назвать: В. Смита (Англия), Ч. Беркли (США), И. В. Мушкетова, В. А. Обручева, А. П. Павлова и др. При изысканиях под железные дороги большое внимание уделялось геологическому строению полосы трассы и геологическим процессам в ее пределах.

**Возникновение грунтоведения и механики грунтов.** После Великой Октябрьской социалистической революции в Советском Союзе возникло новое направление в изучении почв и горных пород — грунтоведение. Предпосылками для его возникновения явились: генетический подход, разработанный В. В. Докучаевым в почвоведении, и работы П. А. Земятченского по изучению глин, сформулированного в 1923 г. положение о том, что глину надо изучать как физическое тело, сложившееся в определенных естественноисторических условиях.

Началом оформления грунтоведения следует считать создание в Петрограде в 1923 г. Дорожно-исследовательского бюро, которое под руководством Н. И. Прохорова, П. А. Земятченского и Н. Н. Иванова организовало исследование почв и осадочных пород (преимущественно молодых) пород для дорожного строительства. Возникло дорожное грунтоведение, которое позднее, когда генетический подход нашел себе место при изучении горных пород для других видов инженерных сооружений, утратило прилагательное «дорожное» и стало называться просто

роко — «грунтоведение». В 1930 г. была открыта кафедра грунтоведения в Ленинградском университете, а в 1938 г. такая же кафедра — в Московском университете.

Под грунтоведением стала пониматься наука, изучающая любые горные породы, почвы и искусственные грунты как объект инженерно-строительной деятельности человека, свойства которых определяются их генезисом и постгенетическими процессами и которые представляют собой многокомпонентные системы, изменяющиеся во времени.

Грунтоведение с самого начала развивалось как естественноисторическая наука. Большое значение для его развития имели работы П. А. Земятченского, М. М. Филатова, В. В. Охотина, В. А. Приклонского, Б. М. Гуменского, И. В. Попова, С. С. Морозова и др.

В 1925 г. вышла монография К. Терцаги «Строительная механика грунтов», положившая начало новой науке — «механике грунтов», возникшей на стыке физико-математических, строительных и геологических наук. Механика грунтов рассматривает те 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, ставятся на первое место, а геологические особенности грунтов, сформировавшиеся в результате их генезиса, учитываются меньше. В западных странах изучение горных пород для строительных целей стало осуществляться преимущественно в рамках механики грунтов; в Советском Союзе получили развитие как грунтоведение, так и механика грунтов.

**Возникновение и развитие инженерной геологии.** При решении вопросов, связанных со строительством, мало знать особенности горных пород, изучаемые грунтоведением и механикой грунтов. До начала строительства, на стадии выбора наилучшего варианта участка и объективной оценки конкурирующих вариантов, необходим широкий круг сведений о геологическом строении территории, геологических процессах, которые уже протекают или могут возникнуть в результате строительства, о гидрогеологических условиях и т. д. Изучение этих вопросов взяла на себя новая наука — инженерная геология.

Сейчас трудно установить, откуда появилось это название. По воспоминаниям И. В. Попова, «оно носилось в воздухе и употреблялось русскими геологами уже в 20-х годах». Впервые под названием «Инженерная геология» в 1929 г. вышла книга Редлиха, Кампе и Терцаги на немецком языке, но в ней обоснование названия и изложение методологических основ инженерной геологии отсутствовали.

Инженерная геология как наука оформилась впервые в Советском Союзе. На первой стадии ее формирования решающее значение имело гидротехническое строительство, явившееся частью ленинского плана



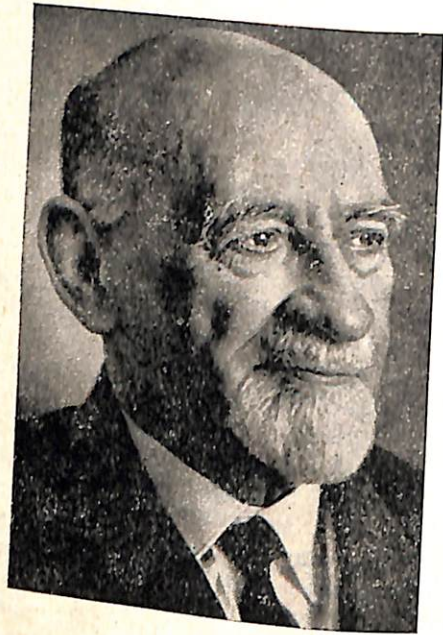
М. М. Филатов



электрификации нашей страны. Большое значение для возникновения и развития инженерной геологии имели работы Ф. П. Саваренского, Г. Н. Каменского, Н. Ф. Погребова, И. В. Попова, Н. Н. Маслова, М. П. Семенова, В. А. Приклонского и др., принимавших участие в изысканиях под строительство гидроэлектростанций на Волге, Днепре, по трассе канала Волга—Москва и др. Большой вклад в становление инженерной геологии как науки внесли крупнейшие советские геологи: Е. В. Милановский, Г. Ф. Мирчинк, Н. С. Шацкий и др.



Ф. П. Саваренский



И. В. Попов

В 1929 г. была открыта кафедра инженерной геологии в Ленинградском горном институте, а в 1931 г. — в Московском геологоразведочном институте. В 1937 г. вышли в свет книги: «Инженерная геология» Ф. П. Саваренского и «Методика инженерно-геологических исследований для гидротехнического строительства», написанная М. П. Семеновым, Н. И. Биндеманом и М. М. Гришиным, которые окончательно закрепили представление об инженерной геологии как новой отрасли геологической науки.

В те же годы за рубежом возникла «геотехника», которая получила широкое развитие в Швеции, Норвегии, Германии, Англии, США и ряде других стран. На первое место в «геотехнике» выдвигались механико-математические методы анализа геологических и инженерно-геологических явлений, влияющих на устойчивость сооружений, а геологическим исследованиям отводилась второстепенная роль. Поэтому многие ученые, работающие в области инженерной геологии в СССР, выступили с критикой методологических основ геотехники. В этой борьбе инженерная геология еще больше укрепила свои позиции как геологическая наука, а ее определение стало более широким.

В 1951 г. вышел учебник «Инженерная геология» И. В. Попова. В нем автор пишет: «Инженерная геология как наука

раслью геологии, изучающей динамику верхних горизонтов земной коры в связи с инженерной деятельностью человека».

Инженерная геология, подобно всей современной науке, развивалась под влиянием процессов дифференциации и синтеза. В результате дифференциации сформировались три основных раздела инженерной геологии (три инженерно-геологические дисциплины): грунтоведение, инженерная геодинамика и региональная инженерная геология. Процесс синтеза в инженерной геологии выражается во взаимопроникновении инженерно-геологических дисциплин и во взаимосвязи инженерной геологии со смежными науками, в первую очередь с гидрогеологией и мерзлотоведением.

Именно в таком понимании инженерная геология стала развиваться в социалистических странах: Польше, Чехословакии, ГДР, Югославии и др. Это направление нашло многих сторонников в капиталистических и развивающихся странах. Благодаря этому оказалось возможным создать в 1968 г. на XXII Международном геологическом конгрессе Международную ассоциацию инженеров-геологов (МАИГ).

Однако нельзя сказать, что развитие инженерной геологии завершилось. В настоящее время значительно расширяется круг задач, стоящих перед инженерной геологией. В связи с этим изменяется и понятие самого термина «инженерная геология».

В 1944 г. В. И. Вернадский ввел понятие о «ноосфере» — сфере разума, «где человек становится крупнейшей геологической силой». Справедливость его слов становится все более очевидной по мере развития научно-технического прогресса.

Следующие примеры подтверждают это положение. На 1970 год площадь Земли, занятая под жилые застройки и другие инженерные сооружения, составляла 4% суши, а к 2000 г. по прогнозу эта площадь будет занимать около 15% суши.

Особая роль принадлежит городам, где к концу XX в. предположительно будет жить более половины населения планеты. Уже сейчас по переписи населения 1979 г. в Советском Союзе в городах живет 62% населения страны. Город — это территория, где воздействие человека на поверхностную часть литосферы наиболее интенсивно и разнообразно; это воздействие может достигать глубины 100 и более метров.

Деятельность людей, связанная с горными и строительными работами, по своим масштабам соизмерима с денудационной работой рек. Производственная деятельность людей приводит к ежегодному перемещению 10 000 км<sup>3</sup> (Рябчиков, 1973) вещества. На поверхности Земли оказываются тысячи кубокилометров отвалов пород, ничего общего не имеющих с современным четвертичным покровом.

Общая протяженность железнодорожной сети мира составляет около 1 400 тыс. км. Породы, положенные в насыпи железных и шоссейных дорог, сопоставимы с современными отложениями рек.

Протяженность берегов искусственных водохранилищ, построенных только в Советском Союзе, приближается к величине земного экватора; на 1968 г. их протяженность была 33 тыс. км. На всем этом протяжении идет интенсивная переработка берегов, образуются оползни, происходят процессы засоления и заболачивания.

Длина оросительных магистральных каналов в СССР превышает 300 тыс. км, что составляет 3/4 расстояния между Землей и Луной.

Мелиоративное и ирригационное строительство захватывает массивы в десятки и даже сотни квадратных километров. Площадь орошаемых земель к концу нашего века во всем мире, по-видимому, достигнет 200 млн. га. Не меньшая площадь подвергнется осушению.



# ЧАСТЬ I

## ГРУНТОВЕДЕНИЕ

### ГЛАВА I

#### ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ПОЧВ

##### § 1. РОЛЬ ГЕНЕЗИСА И ПЕТРОГРАФИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ

Грунтоведение можно определить как науку, изучающую любые горные породы и почвы как многокомпонентные динамичные системы, изменяющиеся в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека. Горные породы изучаются петрографией и литологией, но только грунтоведение подходит к ним как к многокомпонентным динамичным системам.

Основным положением советского грунтоведения является положение о зависимости свойств грунтов от их состава, структуры и текстуры. Состав, структура, текстура, а отсюда и свойства горных пород формируются в процессе их генезиса и изменяются под влиянием постгенетических процессов: диагенеза, эпигенеза и гипергенеза. Поэтому при оценке пород в инженерно-геологическом отношении состав, структура и текстура грунтов и их свойства изучаются в зависимости от генезиса и постгенетических процессов.

Генетический подход при изучении грунтов является методологической основой грунтоведения, благодаря чему оно относится к наукам геологического цикла. Причем под генетическим подходом следует иметь в виду анализ геологической истории развития территории, сложившейся изучаемыми горными породами, для того, чтобы можно было понять, что испытала порода за период с момента своего формирования до наших дней, какова была ее «геологическая жизнь».

В основе генетического изучения горных пород в инженерно-геологических целях лежит подразделение их на три основные общеизвестные группы: магматические, осадочные и метаморфические, которые одновременно отражают их генезис и важнейшие петрографические особенности. Дальнейшее более дробное подразделение горных пород на генетические и петрографические типы дает еще большую информацию об их особенностях, важных при решении различных инженерно-геологических вопросов.

Это справедливо для всех пород. В качестве примера возьмем граниты. Граниты — интрузивные породы. Термин «интрузивные» ха-

На этих площадях человек коренным образом меняет водный режим и состояние почв и горных пород, слагающих поверхностную часть Земли. Количество примеров, показывающих масштабы воздействия человека на поверхностную часть литосферы, можно было бы умножить. Вся инженерно-хозяйственная деятельность людей тесно связана между собой, и в такой же тесной связи оказываются различные виды воздействия человека на земную кору. Однако в настоящее время наибольшее значение в этом отношении имеет строительная и горнодобывающая деятельность людей, под влиянием которой в первую очередь «меняется лик Земли, исчезает девственная природа» (Вернадский, 1944).

Интенсивное воздействие человека на поверхностную часть земной коры требует изучения инженерно-геологических условий крупных территорий и прогноза их изменения под влиянием деятельности человека на длительное время. При этом под инженерно-геологическими условиями понимаются существующие в данное время особенности геологического строения территории, состава и свойств горных пород, геологических процессов, рельефа и подземных вод. Без знания этих условий невозможно рациональное решение проблем, связанных с инженерным воздействием человека на поверхностную часть земной коры.

Именно благодаря своевременному изучению инженерно-геологических условий на территории Западной Сибири удалось выбрать оптимальные варианты при строительстве линейных сооружений (трубопроводов, ЛЭП, дорог), необходимых для добычи нефти и газа. На всей территории, примыкающей к трассе БАМа и подлежащей хозяйственному освоению, приводится изучение инженерно-геологических условий с тем, чтобы иметь возможность прогнозировать их изменение под влиянием деятельности человека.

Таким образом, в настоящее время инженерная геология не только обеспечивает необходимыми данными проектировщиков и строителей при возведении самых разнообразных сооружений (что само по себе имеет большое практическое значение), но и решает сложные научные проблемы, возникающие при изучении поверхностной части земной коры как объекта воздействия человека на литосферу. На наших глазах инженерная геология из науки, имеющей главным образом прикладное значение, все в большей и в большей степени становится наукой о ноосфере. Сейчас инженерную геологию можно определить как науку о геологической среде, ее рациональном использовании и охране в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека.

Под геологической средой следует понимать любу часть литосферы, слагающие верхнюю 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.

При таком определении геологической среды каждый из трех основных разделов инженерной геологии (грунтоведение, инженерная геодинамика, региональная инженерная геология) приобретает определенный аспект при решении стоящих перед ним задач.



рактирует генетический тип гранитов как породы, образовавшиеся при кристаллизации магматического расплава на глубине, в результате чего они имеют полнокристаллическую равномерно-зернистую структуру. Но по своей структуре граниты могут быть крупно-, средне- и мелкозернистыми, а по составу могут быть микроклиновыми, биотитовыми и т. д. В зависимости от этих петрографических особенностей прочность на одноосное сжатие гранитов (незатронутых выветриванием), например, в районе Красноярской ГЭС колебалась от 50 до 270 МПа. Как видно, величина прочности изменялась весьма существенно, но во всех случаях ее значение оставалось высоким. Высокое значение величины прочности гранитов определяется тем, что они относятся к интрузивным породам, т. е. определяется их генезисом, а разница в значении прочности — их петрографическими особенностями.

Можно сделать вывод, что выделение генетических и петрографических типов при их инженерно-геологическом изучении является обязательным, так как они дополняют друг друга, давая представление об общих закономерностях и частных особенностях изучаемых пород.

Горные породы, сформировавшиеся иногда в одних и тех же условиях и имеющие один и тот же геологический возраст и состав, могут существенно отличаться по своему современному состоянию и свойствам. Это объясняется тем, что такие породы претерпели различные постгенетические преобразования. Влияние постгенетических изменений на формирование свойств пород хорошо прослеживается на примере кембрийских гидрослюдистых глин, широко развитых на севере и северо-западе Русской платформы. В районе Ленинграда эти глины залегают вблизи поверхности. В течение геологической истории они дважды испытывали сравнительно небольшую и кратковременную нагрузку: первую в палеозое — меньшую по величине (6—7 МПа), но продолжительную во времени, а вторую в ледниковый период — большую по величине (8—9 МПа), но менее продолжительную. В течение этого кембрийского времени кембрийские глины были разгружены, происходили их разуплотнение и гидратация. В результате этого кембрийские глины в районе Ленинграда «отстали» в своем развитии от аналогичных отложений, например, в районе Вологды, где они залегают на значительной глубине и от палеозоя до настоящих дней непрерывно испытывали прогрессивно нарастающее гравитационное уплотнение. Поэтому если в районе Вологды глинистые отложения кембрия представлены аргиллитами со следами сланцеватости, с естественной влажностью 5% и пористостью 15%, то в районе Ленинграда это тугопластичные и полутвердые глины с влажностью 14% и пористостью 30% (Ломтадзе, 1973).

Приведенный пример хорошо показывает, что горные породы под влиянием постгенетических процессов могут сильно изменяться. Поэтому когда говорят о генетическом подходе в грунтоведении, то имеют в виду, что состав, строение и свойства грунтов зависят от их генезиса и постгенетических процессов. Эта зависимость не абстрактное понятие; она проявляется в изменении особенностей состава, структуры и текстуры пород, что в конечном итоге обуславливает различие свойств пород. Это три равноценных фактора с точки зрения влияния на свойства грунтов. Однако каждый из них может иметь доминирующее значение в зависимости от генетического и петрографического типа породы, а также от того, какое свойство является предметом

## § 2. ИЗУЧЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД КАК МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ

В понятии термина «грунт» подчеркивается, что это любые горные породы и почвы, которые изучаются как многокомпонентные динамичные системы. Составляющими компонентами горных пород являются: твердая компонента — минеральная и органическая часть горных пород, жидкая компонента — содержащиеся в пустотах пород природные воды, газообразная компонента — газы в пустотах пород и живая компонента — главным образом микроорганизмы, обитающие в горных породах. Соотношение компонент в горных породах определяет их состояние и свойства. Так, сухая глина обладает большой прочностью, а та же глина в водонасыщенном состоянии может течь под действием силы тяжести.

Представление о том, что горные породы изменяются во времени, является общеизвестным, но оно будет неполным, если не подчеркнуть, что быстрые изменения горных пород происходят лишь в том случае, когда соотношение между компонентами, составляющими горную породу, меняется достаточно быстро.

Это положение наиболее характерно для дисперсных грунтов, у которых особенно подвижны для компонента: вода и воздух, содержащиеся в их порах. В зависимости от того, полностью или частично будут заполнены поры водой (или газом) и содержатся в них живые организмы или нет, грунты могут являться двух-, трех- и четырехкомпонентными системами.

## § 3. ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА НА СВОЙСТВА ГРУНТОВ

При инженерно-геологическом изучении горных пород особенно важно знать содержание в них пороодообразующих минералов, которые находятся в преобладающих количествах и оказывают влияние на их свойства. Поэтому наибольшее значение имеют минералы класса первичных силикатов (полевые шпаты, оливин, пироксены и амфиболы и др., к ним же относится условно кварц), у которых преобладают внутрикристаллические связи ионно-ковалентного типа; простые соли (карбонаты, сульфаты, галоиды), имеющие ионный тип связей; глинистые минералы (гидрослюды, монтмориллонит, каолинит и др.), характеризующиеся большим разнообразием внутрикристаллических связей, включая ковалентную, ионную, водородную и молекулярную связи. Кроме того, в горных породах и почвах в значительном количестве может содержаться органическое вещество, в строении которого большую роль играют водородные и молекулярные связи.

Свойства минералов связаны с особенностями их химического состава, внутреннего строения и тех связей, которые существуют внутри самих минералов (атомов, ионов, радикалов). Свойства минералов, в свою очередь, обуславливают свойства грунтов, которые они слагают. Примеров такого влияния можно привести много.

От природы химической связи атомов и структурного типа кристаллической решетки зависит сжимаемость большинства силикатов. Установлено, что увеличение степени плотности упаковки атомов в структуре минералов ведет к уменьшению их сжимаемости. Вот поэтому минералы группы оливина, для которых характерна высокая плотность упаковки кремнекислородных тетраэдров, отличаются меньшей сжимаемостью по сравнению с кварцем и полевым шпатом, имею-



шими менее плотную упаковку атомов. В соответствии с этим, при пористости <math>< 1\%</math>, сжимаемость магматических пород основного состава оказывается меньшей по сравнению с породами кислого состава. Одним из важнейших инженерно-геологических свойств простых солей является их растворимость, обусловленная преобладанием ионного типа связи в решетке этих минералов. Исходя из теории ионных кристаллов, устойчивость простой соли определяется энергией ее кулоновского взаимодействия ионов в решетке и удаления их на расстоянии, при которых можно пренебречь электростатическим взаимодействием между ними. Ионный кристалл будет растворим в воде, если притяжение ионов молекулами воды будет больше энергии их электростатического притяжения, т. е. энергия гидратации ионов будет больше энергии решетки.

Величина кулоновского взаимодействия между ионами, а следовательно, и энергия кристаллической решетки ионных кристаллов зависят от радиуса и заряда ионов. Поэтому растворимость простых солей, как правило, снижается с уменьшением ионных радиусов и повышением валентности ионов (табл. 1). В соответствии с этим химические и биохимические (органогенные) породы карбонатного состава всегда имеют меньшую растворимость, чем сульфатные, а эти, в свою очередь, меньше, чем галлоидные.

Таблица 1

Растворимость галлоидов, сульфатов и карбонатов		
Минерал	Энергия кристаллической решетки, ккал/моль	Растворимость, моль/л
Галит	183	6,1
Ангидрит	642	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Гипс	650	$8 \cdot 10^{-3}$
Кальцит	700	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Доломит	745	$0,35 \cdot 10^{-4}$

Большое влияние на свойства дисперсных грунтов оказывают глинистые минералы. Глинистые минералы относятся к группе слоистых и слоисто-ленточных силикатов и отличаются от других минералов класса силикатов высокой дисперсностью и гидрофильностью, способностью к сорбции и ионному обмену. Высокая дисперсность глинистых минералов является их естественным физическим состоянием. В природных условиях глинистые минералы имеют размер частиц не более 1—10 мкм и поэтому преимущественно встречаются в наиболее дисперсной (глинистой) фракции осадочных пород, к которой обычно относят частицы размером <math>< 1</math> мкм или <math>< 2</math> мкм.

Глинистые минералы являются наиболее активной составной частью дисперсных горных пород, в значительной степени обуславливающей их инженерно-геологические свойства. Даже небольшое содержание глинистых минералов в горной породе существенно влияет на многие ее важнейшие свойства, такие, как гидрофильность, прочность, водопроницаемость, пластичность, набухание и т. д. Высокая активность глинистых минералов не может быть объяснена исключительно их большой удельной поверхностью. Многие физико-химические явления, происходящие на поверхности глинистых минералов, определяются особенностями их кристаллохимического строения. Основу слоистого мотива структуры глинистых минералов составляют тетраэдрические и октаэдрические сетки, неограниченно развитые в плоскости, перпендикулярной оси  $c$  (рис. 1, 2). Связь между слоями у глинистых минералов может быть различной в зависимости от осо-

бенностей строения слоя и величины его заряда. У ряда минералов она является достаточно прочной и обеспечивается взаимодействием кислородных и гидроксильных атомов смежных слоев (водородная связь) или катионами, располагающимися в межслоевом пространстве (одноименно заряженных слоев (ионно-электростатическая связь)). У других минералов связь между слоями менее прочная и обусловлена остаточными (молекулярными) силами.

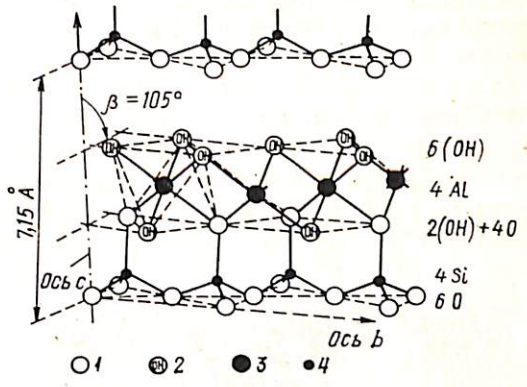
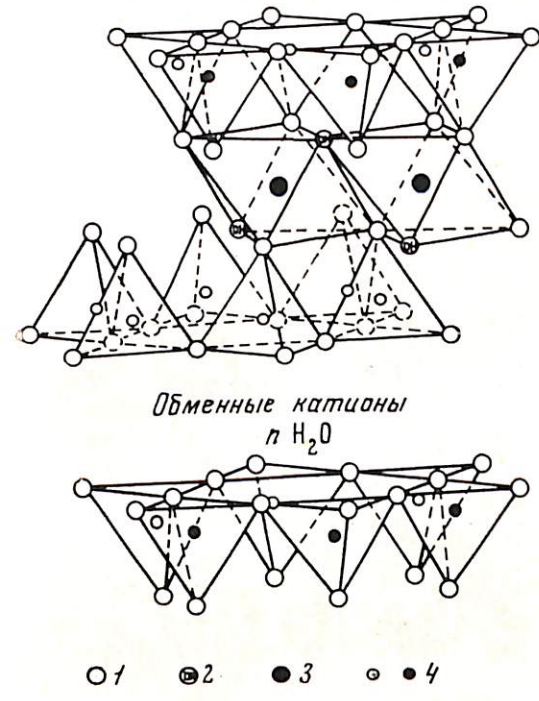


Рис. 1. Структура каолинита: 1 — кислород; 2 — гидроксил; 3 — алюминий; 4 — кремний

Рис. 2. Структура монтмориллонита: 1 — кислород; 2 — гидроксил; 3 — алюминий, железо, магнит; 4 — кремний, иногда алюминий

В первом случае глинистые минералы имеют жесткую кристаллическую решетку, т. е. такую, когда молекулы воды и обменные ионы не могут проникать в межслоевое пространство кристалла. У минералов (каолинит, гидрослюда, хлорит, палыгорскит и др.) с жесткой кристаллической решеткой внутреннее набухание отсутствует. Во втором случае глинистые минералы (монтмориллонит, нонтронит, вермикулит и др.) имеют раздвижную кристаллическую решетку; в межслоевое пространство такой кристаллической решетки проникают молекулы воды и обменные катионы. Минералы, имеющие раздвижную кристаллическую решетку, набухают с увеличением межслоевого пространства.

Третья группа глинистых минералов объединяет смешаннослойные минералы, микрокристаллы которых могут включать как ненабухающие, так и набухающие слои. Следовательно, по своим свойствам смешаннослойные минералы занимают промежуточное положение между минералами с жесткой (нераздвижной) и раздвижной кристаллическими решетками.

Среди глинистых пород более древнего возраста, начиная от девонского и кончая некоторыми породами кайнозоя, преобладающим глинистым минералом чаще всего является гидрослюда (58% всех исследованных образцов), затем монтмориллонит (30%) и каолинит (8%). Следовательно, при инженерно-геологическом изучении глинистых грунтов наибольшее внимание необходимо уделять этим трем глинистым минералам. Интересно, что три наиболее распространенных гли-



нистых минерала (гидрослюда, монтмориллонит, каолинит) в то же время являются типичными представителями трех разных групп глинистых минералов, существенно различающихся по особенностям их кристаллохимического строения.

Органическое вещество накапливается в земной коре в результате жизнедеятельности и отмирания растительных и животных организмов. Наибольшее распространение имеют растительные остатки; которые могут встречаться как в виде неразложившихся отмерших растений и микроорганизмов, так и в виде разложившихся — гумуса. В почвах содержание гумуса доходит до 80—90% от общего количества органического вещества, которое, в свою очередь, достигает в некоторых почвах 10—20%. В состав гумуса входят гуминовые кислоты, имеющие «губчатое» строение с множеством микропор. Этим в значительной степени определяются их водоудерживающая способность и сорбционные свойства. Под электронным микроскопом видны микроагрегаты гуминовых кислот, имеющих вид мельчайших сферических частиц диаметром в десятки доли мкм (рис. 3).

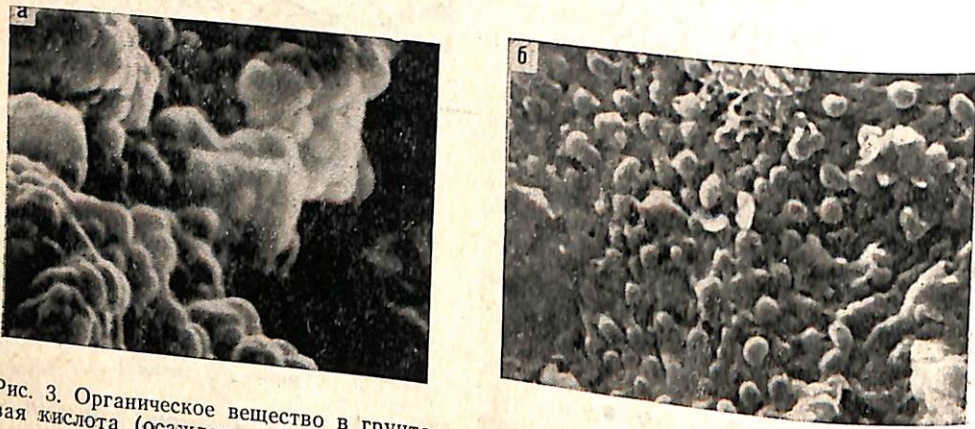


Рис. 3. Органическое вещество в грунтах под электронным микроскопом: а — гуминовая кислота (осажденная HCl), ув. 30 000х; б — гуминовая кислота на поверхности глинистых частиц, ув. 10 000х

Присутствие органического вещества в горных породах и почвах в виде гумуса всегда повышает их дисперсность и значительно влияет на свойства грунтов. Одно из свойств грунтов — их плотность — целиком определяется минеральным и органическим составом грунтов.

**Плотность минералов и грунтов.** Плотность минералов зависит от состава атомов, слагающих минерал, и плотности их упаковки в кристаллической решетке. Плотность не зависит от степени дробления материала; большей кристалл кварца и кварцевый песок имеют одинаковую плотность. Наибольшей плотностью обладают минералы, содержащие тяжелые элементы и имеющие плотнейшую упаковку атомов. Примером таких минералов, в составе которых содержатся ионы железа, пироксены и амфиболы, в составе которых содержатся ионы железа. К тому же кристаллическая решетка этих минералов построена по принципу плотнейшей кислородной решетки в заполнением катионами промежуточных пустот. Поэтому плотность оливина, пироксенов и амфиболов составляет 2,8—3,7 г/см<sup>3</sup>. В противоположность им кварц и полевые шпаты, состоящие в основном из кремния и кислорода и имеющие «ажурную» структуру решетки, обладают меньшей плотностью (2,50—2,69 г/см<sup>3</sup>).

Плотность глинистых минералов (особенно таких, как монтмориллонит, гидрослюда, вермикулит) варьирует в значительных пределах вследствие изоморфных замещений, а также вследствие того, что параметры кристаллической решетки ряда минералов (а следовательно, и плотность) существенно изменяются в зависимости от степени гидратации их. Так, плотность монтмориллонита может изменяться в зависимости от степени его гидратации 2,35—2,70 г/см<sup>3</sup>, гидрослюды — от 2,60 до 3,00 г/см<sup>3</sup> и т. д. Плотность органического вещества не превышает 1,25—1,80 г/см<sup>3</sup>.

В соответствии с плотностью наиболее распространенных породообразующих минералов средняя плотность минерального компонента большинства пород колеблется от 2,5 до 2,8 г/см<sup>3</sup>. Она увеличивается с увеличением содержания в грунте тяжелых минералов. Поэтому у основных пород плотность минеральной части составляет 3,0—3,4 г/см<sup>3</sup>, что намного выше, чем у кислых пород, плотность минеральной части которых приближается к плотности кварца (плотность минеральной части гранитов, например, равна 2,6—2,7 г/см<sup>3</sup>). Почвы, содержащие гумус, характеризуются меньшей плотностью по сравнению с материнскими породами. Данные по плотности минеральной части грунтов необходимы для расчета их пористости, значение которой используется для получения ряда других расчетных характеристик.

#### § 4. ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ ГРУНТОВ НА ИХ СВОЙСТВА

Под строением грунтов понимаются их структура и текстура, которые подразделяются: на макро-, мезо- и микроструктуру и соответственно на макро-, мезо- и микротекстуру.

Макростроение горных пород и почв легко наблюдается визуально. К нему относятся видимые глазом элементы почв и горных пород, трещиноватость и пористость, отсутствие или наличие видимой слоистости и т. п.

Мезостроение горных пород и почв изучается под микроскопом при сравнительно небольших увеличениях, например под поляризационным микроскопом. К мезоструктуре и мезотекстуре относятся: 1) все минеральные зерна, микроагрегаты и микроблоки размером больше 1 мк (см. ниже), 2) ориентировка их в пространстве, 3) мезо- и микропористость пород и трещины, видимые в поляризационном микроскопе.

Понятие микростроение (микроструктура и микротекстура) относится к глинистым и лёссовым породам и почвам, содержащим глинистые минералы и органическое вещество в виде гумуса, т. е. частицы размером <1—5 мкм. Частицы такого размера редко существуют изолированно, обычно они образуют ультрамикроагрегаты и ультрамикроблоки (см. ниже). Их форму, размер и особенно пространственное расположение невозможно изучить без электронного микроскопа и специальной рентгеновской съемки. Между тем знать это при изучении указанных грунтов очень важно, так как их микростроение во многом определяет особенности мезо- и макростроения грунтов.

Важнейшими показателями строения грунтов на любом уровне его изучения являются: размер элементов, слагающих горные породы и почвы, пористость и трещиноватость.

Размер элементов, слагающих грунты, может изменяться от долей микрона до десятков сантиметров. Изменение размеров слагающих грунты элементов в столь широких пределах будет особенно сильно

453409



сказываться на свойствах дисперсных грунтов. Это хорошо видно даже при сравнении общеизвестных свойств песка и глины.

Песок непластичен, не набухает, легко водопроницаем, обладает незначительным капиллярным поднятием, при высыхании не дает усадки. Глина обладает значительной пластичностью, в воде сильно набухает, трудно водопроницаема, имеет большое капиллярное поднятие, при высыхании дает сильную усадку.

Из вышесказанного следует, что структурные элементы состоят из первичных частиц и агрегатов. Первичные частицы принято называть гранулометрическими элементами. Классификация их, широко используемая в грунтоведении, представлена в табл. 2. Из табл. 2 следу-

Классификация гранулометрических элементов (по В. В. Охотину, с добавлениями)

Таблица 2

Структурные элементы	Группы фракций		Отдельные фракции	
	название	размеры частиц	название	размеры частиц
Макроструктурные	Валунные (окатанные) и каменные (угловатые)	>20 см	крупные средние мелкие	>80 см 80—40 см 40—20 см
	Гальковые (окатанные) и щебнистые (угловатые)	20—4 см	булыжник и крупный щебень щебень и крупная галька мелкая галька и мелкий щебень	20—10 см 10—6 см 6—4 см
	гравийные (окатанные) и хрящеватые (угловатые)	40—2 мм	крупные средние мелкие очень мелкие	40—20 мм 20—10 мм 10—4 мм 4—2 мм
Мезоструктурные	песчаные	2—0,05 мм	грубые крупные средние мелкие тонкие	2—1 мм 1—0,5 мм 0,5—0,25 мм 0,25—0,1 мм 0,1—0,05 мм
	пылеватые	0,05—0,001 мм	крупные мелкие иловатые	0,05—0,01 мм 0,01—0,005 мм 0,005—0,001 мм
Микроструктурные	глинистые	<1 мкм	собственно глина	1—0,25 мм
			коллоидная глина	<0,25 мкм

ет, что граница между макро- и мезоструктурными элементами совпадает с границей между гравийной и песчаной фракциями. К гравийной фракции относятся частицы крупнее 2 мм. Они практически не обладают молекулярной влагеомкостью и капиллярным поднятием воды; водопроницаемость их очень велика. Частицы песчаной фракции обладают молекулярной влагеомкостью и капиллярным поднятием воды.

Граница между мезо- и микроструктурными элементами совпадает с границей между пылеватой и глинистой фракциями.

В. Р. Вильямс (1893) к глинистой фракции отнес частицы <1 мкм на основании того, что начиная с этого размера частицы по своим свойствам близки к коллоидам, и в частности в суспензии обладают броуновским движением. Позднее многие исследователи отмечали, что именно частицы <1 мкм резко отличаются по своим свойствам от более крупных. Таким образом, микроструктуру обуславливают частицы породы, обладающие свойствами, которые присущи коллоидным системам. Частицы пылеватой фракции такими свойствами не обладают. По размеру они занимают промежуточное положение между глинистой и песчаной фракциями и по своим свойствам более близки к песчаной фракции, чем к глинистой. Поэтому пылеватая и песчаная фракции объединяются одним общим понятием «мезоструктура». Границей между этими фракциями следует считать частицы, имеющие размер 0,05 мм; частицы <0,05 мм обладают слабой водопроницаемостью и с трудом отдают воду.

Среди структурных элементов выделяются агрегаты и блоки в зависимости от ориентированности слагающих их частиц. В агрегатах текстура беспорядочная; в них обычно присутствуют пылеватые или песчаные частицы, вокруг которых группируются глинистые частицы и состоящие из них ультрамикрoагрегаты и ультрамикроблоки (рис. 4).



Рис. 4. Микроагрегаты глинисто-пылеватых частиц в лёссе, ув. 1000<sup>x</sup>

Блоки состоят из аксиальноориентированных, как правило, глинистых частиц (рис. 5).

Вследствие присутствия в дисперсных грунтах гранулометрических (первичных) и агрегированных (вторичных) элементов их дисперсность характеризуется гранулометрическим и микроагрегатным составом.

При характеристике гранулометрического состава породы должны учитываться только первичные частицы. Одной из важнейших задач



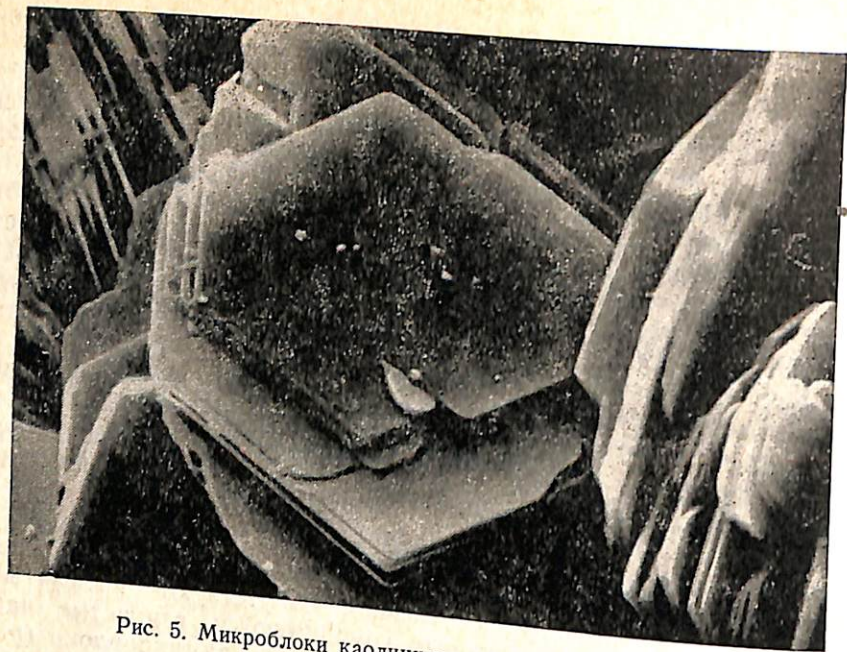


Рис. 5. Микроблоки каолиновых частиц, ув. 7500\*

при определении гранулометрического состава является правильное проведение специальной обработки образца породы, позволяющей разрушать агрегаты и тем самым учитывать при анализе все первичные частицы, находившиеся как в свободном, так и в агрегированном состоянии. Число и размер первичных частиц в породе определяют ее возможную максимальную (предельную) дисперсность. Когда наряду с первичными частицами в породе учитываются также агрегированные элементы, относящиеся преимущественно к микро- и мезоструктуре, то определяется ее микроагрегатный состав, т. е. дисперсность породы, присущая ей в данное время.

При инженерно-геологической характеристике горных пород необходимо знать как гранулометрический, так и микроагрегатный состав. То обстоятельство, что гранулометрический состав показывает предельную дисперсность пород, делает его удобным классификационным показателем. Микроагрегатный состав отражает степень агрегированности породы при данных условиях.

Таблица 3

Сравнительные данные микроагрегатного и гранулометрического состава грунтов

Название породы	Определяемый состав	Содержание частиц (%) диаметром (мм)					
		1—0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,001
Каолиновая глина	микроагрегатный гранулометрический	0,5	8,0	20,0	20,0	36,5	15,0
		0,5	8,0	18,5	12,0	26,0	35,0
Лёссовидный суглинок	микроагрегатный гранулометрический	17,0	41,0	21,0	7,5	12,5	1,0
		14,0	26,0	20,0	8,0	13,0	19,0

Для высокодисперсных пород: супесей, суглинков, лёссов, глин — содержание частиц в различных фракциях по данным гранулометрического и данным микроагрегатного анализов может существенно отличаться (табл. 3). Это связано с тем, что при разрушении агрегатов увеличивается содержание частиц в глинистой фракции и соответственно уменьшается количество частиц в пылевой и песчаной фракциях.

Важным показателем строения всех грунтов является наличие пустот, которые по своему характеру могут быть поровыми или трещинными.

**Пористость и трещиноватость грунтов.** Структурные элементы, слагающие грунты, при неплотном прилегании друг к другу образуют промежутки различной величины, которые называются порами. Суммарный объем всех пор в единице объема, независимо от их величины и степени заполнения, называется общей пористостью пород.

Величина пористости ( $n$ ) определяется следующим образом:

$$n = \frac{\text{объем пор в грунте}}{\text{общий объем грунта}} 100\%$$

Часто пористость характеризуется коэффициентом пористости, или приведенной пористостью ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = \frac{\text{объем пор в грунте}}{\text{объем минеральной части грунта}}$$

Плотность грунта ( $\Delta$ ) — это масса единицы объема грунта с естественной влажностью и ненарушенным сложением, т. е.

$$\Delta = \frac{g}{V} \text{ г/см}^3,$$

где  $g$  — масса грунта,  $V$  — его объем. Ее величина зависит от минерального состава, влажности и характера сложения (пористости) грунтов; с увеличением содержания тяжелых минералов, степени заполнения пор водой и уменьшением пористости плотность грунта увеличивается.

Плотность скелета грунта  $\delta$  называется масса минеральной части в единице объема грунта при естественной структуре:

$$\delta = \frac{g}{V} \text{ г/см}^3.$$

Плотность скелета грунта — величина более постоянная по сравнению с плотностью грунта и обычно вычисляется по данным плотности и влажности грунта по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{1 + 0,01 W} \text{ г/см}^3,$$

где  $W$  — влажность в процентах.

Пористость ( $n$ ) рассчитывается по формуле  $n = \frac{\gamma - \delta}{\gamma} 100\%$ , а коэффициент пористости ( $\epsilon$ ) — по формуле  $\epsilon = \frac{\gamma - \delta}{\delta}$ . В обоих случаях  $\gamma$  — плотность минеральной части грунта.

Размеры пор, связь их со структурными элементами и зависимость от дисперсности и генезиса пород показаны в табл. 4.



Типы пор дисперсных грунтов

Таблица 4

Название пор	Размер пор	Связь пор со структурой породы	Движение воды в порах	В каких породах преобладают
Макропоры	>1 мм	поры, между обломками горных пород, макро- и мезоструктурными элементами и остатками растительных организмов	свободное движение гравитационной воды; капиллярное поднятие воды практически отсутствует	крупнообломочные; биогенные; лёссовые
Мезопоры	1—0,01 мм	поры, образуемые мезоструктурными элементами, песчаными и пылеватыми зёрнами, остатками растительных организмов	движение гравитационной воды происходит при определенном напоре. Капиллярное поднятие происходит быстро на небольшую высоту	песчаные; лёссовые; биогенные
Микропоры	10—0,1 мкм	поры, образуемые микроагрегатами и микроблоками, отдельными минеральными частицами, остатками растительных и животных организмов	капиллярное поднятие воды происходит медленно на большую высоту. Движение гравитационной воды отсутствует	органо-химические и слабоцементированные; глинистые; биогенные
Ультракапиллярные поры	<0,1 мкм	поры микроагрегатов и микроблоков	поры заполнены связанной водой	глинистые

От общей пористости и размера пор зависят свойства грунтов. По величине пористости судят о степени уплотнения пород и их сжимаемости в различных условиях. С величиной пористости тесно связаны водо- и газопроницаемость пород, их термические и электрические свойства и др. Значения общей пористости горных пород изменяются в очень широких пределах — от долей процента до 90%. Наиболее низкую пористость (1—3%) имеют большинство нетрещиноватых интрузивных и метаморфических пород. Как видно, пористость имеют все грунты, но наибольшая она у дисперсных грунтов; для них ее значение колеблется от 20 до 90%.

Трещиноватость тоже свойственна почти всем грунтам, но, в отличие от пористости, она имеет наибольшее значение, для скальных грунтов. Многие породы с кристаллизационными структурными связями (особенно магматические и метаморфические) при пористости 1—5% могут иметь трещинную пустотность, достигающую 10—20%. Разумеется, что проницаемость, термические и механические свойства таких пород будут определяться не столько их пористостью, сколько трещиноватостью.

При изучении горных пород бывает трудно разделить трещинную и поровую пустотность, поскольку трещиноватость может рассматриваться как линейная пористость. В этом случае приходится указывать общую пористость породы.

По ширине трещины подразделяются на тонкие (<1 мм), мелкие (1—5 мм), средние (5—20 мм), крупные (20—100 м) и очень крупные (>100 мм).

При изучении трещинной пустотности пород следует определять генетический тип трещин, так как с этим связаны их глубина, протяженность, ширина и т. д.

## § 5. ВОДА В ГРУНТАХ

**Классификация воды в грунтах.** В грунтах содержатся различные виды воды. В современной литературе существует несколько классификаций воды в грунтах. Ниже предлагается следующая:

I. Вода в форме пара.

II. Связанная вода:

- 1) прочносвязанная (гигроскопическая) вода,
- 2) слабосвязанная вода,
- 3) капиллярная вода.

III. Свободная (гравитационная) вода.

IV. Вода в твердом состоянии.

V. Кристаллизационная вода и химически связанная вода.

**Вода в форме пара.** Содержание водяного пара в грунте не превышает 0,001% от всей массы грунта. Несмотря на это, вода в форме пара играет большую роль в процессах, протекающих в грунтах, так как она, во-первых, является единственной формой воды, которая способна передвигаться в грунте при незначительной его влажности, и, во-вторых, потому, что путем конденсации пара на поверхности грунтовых частиц образуются другие виды воды, в частности связанная вода.

**Связанная вода.** Особенно много ее содержится в глинистых породах. Присутствие различных категорий связанной воды в глинистых и других породах резко изменяет их состояние и свойства. Поэтому изучение связанной воды имеет большое практическое значение.

Подвижность молекул связанной воды всегда значительно меньше, чем подвижность молекул свободной воды, но больше, чем молекул льда или воды кристаллогидратов. С уменьшением влажности подвижность молекул связанной воды уменьшается и только при влажности, соответствующей «островному» характеру расположения прочносвязанной воды, подвижность молекул возрастает вдоль поверхности частицы.

Связанную воду следует подразделять на прочносвязанную, слабосвязанную и капиллярную в зависимости от энергии связи молекул воды с твердыми частицами.

**Прочносвязанная вода.** Максимальное количество прочносвязанной воды в грунтах примерно соответствует величине максимальной гигроскопичности ( $W_{\text{мг}}$ ), т. е. той влажности грунта, которая образуется при адсорбции частицами парообразной воды, при относительной ее упругости, близкой 100%. Гигроскопическая влажность грунта характеризует то количество прочносвязанной воды, которое содержится в нем в обычных лабораторных условиях; чаще всего это количество составляет примерно половину всей прочносвязанной воды.

Прочносвязанная вода, удерживаемая под большим давлением, качественно отличается от обычной свободной воды. По своим свойствам она ведет себя как твердоподобное тело, но ее строение отличается от строения льда. Прочносвязанная вода обладает значительной вязкостью, упругостью и прочностью на сдвиг. На расстоянии 40—60 Å от поверхности частицы вязкость воды примерно в три раза больше вязкости свободной воды.



Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) прочносвязанной воды намного меньше  $\epsilon$  свободной воды, которая в среднем принимается за 81. Замерзание связанной воды зависит от минерального состава грунта. Замерзание практически всей жидкой воды происходит у каолинита в интервале от  $-10$  до  $-20^\circ$ ; в монтмориллоните при  $-70^\circ$  еще содержится около 7% незамерзшей воды.

Прочносвязанная вода неоднородна. Прочносвязанная вода на- и большего уровня энергии связи образуется, когда молекулы воды вступают в координационные связи с поверхностными атомами кристаллической решетки. Ее можно назвать «водой боковых сколов глинистых минералов». Эта категория прочносвязанной воды характеризуется наименьшей подвижностью и свойствами, резко отличными от свойств свободной воды.

Второй вид прочносвязанной воды — это вода «ближней» гидратации ионов (преимущественно катионов), образующаяся при гидратации обменных катионов. По своей подвижности и свойствам она близка к воде первой категории. Вода боковых сколов глинистых минералов и вода «ближней» гидратации ионов суммарно составляют 1/10 часть от максимальной гигроскопической влажности грунтов. Установлено, что присутствие этих категорий прочносвязанной воды в глинистых, лёссовых и других высокодисперсных грунтах существенно не снижает прочность; величина прочности остается близкой к максимальной. Это связано с тем, что обе описанные категории прочносвязанной воды не образуют вокруг частиц сплошную пленку воды, а располагаются «островами», приуроченными к наиболее энергетически активным местам частицы — к боковым сколам кристаллической решетки и обменным катионам.

Прочносвязанная вода, располагающаяся по базальным поверхностям глинистых минералов и взаимодействующая преимущественно через водородные связи со структурными группами OH и O их поверхностей, называется водой базальных поверхностей глинистых минералов. Уровень энергии связи воды базальных поверхностей глинистых минералов с частицами меньше, чем у первых двух видов прочносвязанной воды, но значительно больше, чем у рыхлосвязанной воды. С образованием воды базальных поверхностей глинистых минералов вокруг их частиц возникают сплошные пленки прочносвязанной воды. Величина ионно-электростатических связей между частицами уменьшается, и вследствие этого снижается прочность грунтов.

Содержание прочносвязанной воды увеличивается с увеличением содержания глинистых минералов с раздвижными кристаллическими решетками, с ростом дисперсности породы и с увеличением среди обменных ионов трех- и двухвалентных катионов и  $H^+$  (см. § 7). На- и большую величину  $W_{мг}$  будут иметь Са-монтмориллонитовые глины. Слабосвязанная вода имеет меньший уровень энергии связи, чем прочносвязанная вода. Слабосвязанная вода отличается от последней. Слабосвязанная вода имеет плотность, близкую к плотности свободной воды; по своим свойствам она мало отличается от последней. Слабосвязанная вода подразделяется на вторично ориентированную воду полислоев и воду, удерживаемую осмотическими силами.

Вторично ориентированная вода полислоев образуется вокруг частиц благодаря дальнедействующим поверхностным силам минералов, обуславливающим упорядоченность молекул воды даже на значительном расстоянии от поверхности. Она образует вокруг частиц как бы пленку, и поэтому А. Ф. Лебедев назвал ее «плочной»

водой. Этот вид связанной воды характеризуется малой связью с поверхностью, значительной подвижностью, но по структуре и свойствам отличается от свободной воды. Температура замерзания вторично ориентированной воды полислоев  $-1,5^\circ$ .

Присутствие вторично ориентированной воды полислоев обуславливает дальнейшее снижение прочности грунтов. У грунтов появляется липкость, если тело прижимается к ним под достаточно высоким давлением (более 5 МПа). При этом максимальное значение липкости будет при влажности максимальной молекулярной влагоемкости ( $W_{ммв}$ ).

Максимальная молекулярная влагоемкость грунтов ( $W_{ммв}$ ) — это суммарное содержание всех видов прочносвязанной воды и ориентированной воды полислоев. Величина максимальной молекулярной влагоемкости зависит от дисперсности породы и состава обменных катионов: с увеличением дисперсности и количества одновалентных ионов среди обменных катионов содержание слабосвязанной воды в глинистых породах, лёссах и почвах увеличивается (см. § 3). Величина  $W_{ммв}$  будет наибольшей у Na-монтмориллонитовых глин.

Второй вид слабосвязанной воды — осмотическая вода, образуется в результате проникновения молекул воды из раствора в диффузный слой мицеллы (минеральная частица, окруженная адсорбционным и диффузным слоями ионов), где концентрация ионов оказывается большей, чем в растворе. Она очень слабо связана с поверхностью частиц, поскольку с ней связаны окружающие частицы — ионы. Подвижность осмотической воды близка к подвижности свободной воды, по структуре и свойствам она не отличается от последней.

Присутствие в грунтах осмотической воды обуславливает у них небольшую прочность, липкость и пластичность в определенном диапазоне влажности. Пластичность глинистых и лёссовых грунтов, а также почв начинается при влажности выше величины максимальной молекулярной влагоемкости.

Капиллярная вода подразделяется на три разновидности: вода углов пор, подвешенная вода, собственно капиллярная вода.

Вода углов пор обычно образуется в местах соприкосновения частиц в виде отдельных капель, занимающих суженные части пор и ограниченных менисками. Движение газов в порах свободное, вода находится в защемленном состоянии.

Подвешенная вода отличается от собственно капиллярной тем, что не имеет непосредственной связи с уровнем грунтовых вод, вследствие чего не может питаться ими.

Собственно капиллярная вода поднимается кверху от уровня грунтовых вод. В практике инженерно-геологических исследований капиллярное поднятие воды характеризуется максимальной величиной и скоростью капиллярного поднятия.

Высота капиллярного поднятия в среднезернистых песках равна 0,15—0,35 м, в мелкозернистых — 0,35—1,0 м, в супесях она возрастает до 1—1,5 м, в суглинках — до 3—4 м. В глинах вода может подниматься на высоту до 8 м, а в лёссах — до 4 м (за два года).

Все три категории капиллярной воды обуславливают капиллярные структурные связи, которые рассматриваются ниже.

Влажность грунта, у которого все капиллярные поры заполнены водой, называют капиллярной влагоемкостью. Капиллярная влагоемкость различных грунтов определяется величиной их капиллярной пористости и в конечном итоге их составом и структурой, а величи-



Коэффициент фильтрации различных грунтов и характеристика их водопроницаемости (по Н. Н. Маслову)

Грунты	$K_f$ , м/сут	Характеристика грунтов по водопроницаемости
Глины, монолитные скальные грунты	$< 5 \cdot 10^{-5}$	практически водонепроницаемые
Суглинки, тяжелые супеси, нетрещиноватые песчаники	до $5 \cdot 10^{-3}$	весьма слабопроницаемые
Супеси, слаботрещиноватые глинистые сланцы, песчаники, известняки и т. д.	до 0,5	слабопроницаемые
Пески тонко- и мелкозернистые, трещиноватые скальные грунты	до 5	водопроницаемые
Пески среднезернистые, скальные грунты повышенной трещиноватости	до 50	хорошо водопроницаемые
Галечники, гравелистые пески, сильнотрещиноватые скальные грунты	$> 50$	сильнопроницаемые

Среднее значение рН для грунтовых вод колеблется около 7. С повышением общей минерализации значение рН увеличивается. В районах развития известняков, солонцеватых глин и солонцевых почв величина рН природной воды может достигать 9—10.

Максимально возможное содержание в грунте связанной, капиллярной и гравитационной воды при полном заполнении пор называют полной влагоемкостью грунта. При полной влагоемкости глинистых грунтов прочность может практически отсутствовать и они будут вести себя как текучие тела.

При температуре грунта ниже  $0^\circ$  гравитационная вода замерзает и содержится в нем в виде льда. Лед может содержаться в грунте в виде отдельных кристаллов или в виде прослоев чистого льда, достигающих местами значительной мощности. Кристаллы льда в большинстве случаев играют роль цемента, скрепляющего минеральные частицы друг с другом. Поэтому свойства грунтов резко изменяются при изменении фазового состояния воды. Эта проблема настолько большая, сложная и практически важная, что является предметом изучения другой науки — мерзлотоведения.

Кристаллизационная вода и химически связанная (конституционная) вода принимают участие в строении кристаллических решеток различных минералов. Кристаллизационная вода входит в состав минералов типа  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (гипс). Кристаллизационная вода, участвуя в построении кристаллической решетки минералов, сохраняет свою молекулярную форму. Химически связанная вода входит в гидраты типа гидроокисей  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Молекулы ее в результате химической реакции распадаются на ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ . Химически связанная вода не сохраняет своего молекулярного единства. Эти категории воды имеют некоторое инженерно-геологическое значение, но главным образом изучаются в минералогии в связи с исследованиями содержащих их минералов.

## § 6. ОБМЕННЫЕ ИОНЫ В ГРУНТАХ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА МИКРОСТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ГРУНТОВ

Высокодисперсные минеральные частицы грунтов при взаимодействии с водой приобретают строение, характерное для коллоидных

на капиллярного поднятия зависит от гранулометрического состава, минерального состава и состава обменных катионов.

Влияние минерального состава на величину капиллярного поднятия двойное: за счет формы частиц, присущей различным минералам, и их неодинаковой смачиваемости. У песчаных частиц крупнее  $0,25 \text{ мм}$  высота капиллярного поднятия изменяется по следующей закономерности: слюда  $>$  окатанный кварц  $>$  полевой шпат  $>$  остроугольный кварц. Величина краевого угла смачивания изменяется от  $13$  до  $58^\circ$  в зависимости от минерального состава и различного состояния поверхности частиц. Состав обменных катионов влияет на высоту капиллярного поднятия в глинистых и лёссовых породах неодинаково, в зависимости от их гранулометрического состава. Капиллярное поднятие пылеватых песков, супесей, суглинков при замене агрегирующих катионов ( $\text{Ca}^{++}$ ) на диспергирующие ( $\text{Na}^+$ ) возрастает. У глин, наоборот, капиллярные поры, поднятие капиллярной воды снижается или прекращается вовсе.

**Свободная (гравитационная) вода** подразделяется на просачивающуюся воду и воду грунтового потока. Просачивающаяся вода находится преимущественно в зоне аэрации и передвигается под влиянием силы тяжести сверху вниз. Это движение продолжается до тех пор, пока она не встретит на своем пути слой грунта, обладающий малой водопроницаемостью, — фактически водонепроницаемый, водонепроницаемый горизонт. После этого дальнейшее движение воды происходит под влиянием напора в виде грунтового потока. Слой грунта, в котором движется вода грунтового потока, называется водоносным горизонтом.

Просачивающаяся вода оказывает локальное воздействие на толщу пород. В частности, глинистые, лёссовые и другие связные грунты теряют прочность лишь на пути ее движения. Вода грунтового потока оказывает воздействие на весь пласт в целом, по которому она движется. Способность грунтов пропускать через себя воду называется водопроницаемостью, а движение воды в грунтах под действием напора — фильтрацией. Фильтрация в полностью водонасыщенных грунтах при ламинарном режиме движения подчиняется закону Дарси:

$$V_f = K_f \frac{\Delta H}{l} = K_f J,$$

где  $V_f$  — скорость фильтрации, см/с;  $K_f$  — коэффициент фильтрации, см/с;  $J = \frac{\Delta H}{l}$  — градиент напора при разности напоров  $\Delta H$  и длине пути фильтрации  $l$ .

Коэффициент фильтрации  $K_f$  является мерой водопроницаемости грунта и равен скорости движения воды при градиенте напора, равном единице.  $K_f$  измеряется в сантиметрах на секунды или метрах на сутки. Величина коэффициента фильтрации для различных грунтов изменяется в широких пределах (табл. 5).

По химическому составу гравитационная вода может быть различной. В ней среди катионов чаще всего встречаются  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , затем  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ , а среди анионов —  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$ . Растворенные в воде соли находятся в подвижном равновесии с твердой составляющей грунтов и взаимодействуют с ней. В гравитационной воде в коллоидном состоянии находятся кремнекислота и полуторные окислы.



мицелл. Ионы, входящие в состав мицеллы, участвуют в обменных реакциях с ионами водных растворов.

Общее количество ионов в грунте, способных к обмену в данных условиях, называют емкостью поглощения, или емкостью обмена грунта. Емкость поглощения выражается в миллиграмм-эквивалентах на 100 г абсолютно сухого грунта и определяется в нейтральной среде, т. е. при  $pH=7$ . Величина емкости поглощения грунтов обычно не превышает 100 мг·экв на 100 г навески. И лишь у минералов группы монтмориллонита достигает 150 мг·экв на 100 г.

Среди обменных ионов резко преобладают катионы. Поэтому обычно рассматривается механизм катионного обмена.

Исследования природы обменных реакций показывают, что обмен ионов может происходить как на внешних поверхностях кристаллов слоистых силикатов, так и в межслоевом пространстве этих минералов (рис. 6). Механизм катионного обмена во многом зависит от характера

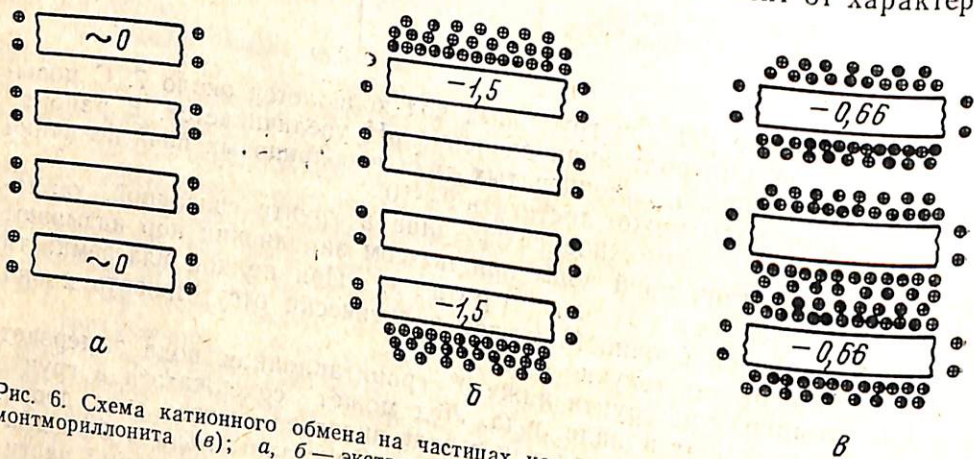


Рис. 6. Схема катионного обмена на частицах каолинита (а), гидрослюды (б) и монтмориллонита (в); а, б — экстрамицеллярный обмен; в — интрамицеллярный обмен

кристаллических решеток минералов. Выше указывалось, что частицы каолинита имеют жесткую кристаллическую решетку; доступ находящихся в растворе ионов в межслоевое пространство исключен. Поэтому обменные реакции у частиц каолинита протекают только на внешних поверхностях кристаллов (по их боковым сколам). Отсюда емкость поглощения каолинита небольшая — 3—15 мг·экв на 100 г.

Гидрослюды имеют также жесткую кристаллическую решетку, но их базальные поверхности несут значительный отрицательный заряд, который возникает благодаря несокомпенсированности зарядов внутри кристаллической решетки при замещении  $Si^{4+}$  на  $Al^{3+}$ , а  $Al^{3+}$  ионами более низкой валентности. Вследствие этого ионный обмен у гидрослюд происходит не только по сколам, но и по всей площади базальных плоскостей. Емкость поглощения гидрослюд значительно превышает емкость поглощения каолинита; величина ее составляет 10—40 мг·экв на 100 г. В обоих рассмотренных случаях обмен происходит на внешней поверхности частиц.

У монтмориллонита изоморфные замещения происходят в меньшей степени, чем у гидрослюд, поэтому его базальные поверхности имеют несколько меньший отрицательный заряд, чем базальная поверхность гидрослюд, но вследствие подвижного характера кристаллической решетки для обменных реакций оказываются доступными

внешняя, но и все внутренние поверхности структурных слоев. Величина емкости обмена в этом случае наибольшая, для монтмориллонита она составляет 80—150 мг·экв на 100 г.

Состав обменных катионов определяется минеральным составом грунтов и составом поровой воды. Чаще всего среди обменных катионов находятся  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $H^+$ .

Образование рыхлосвязанной воды происходит в диффузном слое ионов, с мощностью которого непосредственно связано ее количество. Чем больше мощность диффузного слоя ионов, тем больше образуется вокруг грунтовой частицы рыхлосвязанной воды. Мощность диффузного слоя ионов при прочих равных условиях возрастает с уменьшением валентности ионов, и, следовательно, количество рыхлосвязанной воды, образующейся при гидратации грунтовых частиц, будет изменяться в зависимости от состава обменных катионов по следующему ряду: катион<sup>+</sup> > катион<sup>2+</sup> > катион<sup>3+</sup>. Эта же зависимость справедлива и для общего количества связанной воды, так как рыхлосвязанной воды всегда содержится значительно больше, чем прочносвязанной.

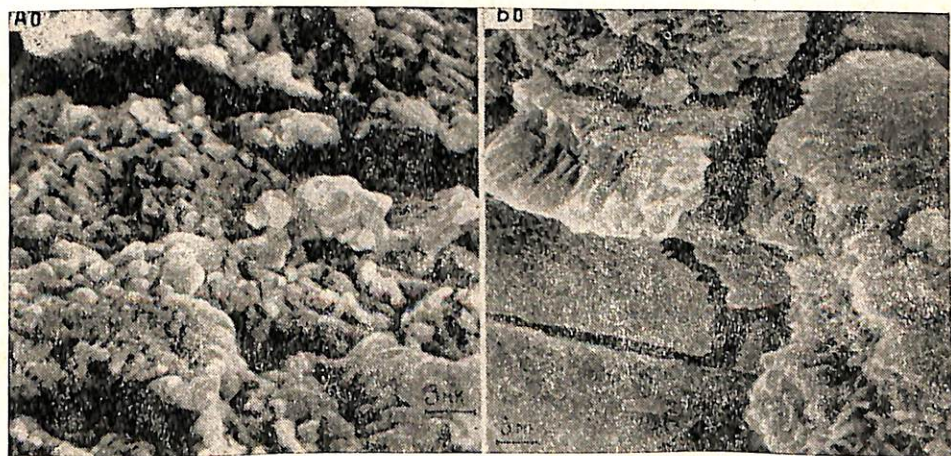
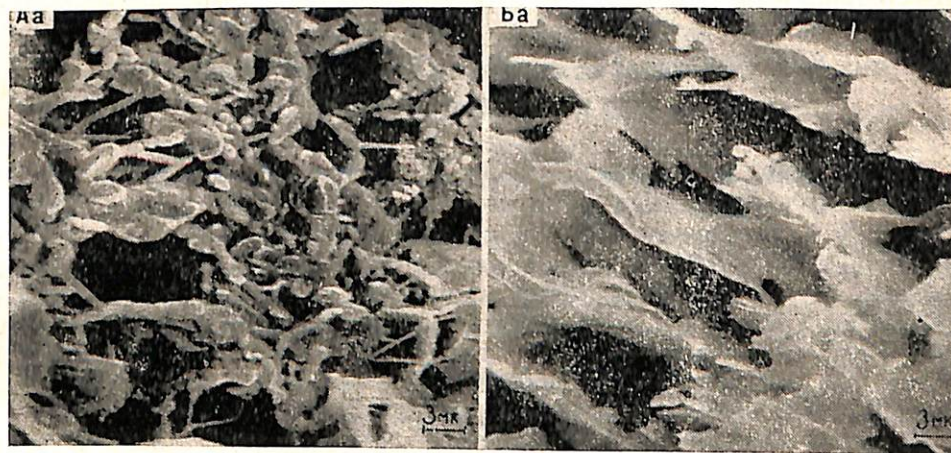


Рис. 7. Микротекстура каолинитовой глины (А) и монтмориллонитовой глины (Б), насыщенной  $Na^+$  (а) и  $Ca^{2+}$  (б)



Образование мощных оболочек связанной воды вокруг грунтовых частиц обуславливает распад микроагрегатов. Уменьшение оболочек связанной воды вокруг грунтовых частиц способствует обратному явлению — процессу коагуляции частиц, образованию микроагрегатов.

В природных грунтах наибольшее значение в качестве диспергатора имеет  $\text{Na}^+$ , коагулятора —  $\text{Ca}^{2+}$ . При этом выход частиц глинистой фракции в процессе гранулометрического анализа при замене  $\text{Ca}^{2+}$  на  $\text{Na}^+$  увеличивается до 8 раз, а коллоидных частиц иногда даже до 25 раз. Естественно, что при этом изменяется микростроение дисперсных грунтов. Это хорошо видно на фотографиях, сделанных на сканирующем электронном микроскопе (рис. 7). Во всех случаях  $\text{Na}$ - и  $\text{Ca}$ -глины имеют разное микростроение, что обусловлено диспергирующими и коагулирующими свойствами этих катионов.

Влияние обменных катионов на содержание в грунтах связанной воды, на характер микроструктуры и микротекстуры и свойства грунтов значительно больше в том случае, когда в глинистой фракции содержится монтмориллонит. При содержании в глинистой фракции каолинита роль обменных катионов в указанном отношении становится

## § 7. ГАЗОВЫЙ КОМПОНЕНТ В ГРУНТАХ И ВЛИЯНИЕ ЕГО НА СВОЙСТВА ГРУНТОВ

**Состав газов в грунтах.** Различие в составе атмосферного воздуха и газов в грунтах прежде всего заключается в содержании  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$ . Если в атмосферном воздухе углекислота составляет лишь сотые доли процента ( $\sim 0,03\%$ ), то содержание ее в почвах и горных породах достигает десятых и даже целых процентов, а в почвенном воздухе почти 10%. Кислород и азот в толще грунтов содержатся в различных количествах. В почвенной части грунтовой толщи их, как правило, меньше, чем в атмосфере. Это объясняется тем, что в почве происходят процессы поглощения кислорода и азота, выделение углекислоты.

В состав газообразной компоненты входит также вода в форме пара.

**Состояние газов в грунтах.** Газы в порах грунтов могут находиться в свободном, адсорбированном и защемленном состояниях.

Адсорбированные газы удерживаются на поверхности грунтовых частиц под воздействием молекулярных сил. Благодаря этим силам в сухом грунте на поверхности образуются полимолекулярные газовые пленки. Количество адсорбированных газов в грунтах зависит от их минерального состава, присутствия гумуса и других органических веществ, от дисперсности и величины пористости грунтов. Значительной адсорбционной способностью обладают окиси железа и органические вещества. Обычно содержание адсорбированных газов в почвах подзолистой полосы колеблется от 2 до 7  $\text{cm}^3$  на 100 г почвы, а для черноземов — в пределах 8—15  $\text{cm}^3$  на 100 г почвы. С ростом дисперсности грунта количество адсорбированных газов в нем увеличивается. Для кварцевого мелкозернистого песка содержание адсорбированных газов было определено в 1  $\text{cm}^3$  на 100 г, т. е. в несколько раз меньше его обычного содержания в почвах.

При увлажнении грунта происходит вытеснение адсорбированных газов водной пленкой. У лёссовидного суглинка и глинистых грунтов количество адсорбированных газов уменьшается с увеличением влажности и при  $W_{\text{лт}}$  адсорбированные газы отсутствуют.

В том случае, когда увлажнение связано с капиллярным поднятием воды, вытесняемые из открытых пор газы свободно уходят в атмосферу. При одновременном избыточном увлажнении грунта снизу и сверху на отдельных его участках газы могут оказаться в замкнутом состоянии. В этом случае их называют «защемленными газами», или «защемленным воздухом», если это происходит в поверхностной части земной коры. Защемленные газы могут занимать значительные участки, внутри грунта или находиться только в небольших количествах в тончайших микропорах.

В отличие от адсорбированных газов, максимальное количество защемленных газов образуется при какой-то оптимальной влажности грунта. В опытах П. Ф. Мельникова (1960) глинистые и лёссовидные грунты, испытавшие одинаковое уплотнение, при небольшой влажности содержат наименьшие объемы защемленных газов. Например, при влажности суглинка 6—10% количество защемленных газов было 1—1,5% от объема образца. С увеличением влажности до 25—30% объем защемленных газов увеличился до 5—6% от объема образца или до 12—16% от объема пор. С дальнейшим увеличением влажности количество защемленных газов будет уменьшаться. При полном заполнении пор водой и при нулевой влажности защемленных газов в грунте не содержится. Защемленные газы могут занимать в глинистых грунтах 20—25% от объема пор.

Наличие в грунтах адсорбированных и защемленных газов обуславливает многолетнюю осадку насыпей из глинистых грунтов, деформации и разрывы земляных насыпей, уменьшение водопроницаемости грунтов.

Газы могут содержаться в растворенном состоянии также в воде, заполняющей поры грунтов. При этом изменяются ее свойства, и в частности фильтрационная способность. Для определения максимального значения  $K_f$  перед фильтрацией газ из воды должен быть удален.

## § 8. ВЛИЯНИЕ МАКРО- И МИКРООРГАНИЗМОВ НА СВОЙСТВА ГРУНТОВ

Макро- и микроорганизмы составляют живую компоненту грунтов. Микроорганизмы живут в почве и подпочвенной толще; их влияние на состав, строение и свойства грунтов ограничивается несколькими метрами от дневной поверхности. Здесь оно может быть весьма значительным. Чтобы получить представление об этом воздействии, достаточно вспомнить, что огромное количество растений своими корнями пронизывает почву и подпочвенную часть горных пород, что в известных условиях роющая деятельность таких животных, как кроты, землеройки, мыши, может быть весьма интенсивной. Часто ход крота на склоне легкоразмываемых лёссов может явиться началом оврагообразования. Корни растений и животные, обитающие в почве и подстилающих горных породах, коренным образом изменяют инженерно-геологические свойства толщи, в которой они живут, обогащая ее органическим веществом и изменяя ее строение. Тем не менее влияние макроорганизмов на горные породы меньше, чем микроорганизмов.

Микроорганизмы могут существовать на большой глубине. Бактерии, окисляющие углеводороды и образующие горючие газы ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), прослеживались в разрезе Северного Устья до глубины 1100 м, а в водах Северного Кавказа — ниже 2000 м (Богданова и др., 1974).



Состав микроорганизмов, обитающих в почвах и горных породах, чрезвычайно разнообразен: это — бактерии, грибы, водоросли, дрожжи, вирусы и др.

Все микроорганизмы делятся на гетеротрофные и автотрофные. Развитие автотрофных микроорганизмов происходит за счет световой энергии или энергии окисления ряда неорганических соединений (водорода, серы, аммиака, железа и др.). Гетеротрофные микроорганизмы используют для своей жизнедеятельности различные органические вещества, их отдельные представители очень разнообразные по своим свойствам, могут развиваться как в присутствии, так и в отсутствие кислорода. Многие гетеротрофные микроорганизмы, обитающие в грунтах, способны развиваться в очень бедных питательными элементами растворах (концентрация органических веществ в растворе может составлять не больше 5 мг/л); это — олиготрофные микроорганизмы, обычно располагающиеся на поверхности минеральных частиц и получающие питание из омывающих их растворов.

Микроорганизмы могут существовать в грунтах при самых разнообразных условиях: одни — при температуре минус 7°, другие — в кипящих горячих источниках. Количество микроорганизмов может достигать сотен миллионов экземпляров в 1 г грунта до глубины 15—20 и возможно более метров. Они обитают в почвах и горных породах либо в поровых растворах, либо в адсорбированном состоянии на поверхности твердых частиц (рис. 8).

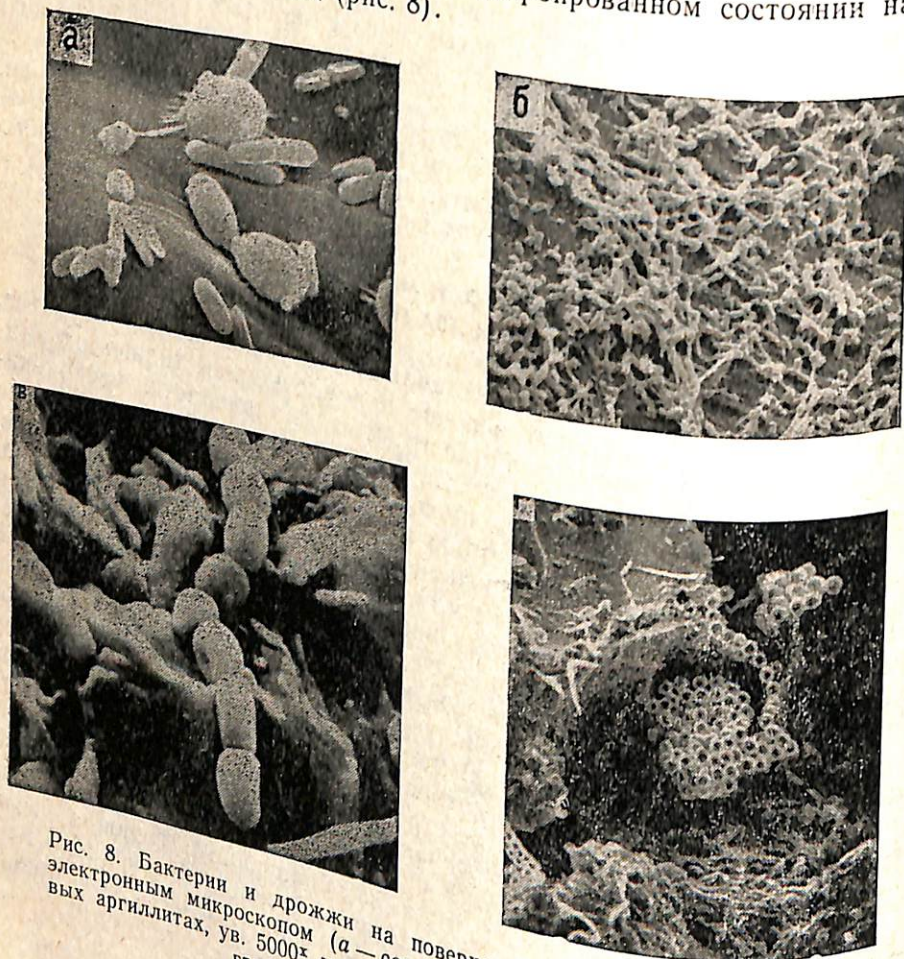


Рис. 8. Бактерии и дрожжи на поверхности минеральных частиц под электронным микроскопом (а — современные, ув. 5000 $\times$ ; б — в палеогеновых аргиллитах, ув. 5000 $\times$  и в — ув. 10 000 $\times$ ); г — споры микроорганизмов в песчаной породе (ув. 10 000 $\times$ ).

Микроорганизмы, обитающие в поровых водах, способны изменять величину pH и превращать их в воды агрессивные, с высокой коррозионной активностью. Эта проблема возникла при строительстве Киевского метрополитена в палеогеновых песках, где вследствие деятельности тионовых бактерий появились агрессивные кислые воды.

Исследования роли микроорганизмов в образовании пльвунов В. В. Радиной (1972) были официально признаны научным открытием, сущность которого заключается в том, что «в водонасыщенной дисперсной породе происходит накопление в виде пузырьков газообразных продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, которые вызывают избыточное давление в жидкой фазе породы, являющееся энергетическим фактором ее подвижности».

По представлению В. В. Радиной, газообразные соединения, вырабатываемые микроорганизмами в водонасыщенной породе, частично уходят в атмосферу, частично сохраняются в виде заземленных пузырьков, рассеянных в поровой воде, частично в ней растворяются. Присутствие газа, создаваемого микроорганизмами, в воде приводит к увеличению давления в поровой воде до 0,4 МПа и более. Газообразные продукты жизнедеятельности микроорганизмов, накапливаясь в грунте и создавая повышенное давление в порах между частицами грунта, снижают тем самым трение между частицами грунта, т. е. снижают его сопротивление сдвигу, в результате чего может образоваться пльвун.

Наблюдения за состоянием водонасыщенных дисперсных грунтов в основании бетонных плотин крупных ГЭС показывают их значительную загазованность. Это обстоятельство тоже можно связать с деятельностью микроорганизмов. Так, в иле пресноводных озер, находящихся на территории Марийской АССР, микробиологическое образование метана составляет 0,04—8 см<sup>3</sup>/л в сутки; по подсчетам в горизонте ила 0—20 см при площади озера 0,1 км<sup>2</sup> за год бактериями образуется более 70 000 м<sup>3</sup> метана (Беляев, 1974). В основании сооружений этот процесс, конечно, протекает менее интенсивно, но, по-видимому, он имеет место, и поэтому возникает вопрос: не приведет ли со временем микробиологическая загазованность водонасыщенных дисперсных грунтов к их разупрочнению?

Механическая прочность грунтов может уменьшаться также за счет выделения микроорганизмами поверхностно-активных веществ. При известных условиях микроорганизмы способны, наоборот, увеличивать механическую прочность грунтов. Примером может явиться деятельность железобактерий, в результате которой в сильногумифицированных водоемах и болотах образуются ожелезненные прослои песчаников.

Еще более широкое развитие имеет в природе процесс агрегирования минеральных частиц под влиянием деятельности микроорганизмов. Этот процесс может происходить за счет склеивания частиц продуктами жизнедеятельности микроорганизмов (особенно полисахаридами) при адсорбции микроорганизмов на поверхности твердых частиц.

Д. Г. Звягинцев пришел к ряду интересных выводов. Оказывается, что 1 г почвы и глинистых минералов может поглотить до нескольких миллиардов микроорганизмов.

Адсорбционная способность грунта по отношению к микроорганизмам зависит от соотношения их видового состава с определенными глинистыми минералами, от их дисперсности, от pH среды, состава обменных катионов и размера капилляров. Так, наибольшей адсорбционной способностью обладают минералы группы монтмориллонита. Частицы кварцевого песка размером 50—100 мкм слабо поглощали бактериаль-



Селевые процессы характеризуются большой интенсивностью и частотой проявления. Сели неоднократно разрушали шоссейные и железные дороги, различные инженерные сооружения и жилые здания, уничтожали сельскохозяйственные угодья и леса. Наиболее мощные из них прошли по руслу Слюдянки в 1934 и 1960 гг.

В Джугджуро-Становом и других регионах широко развиты наледи. Наледи обладают большой разрушительной силой. Особенно большой вред приносят они Амуру-Якутской автомагистрали в пределах Станового хребта. Слой наледного льда на многих участках перекрывает дорожное полотно, создает осложнения в движении транспорта в течение всего зимнего периода, приводит к частичному или полному разрушению мостовых переходов, жилых построек и других инженерных сооружений, попадающих в зону действия наледи.

Опыт строительства и эксплуатации Амуру-Якутской автомагистрали показывает, что вопросы борьбы с наледями и пучением грунтов являются одними из основных при строительстве сооружений линейного типа.

#### Северо-западная часть Тихоокеанского подвижного пояса.

К северо-западной части Тихоокеанского подвижного пояса относится территория Дальнего Востока, охватывающая около одной пятой территории Советского Союза. С севера и востока регион омывается морями Лаптевых, Восточно-Сибирским, Чукотским, Беринговым, Охотским и Японским. Южная граница региона совпадает с государственной границей между СССР и КНР.

Природные условия Дальнего Востока характеризуются исключительной контрастностью и неоднородностью, обусловленной его положением на окраине Азиатского материка, большой протяженностью с юга на север (от 42 до 70° с. ш.), сочетанием преимущественно горного рельефа с редкими разобщенными, но достаточно обширными равнинами.

Основное значение в экономике Дальнего Востока имеют горнодобывающая и рыбная промышленность. Развиваются лесная промышленность, машиностроение и металлообработка, черная металлургия, промышленность строительных материалов, сельское хозяйство. Большое экономическое значение имеет морской транспорт. На базе добычи угля и газа в годы последних пятилеток создается топливно-энергетическая промышленность, недостаточное развитие которой являлось серьезным тормозом в развитии экономики Дальнего Востока. Построены тепловые и гидротермальные электростанции (Анадырская, Магаданская, Хабаровская, Приморская и др.), строятся Билибинская атомная электростанция и Зейская гидроэлектростанция. Быстрыми темпами ведется строительство дорог, мостов, причалов и портов. Успешно проводится строительство Байкало-Амурской магистрали.

Территория Дальнего Востока характеризуется тремя главными особенностями, которые во многом определяют ее инженерно-геологические условия. Первой особенностью является последовательное смещение геосинклинальных процессов с запада на восток, протекавшее, однако, не всегда поступательно и чередовавшееся с эпохами регенерации геосинклинальных условий в областях заверенной складчатости, сопровождавшихся дальнейшим дроблением и «переработкой» срединных массивов. Второй ее особенностью являются большая тектоническая подвижность в мезокайнозойе и широкое проявление в орогенный и посторогенный этапы развития мезозойид гранитоидного магматизма и вулканизма, охватившего также и внегеосинклинальные площади. Третьей особенностью является развитие по восточной периферии Тихоокеанского

подвижного пояса современной геосинклинали и зоны молодого вулканизма. Таким образом, для Дальнего Востока тектонический фактор играет доминирующую роль в развитии многообразия типов и форм осадконакопления, магматизма, метаморфизма и создания инженерно-геологической обстановки.

Хотя основная роль принадлежит геотектоническому фактору, нельзя не учитывать влияние на инженерно-геологические условия природно-климатической зональности в связи с протяженностью региона в меридиональном направлении более чем на 4000 км и широким развитием высокогорного рельефа. Климатическими особенностями определяются современное состояние пород и развитие многолетней мерзлоты, интенсивность денудационного преобразования горных сооружений, в известной мере гидрогеологические условия, а также характер современных геологических процессов.

Гранитоидная формация поздней юры — раннего мела послужила основанием для Колымской ГЭС. В зоне выветривания граниты представляют собой разборную породу и содержат избыточное количество льда. Плотность гранитов различной степени выветрелости составляет 2,67 г/см<sup>3</sup>. Вне зон выветривания нормативное давление на гранитоиды практически не ограничено. Трещиноватость гранитоидов неравномерная. При строительстве Колымской ГЭС было выявлено, что мощность участков повышенной трещиноватости колеблется от 1 до 20 м, ширина трещин — от нескольких миллиметров до 10 см. Ниже слоя сезонного оттаивания трещины заполнены льдом либо полностью, либо частично.

В районе Верхоянска строительство осуществлялось на мерзлых породах флишовой формации ранней — средней юры. Прочность и устойчивость пород в массиве зависят от их трещиноватости и характера заполнения трещин льдами. Максимальная трещиноватость и льдистость наблюдаются у глинистых сланцев и алевролитов до глубины 15—25 м.

Наибольшее значение в формировании современных инженерно-геологических условий Дальнего Востока имело развитие этой территории в плейстоцене, когда в различной форме и с различной интенсивностью проявились новейшие тектонические движения.

Относительно небольшие по амплитуде (не более 1500—2000 м) новейшие тектонические движения привели к образованию на рассматриваемой территории преимущественно низкогогорного и среднегогорного рельефа со средними абсолютными высотами 1000—1500 м. Только отдельные горные массивы в бассейнах рек Индигирки и Колымы, в хребтах Черского и Сунтар-Хаята, а также в водораздельной части Верхоянского, Ям-Алинского и Баджалского хребтов имеют высоты более 2000 м.

С плиоцен-плейстоценовым временем связано образование вулканических нагорий, плато и стратовулканов на склонах Сихотэ-Алиня, в Коряковском нагорье, в северной части Среднего хребта Камчатки. Излияния базальтов в этих районах и образование вулканических плато произошли в условиях расчлененного горного рельефа, что доказывается изменчивостью мощности базальтов, существованием среди плато островных возвышенностей, сложенных более древними породами.

Огромную роль, особенно на Камчатке и Курильских островах, сыграли извержения центрального типа, вызвавшие образование стратовулканов, экструзивных куполов, лавовых покровов и потоков. На Курильских островах, представляющих собой вершины огромной горной