

В. В. Крамаренко

ГРУНТОВЕДЕНИЕ

УЧЕБНИК
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА

*Допущено УМО вузов по образованию в области
прикладной геологии в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлениям подготовки
130100 «Геология и разведка полезных ископаемых»
и 130300 «Прикладная геология»*

Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru

Москва ■ Юрайт ■ 2016

УДК 621.131(075.8)

ББК 26.3я73

К78

Автор:

Крамаренко Виолетта Валентиновна — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Крамаренко, В. В.

К78 Грунтоведение : учебник для академического бакалавриата / В. В. Крамаренко — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 430 с. — Серия : Университеты России.

ISBN 978-5-9916-7224-5

Серия «Университеты России» позволит высшим учебным заведениям нашей страны использовать в образовательном процессе учебники и учебные пособия по различным дисциплинам, подготовленные преподавателями лучших университетов России и впервые опубликованные в издательствах университетов. Все представленные в этой серии учебники прошли экспертную оценку учебно-методического отдела издательства и публикуются в оригинальной редакции.

В учебнике «Грунтоведение» автора В. В. Крамаренко хорошо представлены основные современные проблемы анализа состава грунтов, их физические, гидрофизические, химические, физико-механические свойства, особое место занимает рассмотрение методик изучения их основных параметров и даны соответствующие описательные примеры, представлены методы расчета и статистические данные.

На данный момент ряд нормативных данных (ГОСТы), приводимый в учебнике, устарел. Однако это существенно не влияет на процесс обучения анализа грунтов, и произошедшие изменения при необходимости могут быть учтены преподавателями.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» направлений «Геология и разведка полезных ископаемых» и «Прикладная геология», а также может быть полезно для студентов строительных специальностей.

УДК 621.131(075.8)

ББК 26.3я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-9916-7224-5

© Крамаренко В. В., 2011

© ООО «Издательство Юрайт», 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие содержит лекционный материал по дисциплине «Грунтоведение» и предназначено для студентов очного и заочного обучения направления «Геология и разведка полезных ископаемых». Пособие подготовлено с учетом последних достижений науки и практики. В нем освещены вопросы, связанные с составом грунтов, с их физическими, гидрофизическими, химическими, физико-механическими свойствами, методиками изучения их основных параметров, а также с классифицированием грунтов. Более детально разработаны темы, посвященные специфическим грунтам: органическим, просадочным и мерзлым, что немаловажно для территорий Западной Сибири, северных регионов и Дальнего Востока.

Учебным планом дисциплины «Грунтоведение» предусмотрены лабораторные работы, в связи с чем в пособии приводятся методы проведения анализов и испытаний грунтов, описание применяемых при испытаниях приборов и оборудования, основная терминология и классификации грунтов, позволяющие прогнозировать их свойства, а также описание используемых зарубежных методов проведения аналогичных опытов и другие данные, необходимые для сравнения их результатов.

По грунтоведению до настоящего времени создан ряд знаменательных работ, которые сыграли большую роль в становлении теоретических и практических основ науки. Среди них труды Е.М. Сергеева, В.А. Приклонского, В.Д. Ломтадзе, Е.Г. Чаповского, В.И. Осипова, а также коллективная работа преподавателей МГУ под редакцией В.Т. Трофимова, обобщившая многолетний опыт ученых и производственников. Данное пособие подготовлено на основе этих работ, но носит в основном прикладной характер, в нем подробно рассмотрены основные показатели, определяемые при инженерно-геологических изысканиях (таблица ниже), а также характеристики, по которым грунты классифицируются в соответствии с действующими нормативными документами. В основу раздела о физико-механических свойствах грунтов положены действующие нормативные документы и работы Г.Г. Болдырева.

Таблица

Виды лабораторных определений состава и свойств грунтов при изысканиях [109, 112, 113]

Лабораторное определение	Грунты					Государственный стандарт
	Крупно-обломочные	Песчаные	Глинистые	Скальные	Лед	
Гранулометрический состав [109]	+	+	С	–		12536
Петрографический состав [109]	С	–	–	С		–
Минеральный состав [109]	С	С	С	–		–
Валовой химический состав [109]	–	С	С	С		–
Суммарное содержание легко- и среднерастворимых солей [109]	С	С	С	С		–
Определение содержания легко- и среднерастворимых солей [113]	С	+	+	–		26423 26428
Емкость поглощения и состав обменных катионов [109]	–	–	С	–		–
Относительное содержание органических веществ [109]	С	С	С	–		23740
Природная влажность [109]	+	+	+	С		5180
Влажность на границе текучести и раскатывания [109]	–	–	+	–	–	5180
Плотность [109]	+	+	+	+	+	5180
Максимальная плотность [109]	С	С	С	–		22733
Плотность в предельно плотном и рыхлом состоянии [109]	С	С	–	–	–	–

Лабораторное определение	Грунты					Государственный стандарт
	Крупно-обломочные	Песчаные	Глинистые	Скальные	Лед	
Плотность сухого грунта в предельно плотном и рыхлом состоянии [113]	С	+	-	-	-	-
Плотность частиц грунта [109, 113]	+	+	+	-	-	5180
Угол естественного откоса под водой и в сухом состоянии [109, 113]	-	+	-	-	-	-
Максимальная молекулярная влагоемкость [109]	-	С	С	-	-	-
Коэффициент фильтрации [109]	-	С	С	-	-	25584
Размокаемость [109]	-	-	С	С	-	-
Растворимость [109]	-	-	-	С	-	-
Коэффициент выветрелости [109]	С	-	-	С	-	-
Коррозионная активность [109]	-	С	С	-	-	-
Компрессионное сжатие [109]	С	С	+	-	-	12248
Трехосное сжатие [109]	С	С	+	-	-	12248
Сопротивление срезу (прочность) [109]	С	С	+	-	-	12248
Сопротивление одноосному сжатию [109]	С	-	С	+	-	12248
Общая карбонатность [109]	С	+	+	+	-	ASTM, D4373
Коэффициент теплопроводности мерзлых и талых грунтов [112]	+ , P	+ , P	+ , P	С	С	26263
Объемная теплоемкость мерзлых и талых грунтов [112]	+ , P	+ , P	+ , P	С	С	**1)
Коррозионная агрессивность мерзлых засоленных грунтов [112]	+	+	+	-	-	**2)
Температура начала замерзания засоленных грунтов [112]	+*	+ , P	+ , P	-	-	**1)
Температура начала замерзания незасоленных грунтов [112]	+ , P*	+ , P	+ , P	-	-	**1)
Степень пучинистости грунтов [112]	+ , P(II)	+ , P(II)	+ , P(II)	-	-	28622
Касательные силы пучения грунтов [112]	+ , P	+ , P	+ , P	С	С	**
Сжимаемость пластично- мерзлых грунтов [112]	+ , P(II)	+ , P(II)	+ , P(II)	-	-	12248
Коэффициент оттаивания и сжимаемости грунтов при оттаивании [112]	-	-	С	-	-	12248
Коэффициент вязкости сильнольдистых грунтов [112]	-	+	+	-	С	То же
Эквивалентное сцепление [112]	-	С	+	-	-	То же
Сопротивление мерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания фундамента [112]	+ , P(I)	+ , P(I)	+ , P(I)	С	С	То же
Сопротивление мерзлых грунтов и льдов нормальному давлению [112]	+ , P(I)	+ , P(I)	+ , P(I)	С	С	**1)
Сопротивление мерзлых грунтов и льдов сдвигающим усилиям [112]	-	+ , P(I)	+ , P(I)	+ , P(I)	С	С

Примечание. «+» – определения выполняются; «-» – не выполняются; «С» – выполняются по дополнительному заданию; «Р» – устанавливается расчетом; «+ , P» – выполняется или устанавливается расчетом; (I), (II) – принцип использования мерзлых грунтов в качестве основания; * – определяется в глинистом заполнителе; ** – рекомендуется использовать: 1) Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. Стройиздат, М., 1973; 2) Регламент «Коррозионная агрессивность мерзлых грунтов по отношению к стали». ПНИИИС, М., 1997.

Пособие будет полезно не только студентам, обучающимся по направлению «Геология и разведка полезных ископаемых», но и студентам всех геологических и строительных специальностей, а также производственникам – инженерам-геологам, изыскателям, проектировщикам и строителям.

ВВЕДЕНИЕ

Грунтоведение – это научное направление инженерной геологии, исследующее состав, состояние, строение и свойства грунтов и грунтовых массивов, закономерности их формирования и пространственно-временного изменения под воздействием геологических процессов, формирующихся под влиянием природных факторов и в связи с инженерно-строительной деятельностью человека.

Объектом изучения грунтоведения являются грунты, сложенные ими простые и сложные геологические тела, которые в свою очередь формируют грунтовые толщи, и геологические природные и антропогенные процессы, проходящие в них. Эти элементы представляют собой верхние горизонты земной коры и являются объектами трех самостоятельных, тесно связанных между собой научных направлений инженерной геологии: грунтоведения, инженерной геодинамики и региональной инженерной геологии.

Предметом изучения грунтоведения являются знания о грунтах, их составе, состоянии, строении и свойствах.

К пониманию термина «грунт» в инженерно-геологической литературе существует два принципиально различных подхода. *Первый* трактует «грунт» как специальный инженерно-геологический термин, который широко используется в строительной литературе и практике, а *второй* отрицает необходимость использования этот термина, считая его чуть ли не излишним.

Определение, принятое авторским коллективом (Е.М. Сергеев, Г.А. Голодковская, Р.С. Зиангиров, В.И. Осипов и В.Т. Трофимов), дано в третьем издании учебника «Грунтоведение» (1971): «*Грунты* – это любые горные породы и почвы, которые изучаются как многокомпонентные системы, изменяющиеся ко времени, с целью познания их как объекта инженерной деятельности человека». В качестве компонент грунта авторы называли твердую, жидкую и газовую составляющие.

Г.К. Бондарик в 1981 г. дал свое определение термина: «*Грунт* есть минеральная (органо-минеральная) фазовая система, включающая в общем случае твердую, жидкую и газообразную фазы. Твердая фаза грунта может быть представлена любой горной породой, горной породой и льдом, любой почвой». Или «под грунтами понимают любые горные породы, почвы и антропогенные геологические образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы, изучаемые в связи с инженерной деятельностью человека».

В.Д. Ломтадзе в «Словаре по инженерной геологии...» писал, что «*грунт* – широко распространенное в строительной практике условное прикладное наименование, главным образом, песчаных и глинистых пород. Попытка обозначать этим термином любые горные породы не получила признания. Существуют международные ассоциации *по механике грунтов и фундаментостроению* и *по механике скальных горных пород*. Ученые и инженеры первой занимаются изучением песчаных и глинистых пород в инженерном аспекте, а второй – изучением горных пород твердых (скальных) и относительно твердых (полускальных). В инженерной геологии следует исходить из фундаментальных геологических понятий, т. е. все геологические образования земной коры, как природные, так и измененные инженерной деятельностью человека, следует называть *горными породами*». В зарубежной практике понятия грунты (*soil*) и скальные грунты (*rock*) не связаны одним термином, так как они значительно различаются по составу, свойствам и, соответственно, по методикам определения их характеристик.

Геологический словарь определяет, что «*породы горные* – естественные минеральные агрегаты определенного состава и строения, сформировавшиеся в результате геологических процессов и протекающие в земной коре в виде самостоятельных тел. С геохимической точки зрения горные породы – естественные закономерные ассоциации минералов, состоящие преимущественно из петрогенных элементов (главных химических элементов породообразующих минералов). В соответствии с главными геологическими процессами, приводящими к образованию горных пород, среди них различают 3 генетических класса: осадочные, магматические (изверженные) и метаморфические». Таким образом, по данному определению *горные породы* представлены только минеральной составляющей.

В.Т. Трофимов предложил под *грунтами* понимать любые горные породы, почвы, осадки и антропогенные геологические образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы, исследуемые в связи с планируемой, осуществляемой или осуществленной инженерной деятельностью человека [50].

Учитывая вышесказанное, ГОСТ 25100 дает следующее определение: «*Грунт* – это горные породы, почвы, техногенные образования, представляющие собой многокомпонентную, многообразную геологическую систему, являющуюся объектом инженерно-хозяйственной деятельности. Грунты могут служить основаниями зданий и сооружений, средой для их размещения, материалом для их возведения» [34].

1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ЗАДАЧИ ГРУНТОВЕДЕНИЯ

В истории развития грунтоведения обычно выделяют предысторию и три основных этапа [50]: *первый* – 1920–1945 гг., *второй* – 1946–1986 гг., *третий этап* – с 1987 г. по настоящее время.

Предыстория грунтоведения – длительный этап развития терминологии, поиска методов и методик изучения грунтов. В XIX в. среди русских строителей установилось определенное понятие термина «грунт», под которым понимались те горные породы, которые служили в качестве основания для какого-либо сооружения. В связи со строительством железных дорог к геологическому обоснованию проектов были привлечены крупнейшие русские геологи – И.В. Мушкетов, А.П. Павлов, В.А. Обручев, А.П. Карпинский, С.А. Яковлев и др. В процессе этих работ в геологии наметилось новое «инженерное» направление, а в конце XIX – начале XX в. в России широкое распространение получили термины «геолого-технические» и «техничко-геологические» изыскания.

Зарубежные ученые в этот период также исследуют грунты в связи со строительством сооружений. Наиболее значимые работы проводят: С.А. Coulomb (давление грунта, сдвиги, напряжения), Т. Telford (каналы, земляные работы, фундаменты), С. Berigny (земляные работы), А. Collin (стабильность склонов, земляные работы), Sig B. Baker и W.J., М. Rankine, H.D. Krey, A.L. Bell (давление грунта), J. Boussinesq (распределение напряжений), О. Reynolds (дилатансия песков), А.М. Atterberg (классификация грунтов, консистенция глин).

Первый этап развития грунтоведения. В 1923 г. в Ленинграде создано Дорожно-исследовательское бюро, в котором под руководством Н.И. Прохорова, П.А. Замятченского и Н.Н. Иванова были исследованы почвы и осадочные породы для дорожного строительства. Большое значение для развития грунтоведения имели работы П.А. Замятченского, М.М. Филатова, И.В. Попова, В.А. Приклонского, В.В. Охотина, С.С. Морозова и др. Благодаря М.М. Филатову, методологической основой науки стал генетический подход при изучении грунтов. Суть его в том, что их состав, строение и свойства рассматриваются как результат их генезиса и последующих постгенетических преобразований на этапе диагенеза, катагенеза, метаморфизма и гипергенеза. Одновременно с грунтоведением возникла механика грунтов. Ее исходные положения были освещены и в вышедшей в 1925 г. монографии К. Терцаги «Строительная механика грунтов», где были приведены теория консолидации и закон эффективных напряжений.

В 1929 г. была организована первая кафедра инженерной геологии в Ленинградском горном институте, в 1930 г. открыта кафедра грунтоведения в Ленинградском университете, в 1932 г. – в Московском геологоразведочном институте, а в 1938 г. – в Московском университете.

В 1930 г. в Томске в Сибирском геологоразведочном институте создана кафедра гидрогеологии и инженерной геологии, которая до открытия аналогичной кафедры в 1968 г. в Иркутском технологическом институте была единственной в Сибири и на Дальнем Востоке.

На данном этапе развития грунтоведение сформировалось в самостоятельную науку, исследующую свой объект как геологический и исторический; было разработано множество методов и методик изучения состава, строения, состояния и свойств грунтов на основе адаптации методов других наук и разработки собственных методов, что позволило успешно решать научные и практические задачи; произошла интеграция грунтоведения с другими инженерно-геологическими разделами, в результате чего сформировалась инженерная геология, объединившая грунтоведение, инженерную геодинамику и методику инженерно-геологических исследований. Выпущены учебные пособия и монографии: М.М. Филатов «Основы дорожного грунтоведения» (1936), В.А. Приклонский «Общее

грунтоведение» (1943), В.В. Охотин «Физические и механические свойства грунтов в зависимости от их минералогического состава и степени дисперсности» (1937), И.В. Попов «Основы инженерно-геологического грунтоведения» (1941).

Второй этап – этап бурного и многопланового развития грунтоведения. Исследования охватили, по Е.М. Сергееву, «изучение грунтов от микроуровня до массива с целью рационального использования геологической среды». В этот период огромный вклад в развитие методологических положений грунтоведения внесли В.А. Приклонский, Е.М. Сергеев, Г.К. Бондарик, В.Д. Ломтадзе, В.Т. Трофимов. Важнейшие результаты получены в изучении глинистых грунтов: И.М. Горьковой, Н.Я. Денисовым, Р.С. Зиангировым, В.Д. Ломтадзе, В.И. Осиповым, В.Н. Соколовым; лёссовых грунтов: Ю.М. Абелевым, А.К. Ларионовым, М.П. Лысенко, А.В. Минервиным, Е.М. Сергеевым, В.Т. Трофимовым, Я.Е. Шаевичем; песчаных грунтов: И.В. Ладыгиным, Л.В. Шаумян; мерзлых грунтов: С.С. Вяловым, Э.Д. Ершовым, Л.Т. Роман, П.А. Шумским; искусственных грунтов: Л.В. Гончаровой, С.С. Морозовым, Б.А. Ржанициним и др. Современные представления о структурных связях в грунтах разработали И.В. Попов, В.И. Осипов, В.Н. Соколов; о видах воды и процессах на границе твердой и жидкой компонент – Е.М. Сергеев, Р.И. Злочевская, В.А. Королев; о морфологических особенностях микростроения грунтов электронно-микроскопическим методом – Р.А. Дацко, Г.Г. Ильинской. Новые приборы для лабораторного изучения состава, строения и свойств грунтов были разработаны А.М. Васильевым, В.Я. Калачевым, И.М. Литвиновым, сотрудниками институтов Гидропроект, ВСЕГИНГЕО ЦНИИ МПС. Приборы для исследования свойств грунтов в массиве изобретены И.М. Литвиновым, Л.С. Амаряном, сотрудниками трестов инженерных изысканий.

Издана учебная литература: Е.М. Сергеев «Общее грунтоведение» (1952) и «Грунтоведение» (1939); В.А. Приклонский «Грунтоведение» (1949, 1951 и 1955); В.Д. Ломтадзе «Инженерная геология. Инженерная петрология» (1970 и 1984); Е.М. Сергеев, Г.А. Голодковская, Р.С. Зиангиров, В.Т. Трофимов, В.И. Осипов «Грунтоведение» (1971, 1974 и 1983); В.Д. Ломтадзе «Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов» (1952, с 1970, 1972 и 1990 гг. пособие выходило в свет под иными названиями); Е.Г. Чаповский «Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов» (1958, 1962, 1964 и 1975); «Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород» под редакцией Е.М. Сергеева (1984).

В этот период грунтоведение стало зрелой наукой с совершенным теоретическим базисом и разработанным аппаратурно-методическим комплексом, которые позволили решать сложные задачи по исследованию грунтов.

Третий этап развития грунтоведения начался в условиях перестройки и изменения экономических основ государства. В этот период существенно продвинулись теоретические разработки, основанные на обобщении накопленного огромного экспериментального материала, малозатратные лабораторные исследования грунтов, произошло внедрение компьютерных технологий, в том числе ГИС-технологий. Опубликованы монографии, в которых по-новому рассмотрены традиционные вопросы грунтоведения: В.Т. Трофимов «Генезис просадочности лёссовых пород» (1997), В.А. Королев «Очистка грунтов от загрязнения» (2002), И.К. Григорьева «Микростроение лёссовых пород» (2002). В 1993 г. опубликован «Практикум по грунтоведению», объединивший опыт проведения лабораторных работ в МГУ. В 2001 г. под редакцией В.Т. Трофимова издано «Грунтоведение», включившее огромный материал исследований грунтов; в 2006 г. вышел «Справочник современного изыскателя», авторы В.И. Куштин, И.Ф. Куштин и Л.Р. Маилян; в 2007 г. выпущены «Инженерно-геологические карты», авторы В.Т. Трофимов и Н.С. Красилова; «Инженерная геодинамика», авторы Г.К. Бондарик, В.В. Пендин и Л.А. Ярг; «Инженерно-геологические изыскания», авторы Г.К. Бондарик и Л.А. Ярг.

Конечной целью практических инженерно-геологических работ является создание совместно с проектировщиками, строителями и эксплуатационниками природно-геологической литосистемы (как части природно-технической системы), которая, с одной стороны, должна функционировать устойчиво, в оптимальном проектном режиме в данных инженерно-геологических условиях, а с другой – ограничить изменение последних под воздействием инженерного сооружения в некотором оптимальном диапазоне. В этих условиях функционирующая природно-техническая система сохраняет устойчивость, т. е. не переходит в другую систему.

Решение этой задачи проходит ряд стадий, в ходе которых осуществляется переход от потенциального воздействия на массив горных пород к реальному, в связи с чем инженер-геологу в процессе своей деятельности приходится исследовать *три типа систем*:

- 1) природную геологическую реальную (природную литосистему реальную);
- 2) природно-техническую литосистему идеальную;
- 3) природно-техническую литосистему реальную (рис. 1.1).

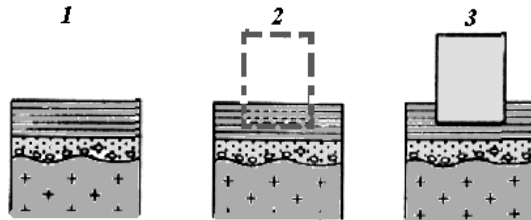


Рис. 1.1. Три типа литосистем, исследуемых инженером-геологом:
1 – природная геологическая реальная; 2 – природно-техническая идеальная;
3 – природно-техническая реальная

Первую из этих систем – **природную литосистему реальную** – инженер изучает на первом этапе практических работ – на этапе проведения инженерно-геологических изысканий для обоснования внестадийных или раннестадийных проектных решений. Все работы направлены на изучение состава, состояния, строения и свойств (инженерно-геологических условий) этой системы и закономерностей их формирования (морфологическая и ретроспективная задачи).

Природно-техническая идеальная литосистема исследуется инженером-геологом на стадии проектирования инженерного сооружения. Система создается совместным трудом проектировщика и инженера-геолога в виде идеальных моделей разного типа. На этом этапе реально существует только массив горных пород, изученный в инженерно-геологическом отношении с определенной достоверностью. Инженерного сооружения и воздействий от него еще нет, поэтому идеальная природно-техническая литосистема моделируется мысленно. Определяются важнейшие морфологические особенности литосистемы и режим функционирования: выбор типа и размера сооружения, типа фундамента в данной инженерно-геологической обстановке; выбор режима эксплуатации; прогноз поведения массива под влиянием потенциальных воздействий; обоснование и создание проекта схемы защиты инженерного сооружения и массива горных пород от вероятных геологических процессов и т. д.

Природно-техническая литосистема реальная создается в процессе строительства технической подсистемы и ее взаимодействия с массивом горных пород. На этом этапе инженер-геолог получает качественные и количественные характеристики взаимодействия сооружения с массивом горных пород в результате режимных наблюдений.

Весь комплекс задач, рассматриваемых в процессе инженерно-геологических исследований, разделяется на *три типа*: *морфологические, ретроспективные и прогнозные*. *Морфологические задачи* – это задачи, связанные с изучением состава, состояния, строения и свойств анализируемых грунтов, их инженерно-геологических условий в целом.

Ретроспективные задачи, т. е. обращенные в прошлое, связаны с изучением истории формирования объекта исследований и его качеств. *Прогнозные задачи* – задачи, связанные с изучением динамики исследуемой системы под воздействием различных причин в будущем; это динамические задачи, которые решают в физическом времени. Их решение опирается на данные, полученные при исследовании морфологических и ретроспективных задач.

Многообразие теоретико-методических задач грунтоведения может быть сведено к следующим позициям:

- к дальнейшему изучению состава, строения, состояния и свойств грунтов и слагаемых ими толщ верхних горизонтов земной коры, закономерностей их формирования, динамики развития под влиянием эволюции природы и в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека;
- развитию исследований по восстановлению истории формирования и созданию логико-графических моделей формирования свойств грунтов различных классов и различных генетических типов применительно к конкретным инженерно-геологическим структурам;
- созданию завершенных частных и общей теории формирования состава, строения, состояния и свойств грунтов (частные теории должны описывать формирование особенностей грунтов строго определенных генетических, литологических и других типов, а общая теория должна отражать главные черты формирования всего глобального многообразия грунтов);
- разработке принципиально новых методов и методик изучения состава, строения, состояния и свойств грунтов;
- совершенствованию теории и методов оценки устойчивости массивов грунтов к природным и техногенным воздействиям с точки зрения обеспечения стабильного функционирования инженерных сооружений;
- Прикладные задачи можно свести к трем направлениям:
 - к инженерно-геологическому обоснованию проектов инженерных сооружений и рациональному использованию верхних горизонтов земной коры для их размещения;
 - оценке влияния природных и техногенных воздействий на состояние и свойства грунтов и их массивов как оснований сооружений;
 - практическому управлению природно-технической или природной литосистемой с целью сохранения обеспечения ими функциональных особенностей [50].

2. СОСТАВ ГРУНТОВ

Грунт – это минеральная или органическая, органо-минеральная, многокомпонентная, многофазовая динамическая система, которая изучается в инженерно-геологическом отношении. Составляющими компонентами грунтовой системы являются (рис. 2.1): твердая компонента (минеральная, ледяная и органическая составляющие), жидкая компонента (содержащиеся в пустотах пород природные воды), газообразная компонента (газы в пустотах пород) и биотическая живая компонента (макро- и микроорганизмы, обитающие в горных породах) [50].

Соотношение компонент в грунтах определяет их состояние и свойства. В зависимости от того, полностью или частично будут заполнены поры водой (или газом) и содержатся в них живые микроорганизмы или нет, грунты могут являться двух-, трех- и четырехкомпонентными системами. Если грунт состоит из твердых частиц и все поры заполнены водой, то он является двухфазной системой. В большинстве случаев в грунте кроме твердых частиц и воды имеется воздух или иной газ, либо растворенный в воде, либо находящийся в виде пузырьков. Такой грунт является трехфазной системой. Содержащийся в грунте лед придает ему специфические свойства, которые приходится учитывать, особенно при строительстве в районах распространения вечномерзлых грунтов. Мерзлый грунт является четырехфазной системой. В некоторых грунтах присутствуют органические вещества в виде растительных остатков или гумуса. Наличие даже сравнительно небольшого количества таких веществ в грунте существенно отражается на его свойствах.

2.1. Минеральная компонента грунтов

2.1.1. Типы связей, состав и свойства минерального вещества грунтов

2.1.1.1. Типы связей в твердых компонентах грунтов

При инженерно-геологическом изучении грунтов особенно важно знать содержание в них породообразующих минералов, которые находятся в преобладающих количествах и оказывают влияние на их свойства. В большинстве случаев верхние слои земной коры сложены крупнообломочными, песчаными, пылевато-глинистыми, органогенными и техногенными грунтами. Большая часть дисперсных грунтов образовалась в результате накопления продуктов физического и химического выветривания. Некоторые грунты возникли вследствие отложения органических веществ, а также в результате искусственной отсыпки или намыва различных материалов. В процессе физического выветривания образовались крупнообломочные и песчаные грунты. Результатом химического и частично биологического выветривания являются минералы, составляющие мелкодисперсную часть пылевато-глинистых грунтов.

Наибольшее значение имеют минералы класса первичных силикатов, у которых преобладают внутрикристаллические связи ионно-ковалентного типа; простые соли (карбонаты, сульфаты, галоиды), имеющие ионный тип связей; глинистые минералы (гидрослоды, монтмориллонит, каолинит и др.), характеризующиеся большим разнообразием внутрикристаллических связей. Кроме того, в грунтах в значительном количестве может содержаться органическое вещество, в строении которого присутствуют водородные и молекулярные связи.



Рис. 2.1. Соотношение грунтовых компонент

Свойства минералов, которые, в свою очередь, обуславливают свойства грунтов, связаны с особенностями их химического состава, внутреннего строения и связей, которые существуют внутри самих минералов (атомов, ионов, радикалов). Прочность самих твердых компонент определяется прочностью и характером связей внутри них. Минералы с одинаковым химическим составом могут иметь разную прочность вследствие различий в их кристаллической структуре и характере химических связей внутри самого кристалла, поэтому более обоснованно проводить подразделение твердой компоненты по преобладающему типу связей внутри компоненты – чем прочнее преобладающие в твердой компоненте связи, тем она прочнее.

По характеру связей и определенным пространственным распределениям электронов в твердых компонентах грунтов выделяется пять типов связи: *ковалентный, ионный, металлический, водородный и молекулярный.*

Ковалентные связи образуют атомы (или группы атомов), на валентных орбиталях которых имеются не спаренные электроны, обобществление которых ведет к формированию общей для связывающихся атомов электронной пары (по одному электрону от каждого атома). При образовании ковалентной связи из одинаковых атомов распределение электронной плотности в орбиталях связывающихся электронных пар строго симметрично по отношению к обоим атомным центрам (неполярные связи). Атомы с различной электроотрицательностью (валентностью) образуют полярные ковалентные связи, в которых электронное облако связи смещено в сторону более электроотрицательного атома. Ковалентные связи свойственны силикатным минералам, они очень прочны и характеризуются направленностью. Многие кристаллические соединения с ковалентными связями тугоплавкие и обладают высокой твердостью (алмаз) и прочностью. Однако ковалентные связи могут существовать не только в твердых кристаллах, но и в жидкостях (в молекулах воды), а также в органических соединениях (в молекулах органических соединений, например C–C, C–H, C–N и др., где знак «–» означает ковалентную связь).

Ионные связи образуются кулоновскими силами притяжения противоположно заряженных ионов: катионов и анионов. Ионные связи вследствие своей электростатической природы не обладают направленностью и насыщенностью. Ненасыщенность ионной связи проявляется в склонности соединений с такой связью к образованию кристаллических решеток, в узлах которых каждый ион окружен максимально возможным числом ионов противоположного заряда. Ионные связи характерны для многих солей (галоидов, сульфатов, карбонатов). Наиболее характерное свойство соединений с ионным типом связи в отличие от ковалентного – растворимость, т. е. их способность к диссоциации ионов в растворах в полярных растворителях. Обусловлено это тем, что энергия сольватации ионов молекулами растворителя выше энергии ионной связи в кристалле.

Металлические связи образуются в соединениях между элементами, обладающими свободными валентными орбиталями и низкой энергией ионизации. Такие связи характерны для всех соединений, относящихся к металлам – веществам, с высокой электро- и теплопроводностью, обусловленными значительной подвижностью электронов в кристаллической решетке.

Металл представляет собой ряд положительных ионов, локализованных в определенных положениях кристаллической решетки и погруженных в «море» свободных подвижных электронов, что отличает ненаправленную металлическую связь от направленной ковалентной. Энергия связей между электронами и ядрами в кристаллах металлов относительно мала, она минимальна у щелочных металлов и возрастает с увеличением заряда ядра, достигая наибольших значений у переходных металлов.

Водородные связи представляют собой особый тип так называемой трехцентровой связи: X–H•••V (знак «–» означает ковалентную связь, а знак «•••» – водородную), в которой центральный атом водорода H, соединенный ковалентной связью с электроотрица-

тельным атомом X (например, атомами O, C, N, S и др.), образует дополнительную связь с атомом V (например, атомами N, O, S и др.), имеющим направленную вдоль линии этой связи не поделенную электронную пару. Различают меж- и внутримолекулярные водородные связи. Водородные связи характерны для водородсодержащих твердых компонентов грунта – льда, кристаллогидратов, некоторых глинистых минералов и др.

Молекулярные связи (силы Ван-дер-Ваальса) обусловлены взаимной поляризацией молекул и поэтому могут возникать как между полярными, так и между различными нейтральными молекулами. Это весьма слабые связи, которые могут существовать в твердых молекулярных кристаллах (например, отвердевших инертных газах, газогидратах и др.), а также в органических твердых компонентах и глинистых минералах. Твердые тела с молекулярными связями имеют низкую точку плавления и заметно сублимируют.

Основываясь на выделении преобладающего типа связи, твердые компоненты грунтов подразделяются на следующие группы, существенно различающиеся по своим свойствам:

- минералы с преобладанием ковалентных связей – первичные силикаты;
- с преобладанием ионных связей – ионные минералы и соли;
- металлических связей – металлические соединения;
- с преобладанием ковалентных и наличием молекулярных и водородных связей – глинистые минералы;
- компоненты с преобладанием молекулярных и наличием ковалентных связей – органическое вещество и органо-минеральные комплексы;
- компоненты с преобладанием водородных, молекулярных и наличием ковалентных связей – лед и газогидраты [50].

2.1.1.2. Состав и свойства первичных силикатов

Природные силикаты (от лат. *silex* – кремьень) – это химические соединения с комплексным кремнекислородным радикалом и преобладающими ковалентными связями. Силикаты – наиболее распространенные минералы, которые слагают более 75 % земной коры (вместе с кварцем около 87 %) и более 95 % изверженных горных пород. Общее количество минеральных видов силикатов около 800. Силикаты и алюмосиликаты являются породобразующими минералами и из них сложена основная масса горных пород: полевые шпаты, кварц, слюды, роговые обманки, пироксены, оливин и др. Самыми распространёнными являются минералы группы полевых шпатов и кварц, на долю которого приходится около 12 % от всех минералов.

Происхождение силикатов эндогенное, главным образом магматическое (пироксены, полевые шпаты). Они также характерны для пегматитов (слюды, турмалин, берилл и др.) и скарнов (гранаты, волластонит) и широко распространены в метаморфических породах – сланцах и гнейсах (гранаты, дистен, хлорит). Силикаты экзогенного происхождения представляют собой продукты выветривания или изменения первичных (эндогенных) минералов (каолинит, глауконит, хризосола). Силикаты – важные неметаллические полезные ископаемые (асбест, тальк, слюды, каолин, керамическое и огнеупорное сырьё, строительные материалы), они также являются рудами на бериллий, литий, цезий, цирконий, никель, цинк и редкие земли. Кроме того, они широко известны как драгоценные и поделочные камни (изумруд, аквамарин, топаз, нефрит, родонит и др.).

В основе структурного строения всех силикатов лежит тесная связь кислорода и кремния; эта связь исходит из отношения радиусов ионов Si (0,39 Å) и O (1,32 Å). Каждый атом кремния окружен расположенными вокруг него тетраэдрически атомами кислорода. Таким образом, в основе всех силикатов находятся кислородные тетраэдры или группы $[\text{SiO}_4]_z$, которые различно сочетаются друг с другом. Важной особенностью силикатов является способность к взаимному сочетанию (полимеризации) двух или нескольких кремнекислородных тетраэдров и общий атом кислорода. Характер этого сочетания учитывается при классификации силикатов, кроме того, учитывается химический состав радика-

лов и состав катионов, наличие и характер в составе силикатов воды или гидроксильных групп и дополнительных анионных групп. В случаях, когда в структуре силикатов другие тетраэдрические радикалы играют одинаковую роль с тетраэдрами $[\text{SiO}_4]^{4-}$, выделяют алюмосиликаты, титано- и цирконосиликаты.

В отличие от природных силикатов основная часть искусственных силикатов в грунтах находится в аморфном состоянии. По этой причине большинство из них не стабильно и с течением времени кристаллизуется или обладает вяжущими свойствами при гидролизе, что используется в технической мелиорации пород [50].

По характеру сочетания кремнекислородных тетраэдров выделяется пять подклассов силикатов: *островные, кольцевые, цепочечные, каркасные и слоистые* (рис. 2.2).

Островные силикаты это силикаты с изолированными тетраэдрами $[\text{SiO}_4]^{4-}$ и изолированными группами тетраэдров: *орто-* и *диортосиликаты*. *Ортосиликаты* – это силикаты с изолированными кремнекислородными тетраэдрами (рис. 2.2, а) и *островные силикаты с добавочными анионами* O^{2-} , OH^{-} , F^{-} и др. Их радикал $[\text{SiO}_4]^{4-}$, так как каждый из четырёх атомов кислорода имеет одну валентность. Между собой тетраэдры непосредственно не связаны, связь происходит через катионы. *Диортосиликаты* – силикаты со сдвоенными тетраэдрами, которые отличаются обособленными парами кремнекислородных тетраэдров $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$, один из атомов кислорода у них общий (рис. 2.2, б), остальные связаны с катионами. К *ортосиликатам* относятся минералы группы оливина, циркона,

гранатов, фенакита и др. (без воды и добавочных анионов); группы топаза, андалузита, титанита и др. (с добавочными анионами F^{-} , O^{2-} , OH^{-}); к *диортосиликатам* – группы берtrandита, ильванита и др., к *ортодиортосиликатам* – группы везувиана, эпидота и др. [87].

Кольцевые силикаты имеют тип структуры, в которой группы не изолированы, а соединяются общими ионами кислорода в кольца. Характеризуются обособлением трёх, четырёх или шести групп кремнекислородных тетраэдров, образующих кроме простых колец (рис. 2.2, в, г) также и «двухэтажные». К простым группам относятся: группа волластонита $[\text{Si}_3\text{O}_9]^{6-}$, группа тарамеллита $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]^{8-}$, группы берилла, кордиерита $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$ и группа мьокрита $[\text{Si}_8\text{O}_{24}]^{12-}$. К двойным относятся группа эканита $[\text{Si}_8\text{O}_{20}]^{12-}$ и группа миларита $[\text{Si}_{12}\text{O}_{30}]^{12-}$.

Цепочечные силикаты представлены непрерывными цепочками кремнекислородных тетраэдров, соединённых вершинами типа $[\text{SiO}_3]^{2-}$ (рис. 2.2, д, е) или сдвоенными цепочками-лентами типа $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$ (рис. 2.2, ж). К ним принадлежат породообразующие минералы группы пироксенов, амфиболов и др.

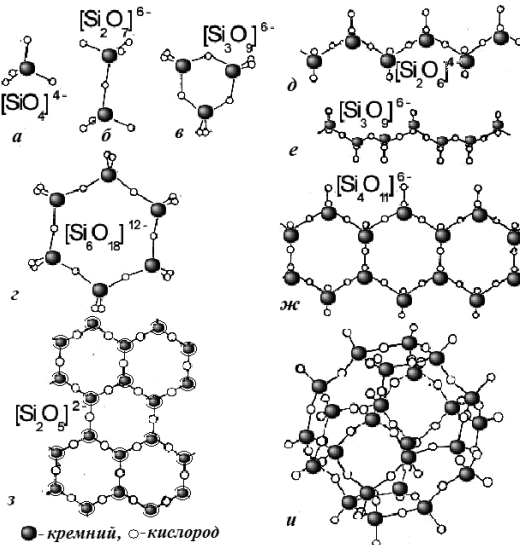


Рис. 2.2. Схемы расположения кремния и кислорода в силикатах: а – островные силикаты с изолированными кремнекислородными тетраэдрами; б – островные силикаты со сдвоенными кремнекислородными тетраэдрами; в, г – силикаты кольцевой структуры (кольцевые силикаты); д, е – силикаты с непрерывными цепочками из кремнекислородных тетраэдров (цепочечные силикаты); ж – силикаты с непрерывными обособленными поясами из кремнекислородных тетраэдров (цепочечные силикаты); з – силикаты с непрерывными слоями кремнекислородных тетраэдров (слоистые силикаты); и – каркас из кремнекислородных тетраэдров (каркасные силикаты) [87]

Пироксены формируются из магматического расплава основного состава и имеют простой химический состав. Кристаллизуются в моноклинной (клинопироксены), реже ромбической (ортопироксены) сингонии. Среди них различают щелочноземельные (диопсид, геденбергит, авгит) и щелочные разности (эгирин, жадеит, сподумен). Пироксены являются главными породообразующими минералами основных и ультраосновных, отчасти щелочных изверженных, реже метаморфических и контактово-метасоматических горных пород. Они распространены в породах габбровой группы и базальтах; общая доля их в земной коре достигает 6–8 % по массе.

Амфиболы, в отличие от пироксенов, обычно обогащены алюминием, имеют более сложный состав и в основе своей структуры содержат амфиболовые ленты. Различают моноклинные и более редкие ромбические амфиболы. Среди амфиболов наиболее распространены тремолит, актинолит и роговая обманка – это зеленые, бурые, черные игольчатые и волокнистые кристаллы. Их твердость 5...6,5; плотность 2,8...3,6 г/см³. Амфиболы также входят в состав многих магматических (от кислых до основных) и метаморфических пород, их общее количество в земной коре достигает 10 % (по массе).

Слоистые силикаты – это силикаты с непрерывными слоями кремнекислородных тетраэдров (рис. 2.2, з), обособленных друг от друга и связанных катионами. *Представители группы*: тальк, серпентин, хризотил-асбест, палыгорскит, слюды (мусковит, флогопит, биотит), гидрослюды (вермикулит, глауконит), хлориты (пеннит, клинохлор и др), минералы глин.

К этому подклассу относятся слюды групп: мусковита, биотита, вермикулита, талька и пиррофиллита, к титаносиликатам – астрофиллит, к ураносиликатам – склодовскит и др. В истинных слюдах (в отличие от дисперсных гидратированных слюд, относящихся к глинистым минералам) все межслоевые позиции заняты катионами. По химическому составу они делятся на диоктаэдрические и триоктаэдрические. В зависимости от особенностей диоктаэдрических слюд выделяются две группы: маложелезистых слюд, образующих изоморфный ряд от мусковита до лейкофиллита; железистых слюд – ряд селадонита. Среди триоктаэдрических породообразующими являются биотит и флогопит.

Каркасные силикаты – силикаты с непрерывными трёхмерными каркасами (рис. 2.2, и). В этом случае все атомы кислорода общие, такой каркас нейтрален, радикал $[\text{SiO}_2]^0$. Именно такой каркас отвечает структуре кварца, на этом основании его относят не к окислам, а к силикатам. Разнообразие каркасных силикатов объясняется тем, что в них присутствуют аллюмокислородные тетраэдры. Замена четырёхвалентного кремния на трехвалентный алюминий вызывает появление одной свободной валентности, что влечет за собой вхождение других катионов (например, калия и натрия). Обычно отношение алюминия к кремнию равно 1:3 или 1:1.

По составу тетраэдрических радикалов различаются простые силикаты с кремнекислородным радикалом и сложные, в которых вместе с кремнекислородным радикалом присутствуют тетраэдрические группы алюминия (алюмосиликаты), бериллия (берилло-силикаты), бора (боросиликаты), титана (титаносиликаты), циркония, урана и др. [87].

К группе кварца относится ряд кристаллических и аморфных модификаций кремнезема, образующихся при различных термодинамических условиях и являющихся самой распространенной группой породообразующих минералов. При высоких температурах (1715...1470 °C) кристаллизуется кристобалит, имеющий кубическую сингонию; при более низкой температуре (1470...870 °C) образуется тридимит, имеющий гексагональную сингонию; затем кристаллизуется высокотемпературный (при 870...573 °C) и низкотемпературный (при 573...100 °C) кварц, соответственно с гексагональной и тригональной сингонией. Различия в структурах обуславливают разную плотность кристаллических модификаций кремнезема: она наименьшая у кристобалита (2,20 г/см³), выше у тридимита (2,26...2,27 г/см³) и наибольшая у кварца (2,52...2,65 г/см³) [50].

2.1.1.2.1. Состав, строение и свойства глинистых минералов

Глинистые минералы – это гидратированные слоистые и слоисто-ленточные силикаты, образующиеся преимущественно в процессе химического выветривания или гидролиза горных пород, а также гидротермальным путем; отличающиеся от прочих слоистых силикатов высокой дисперсностью (размер частиц менее 1 мкм) и гидрофильностью, что обуславливает их специфические физико-химические свойства – сорбцию и ионный обмен [50].

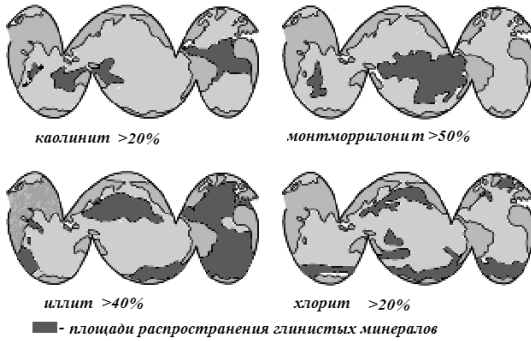


Рис. 2.3. Распространение глинистых минералов в океанах

Глины – самые распространенные породообразующие минералы верхней части земной коры, как на суше, так и в океанах (рис. 2.3), где их содержание по разным оценкам составляет до 40...50 % от общего состава пород. Разнообразие глинистых минералов обуславливает широкий спектр изменения их свойств, поэтому в грунтоведении уделяется большое внимание их изучению.

Благодаря наличию тонкодисперсных частиц с большой суммарной площадью поверхности и со значительной физико-химической активностью наиболее характерными признаками глинистых грунтов являются пластичность и связность. Разница между несвязными сыпучими грунтами и глинистыми состоит в том, что прочность первых определяется внутренним трением, зависящим от нормального давления, а в глинистых грунтах, кроме того, сцеплением, вызванным межчастичными молекулярными силами притяжения, поэтому глинистые грунты называют *связными грунтами*. Связные грунты обладают сопротивлением растяжению, определяемым, главным образом, их минеральным составом и влажностью.

В основе кристаллической структуры глинистых минералов лежат два базовых структурных элемента: кремнекислородные *тетраэдры* (SiO_4)⁴⁻ (рис. 2.4) и *октаэдры*, состоящие из атомов кислорода или гидроксильных групп, внутри которых в октаэдрической координации располагаются атомы алюминия, магния или железа (рис. 2.5).

Тетраэдр (рис. 2.4) представляет собой четырехгранник, имеющий 4 вершины, в которых находятся ионы кислорода, в центре – ионы кремния, которые в некоторых минералах изоморфно замещаются алюминием или другими ионами. Грани тетраэдра по своей форме близки к равносторонним треугольникам. Соединяясь в пространстве через общие вершины, в которых находится кислород, тетраэдры образуют двумерную гексагональную тетраэдрическую сетку, поскольку пустоты ее имеют довольно правильную форму шестигольников – гексагонов (рис. 2.4).

Вторым базовым элементом, который входит в кристаллические решетки глинистых минералов, является *октаэдр* – восьмугранник, имеющий 6 вершин. Грани октаэдров имеют форму равносторонних треугольников, в вершинах которых находятся гидроксильные группы и (или) ионы кислорода, в центре – различные катионы (рис. 2.5). Октаэдры, соединяясь в пространстве через 2 общие вершины, т. е. через общие ребра, также дают двумерную структуру – гексагональную октаэдрическую сетку. Октаэдрические слои являются вторым крупным блоком, входящим в структуру большинства глинистых минералов.

В октаэдрических слоях катионами могут быть заселены либо все центры октаэдров, либо только 2/3 из них, в отличие от прочих слоистых силикатов. Число населенных октаэдров на одну элементарную ячейку определяет принадлежность данной разновидности того или иного минерала к триоктаэдрической или диоктаэдрической структуре. При этом в диоктаэдрических структурах октаэдрическими катионами являются, как правило, катионы трехвалентных металлов (Al^{3+} , Fe^{3+}), а в триоктаэдрических – катионы двухвалент-

ных металлов Fe^{2+} , Mg^{+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} . В зависимости от состава катионов октаэдрические слои подразделяют:

- на слои, заполненные различными катионами;
- на гиббситовые слои, в которых $2/3$ катионного пространства заполнены катионами трехвалентных металлов, чаще всего Al^{3+} ;
- на бруситовые слои, в которых все катионное пространство заполнено катионами двухвалентных металлов, в основном Mg^{2+} (рис. 2.6).

В реальных структурах часто наблюдаются отклонения от идеализированных моделей тетраэдров и октаэдров, которые проявляются в том, что грани тетраэдров и октаэдров не всегда являются равносторонними треугольниками, а пустоты (как в тетраэдрической, так и в октаэдрической сетках) бывают деформированы и не имеют формы правильных шестиугольников. Кристаллические решетки многих глинистых минералов несут отрицательный заряд, возникающий за счет гетеровалентного изоморфизма в тетраэдрах и (или) октаэдрах. Заряд компенсируется катионами, находящимися в межпакетных позициях.

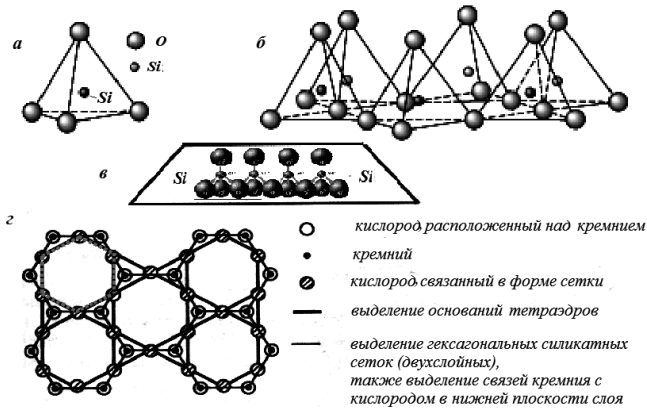


Рис. 2.4. Основные элементы тетраэдрической сетки:

a – кремнекислородный тетраэдр; *б* – слой тетраэдров; *в* – слой тетраэдров, изображенный схематично; *г* – вид сетки с гексагональными отверстиями в плане

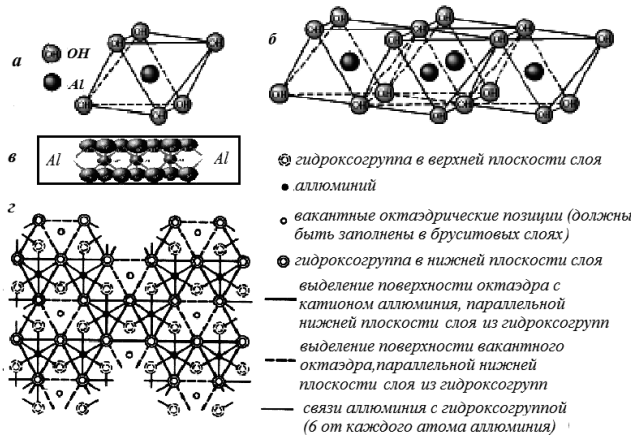


Рис. 2.5. Основные элементы октаэдрической сетки:

a – кремнекислородный октаэдр; *б* – слой октаэдров; *в* – схематично изображенный слой октаэдров; *г* – вид октаэдрической сетки в плане