Л.А. Ярг

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА И КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

91-3
7633
2

Л.А. Ярг

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА И КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

Москва "Недра" 1991

ББК 26.3
Я 71
УДК 551.3.053

Организация-спонсор Московский геологоразведочный институт им. Серго Орджоникидзе

Я 1804090000 – 213 / 043 (01) – 91 258–91

ISBN 5-247-02371-4

91–40895

1 1217

© Л.А. Ярг, 1991

ВВЕДЕНИЕ

Настоящей книгой автор преследует цель ознакомить читателя с современной методикой изучения выветрелых пород и процесса выветривания в инженерно-геологических целях. Генетический тип отложений, называемых элювиальными и залегающих в виде специфических геологических тел кор выветривания, обладает рядом характерных черт, предопределяющих специальную методику их изучения и особые требования к способам выполнения инженерно-геологических работ. Эти черты таковы.

1. Различные формы геологических тел и условия их залегания, обусловленные типом коры выветривания (площадная, линейная), нечеткость границ тел в латеральной плоскости.

2. В большинстве случаев весьма не выдержанное ни в латеральной плоскости, ни по мощности зональное строение кор выветривания, без четко выраженных резкостных геологических границ, с постепенным замещением одних горных пород другими, с иными составом, структурой, текстурой.

3. Постепенное "отмирание" генетических признаков материнской породы (субстрата) и накопление черт, присущих осадочным горным породам, формирующимся в приповерхностных термодинамических условиях. Они определяются физическими, химическими и биологическими взаимодействиями литосферы с внешними геооболочками и космосом. Генетические признаки охватывают весь комплекс черт, свойственных выветривающейся горной породе: гранулометрический состав, минеральный и химический состав, структуру, текстуру, трещиноватость, пористость, пустотность, показатели свойств.

4. Присутствие в пределах сравнительно небольшого по мощности интервала разреза горных пород полного спектра образований, от трещиноватой скальной породы до дисперсных глин, отличающихся степенью разуплотнения, дисперсностью и другими свойствами.

5. Изменение величины, конфигурации, пространственной структуры активных элементов толщи выветрелых грунтов от глыб до кристаллитов глин, их эффективных структурных связей (также вся гамма связей от кристаллизационных до механических и коагуляционных); изменение прочностных, деформационных и фильтрационных свойств грунтов, связанное с эффективной структурой.

Перечисленные черты выветрелых пород не только являются свидетельством большого разнообразия и сложности их освоения, но и объясняют, почему изучение этих пород требует особой методики, специфических комплексов методов.

До сих пор обсуждались вопросы изучения элювия, но ведь существует еще и геологический процесс, в результате

которого образуется элювий, - процесс выветривания горных пород. Он нередко протекает достаточно быстро, в течение периода времени, который соизмерим, а нередко значительно меньше периода амортизации сооружения.

Вследствие этого возникает проблема количественного прогноза процесса. Для прогноза нужны количественные данные о параметрах процесса, его скорости, интенсивности и др. Получение таких данных требует экспериментального изучения процесса выветривания, его механизма, условий, причин и представления этих факторов в виде численной информации. Изучением процесса занимаются в полевых и лабораторных условиях по специальным оригинальным методикам, рассматриваемым в книге.

Есть еще одно важное обстоятельство, делающее настоящую книгу весьма актуальной. Дело в том, что ни в нашей, ни в иностранной литературе более 30 лет не опубликовано ни одной монографии, посвященной инженерно-геологическому изучению выветрелых пород и процесса выветривания. Единственная брошюра "Методические указания по изучению процессов выветривания горных пород для инженерно-геологических целей" Н.В. Коломенского (1953 г.) давно стала библиографической редкостью. Отдельные научные статьи, посвященные выветрелым породам и время от времени публикуемые в специальных журналах и сборниках, не дают сколько-нибудь полного представления о современном состоянии методики их изучения. Вместе с тем теоретические разработки и методы исследования горных пород, в том числе элювиального происхождения, в 60-80-х годах бурно развивались. Появилось много новых полевых методов изучения горных пород и грунтов, не известных ранее (динамическое и статическое зондирование, вращательный срез, прессиометрия, экспрессные методы оценки прочности скальных пород и др.).

Большие успехи достигнуты в области лабораторных испытаний выветрелых пород (стенды, моделирующие сдвиги, стабилометры, приборы сжатия - растяжения и др.). Особого внимания заслуживают специальные методы моделирования процесса выветривания (вещественного и математического). К настоящему времени накоплен весьма большой опыт изучения кор выветривания в ходе инженерно-геологических изысканий для различных видов строительства. Этот опыт автор счел важным обобщить и представить в книге.

Автор с благодарностью примет замечания и пожелания читателей, которые будут способствовать совершенствованию дальнейшей работы по изучению процесса выветривания и выветрелых пород.

Глава 1

ПРОЦЕСС ВЫВЕТРИВАНИЯ И ЕГО ПРОДУКТ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Выветривание горных пород есть геологический процесс взаимодействия горных пород, слагающих приповерхностную часть земной коры, с атмосферой, биосферой, искусственными компонентами природной сферы, в результате которого изменяются: строение, состав, структурно-текстурные особенности и свойства горных пород, состав подземных вод и газов зоны гипергенеза.

К числу компонентов внешних сред, активно реагирующих с горными породами в процессе выветривания, относятся:

солнечное излучение, инсоляция;

атмосферные осадки, химический состав которых может варьировать в широких пределах;

кислород и углекислый газ атмосферы;

растительность, усиливающая агрессивность атмосферных осадков, проходящих через кроны деревьев;

почвы, увеличивающие pH инфильтрующихся вод за счет катионного обмена и CO_2 почвенного воздуха;

микроорганизмы, продуцирующие множество органических кислот, поступающих в поверхностные и почвенные воды;

зоны окисления сульфидных месторождений, являющихся источником агрессивных растворов;

промышленные предприятия, жидкие, твердые и газообразные отходы которых являются агрессивными или, реагируя с компонентами внешних сред, образуют агрессивные по отношению к горным породам соединения.

Перечисленные компоненты внешних сред называются агентами выветривания.

Характер и результаты воздействия агентов выветривания на горные породы определяются, во-первых, составом, структурно-текстурными особенностями и свойствами пород и, во-вторых, природными условиями, в которых происходит это воздействие. Главнейшими из таких условий являются:

климат;

рельеф;

растительный покров;

геологическое, тектоническое и геоморфологическое строение местности, сформировавшиеся в процессе истории геологического развития;

гидрогеологические условия;

деятельность человека.

Выветривание представляет собой сложную систему взаимодействующих и взаимообусловленных физических, химических, физико-химических, биохимических процессов - компонентов, совместное развитие которых в системе горная

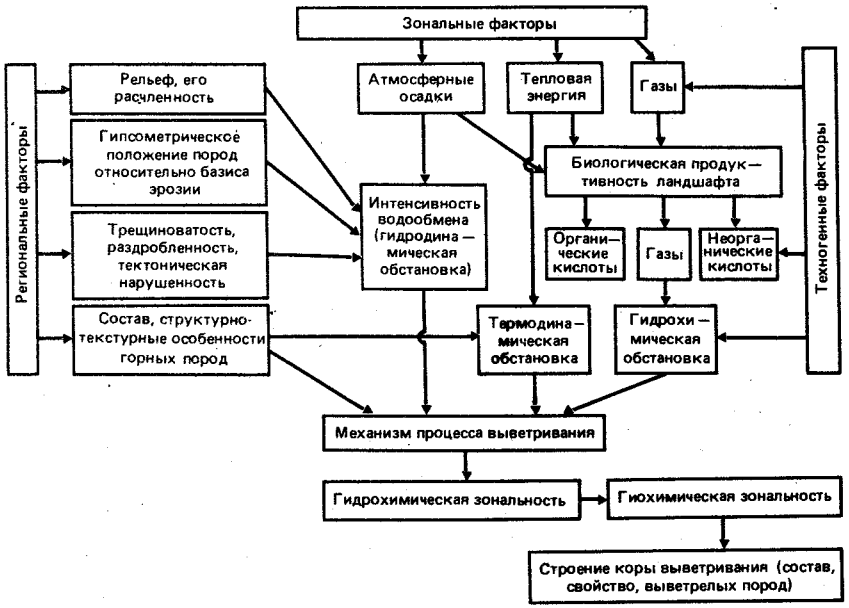


Рис. 1. Схема взаимодействия зональных, региональных и техногенных факторов при формировании коры выветривания

порода - вода - газ - органическое вещество следует рассматривать как единый геологический процесс.

Состав комплекса процессов - компонентов выветривания зависит от региональных, зональных и техногенных факторов (рис. 1), которые определяют механизм процесса выветривания, его интенсивность, скорость и степень развития.

Зональными факторами, прежде всего климатическими (биологическими), обусловлены не только механизм процесса выветривания, но и его особенности, проявляющиеся в различных климатических зонах земного шара. Это предопределяет существование широтной зональности кор выветривания, находящей отражение в закономерной смене различных температурно-влажностных классов (*TWK*) кор выветривания в широтном направлении, и вертикальной зональности, отражающей изменение климатических условий с ростом абсолютных отметок поверхности.

Азональными факторами следует считать техногенные, обусловленные деятельностью человека.

Зональные факторы (количество солнечной энергии, получаемой горными породами, количество и состав атмосферных осадков и зависящие от них биологическая продуктивность ландшафта и типы почв) определяют облик подземной атмосферы и гидрохимическую обстановку.

Взаимодействие литосферы с атмосферой, космосом и другими средами при выветривании реализуется в форме массо-энергообмена. Разница в количестве солнечной энергии и атмосферных осадков, поступающих на единицу площади в разных климатических зонах, является причиной различия температурных и влажностных условий в зоне гипергенеза, что существенно влияет на кинетику химических реакций и физических процессов.

Энергия внешних сред (главным образом солнечная) расходуется в процессе выветривания на увеличение удельной поверхности породы, разуплотнение, дезинтеграцию, изменения гранулометрического, минерального, химического состава пород, их структуры, текстуры, свойств.

Влияние лучистой энергии Солнца особенно сильно сказывается в верхней части зоны гипергенеза - в почвах, породах зоны аэрации и содержащихся в них природных водах. В тропиках температура горных пород в верхней части зоны гипергенеза достаточно выдержана (29-41 °С) и, как правило, выше среднегодовой температуры воздуха. В умеренных широтах температурный режим характеризуется нестабильностью, переходом температуры через нуль, длительным периодом отрицательного радиационного баланса. Исходя из правила Вант-Гоффа, скорость химических реакций в процессах выветривания должна различаться в различных районах в 10-100 раз.

В зоне гипергенеза полнота освоения тепловой энергии зависит от степени и режима атмосферного увлажнения. Основным источником воды для гипергенных процессов являются атмосферные осадки, обусловливающие сезонно-инфильтрационный водный режим.

Атмосферные осадки представляют собой многокомпонентный химический раствор, состав которого меняется в зависимости от естественных и искусственных факторов. Так, агрессивность их может многократно возрастать при взаимодействии с растительностью, минеральными, органическими, в том числе живыми, компонентами почв за счет обмена водорода в корневой системе. Ю.А. Бугельский считает, что в верхней части зоны гипергенеза pH вод может варьировать в широких пределах (от 2,7 до 8). Вследствие этого вода является равноправным партнером горных пород, взаимодействующих с ними в процессе выветривания. Она активно участвует в процессах дезинтеграции пород, разрушении минералов, миграции породообразующих элементов и минералообразований - процессах, взаимообусловленных и тесно связанных в пространстве и времени.

Среднегодовая температура воздуха и его влажность определяют биологическую продуктивность ландшафта (ц/га в год), колеблющуюся в разных зонах Земного шара в широких пределах: в арктической тундре - 9,5; кустарничковой тундре - 22,7; болотах Западной Сибири - 32; тайге - 70; саванне - до 1200; влажных тропических лесах - до 3250.

Органическое вещество является мощным источником углекислого газа, постоянно выделяющегося при различных биологических превращениях. Парциальное давление углекислого газа сложным образом взаимосвязано с масштабами минерализации органического вещества. В соответствии с углекислым балансом в атмосферу с 1 м^2 выделяется от 6 до 10 т/год CO_2, по А.А. Колодяжной. Парциальное давление CO_2 закономерно увеличивается с севера (1,54 МПа) на юг (4,23 МПа, район Индийского океана). Углекислый газ является одним из основных источников формирования агрессивных свойств подземных вод, поскольку при его растворении в воде образуется угольная кислота. Поглощая углекислоту, земные растения выделяют эквивалентное количество кислорода - потенциал задающего элемента в зоне гипергенеза. Большинство гипергенных процессов, в том числе и латеритизация, совершаются в окислительных условиях и связаны с большим потреблением кислорода. Таким образом, атмосферные осадки содержат большое количество растворенных газов (азота, кислорода, CO_2, инертных газов), которые, проникая вместе с водой в горные породы, в значительно степени определяют облик подземной атмосферы.

Выпавшие на поверхность земли атмосферные осадки инфильтруются в горные породы зоны аэрации через почвы. Несмотря на свою сравнительно небольшую мощность, почва представляет собой активнейшую "мембрану", при взаимодействии с веществом которой существенно изменяются состав и свойства проникающей через нее воды. Атмосферные осадки богатые кислородом окисляют, прежде всего, органическое вещество и обогащаются дополнительными порциями углекислого газа, что приводит к резкому увеличению парциального давления последнего. Одновременно часть органического вещества растворяется в подземных водах и обогащает их разными органическими кислотами (гуминовыми, фульво- и аминокислотами, муравьиной, щавелевой, уксусной, лимонной, янтарной и другими, а также продуктами их диссоциации). Гуминовые и фульвокислоты могут вызывать подкисление вод до pH 3-3,5. Среди других кислот, постоянно присутствующих в подземных водах, особая роль принадлежит угольной, понижающей в отдельных случаях pH до 4-4,5.

Можно утверждать, что в ходе сравнительно кратковременного взаимодействия выпавших атмосферных осадков с минеральными, биологическими, в том числе живыми, компонентами почвы (процессы растворения, окисления, выщелачивания) формируются существенно отличающиеся от атмосферных почвенные воды со своеобразными химическим составом и составом растворенных в них газов. Минерализация и агрессивность почвенных вод сильно варьируют в зависимости от климата, например: слабая минерализация и кислый состав вод характерны для гумидного; концентрация углекислых и

сульфатных солей кальция - для аридного и т.д. А.И. Перельман выявил, что по кислотно-щелочным условиям почвенные воды подразделяются на четыре основные группы.

Сильнокислые воды	pH<3
Кислые, слабокислые воды	pH 3-6,5
Нейтральные и слабощелочные	pH 6,5-8,7
Сильнощелочные воды	pH>8,5.

Таким образом, зональные факторы контролируют количество воды, поступающей в зону гипергенеза, ее температуру и химический состав, предопределяя гидрохимические особенности процесса формирования кор выветривания, его климатическую зональность.

С момента попадания атмосферных осадков в трещинно-поровое пространство и их взаимодействия с горными породами начинается гипергенное преобразование твердой фазы и одновременное изменение химического состава инфильтрующихся вод. Начальные этапы взаимодействия воды с горными породами характеризуются переходом в раствор породообразующих элементов в результате процессов выщелачивания, растворения, гидролиза, гидратации. Интенсивность выноса компонентов тесно связана с гидрохимическими условиями и интенсивностью водообмена, определяющей время взаимодействия воды с горными породами. Гидродинамическая обстановка контролируется в значительной степени региональными факторами и в первую очередь рельефом и степенью его расчлененности, гипсометрическим положением пород относительно базиса эрозии (геоморфологическими условиями), трещиноватостью, раздробленностью и тектонической нарушенностью пород (структурно-тектоническими условиями).

Породы субстрата в значительной степени определяют состав и строение продукта выветривания. Характер процесса выветривания контролируется не только валовым составом пород, но и их структурно-текстурными особенностями, а также особенностями кристаллохимического строения минералов. Переформирование одного и того же минерала может идти различными путями в зависимости от условий, в которых совершался процесс выветривания. Любой комбинации этих условий отвечает своя модификация процесса и, следовательно, определенный профиль коры выветривания, в котором количественное отношение и распределение минералов, характер пористости и трещиноватости, набор и отношение зон будут разными.

В ходе взаимодействия агентов выветривания с горными породами интенсивно развивается комплекс процессов-компонентов - механическое разрушение, химическое разложение пород субстрата, псевдоморфное замещение, метасоматоз, старение гелей, кристаллизация из коллоидных растворов и другие, приводящие к возникновению новой минеральной ассоциации, устойчивой в данной термодинамической (следова-

тельно, гидро- и геохимической) обстановке земной поверхности.

В.И. Вернадский отмечал, что "человечество на наших глазах становится мощной геологической силой". Это положение в настоящее время стало общепризнанным в связи с экологическими проблемами. Орудия и продукты человеческого труда рассматриваются как мощнейшие агенты процесса выветривания.

Широкое развитие промышленности приводит к формированию очагов накопления агрессивных компонентов в метеорных водах и атмосфере. Атмосфера загрязняется различными газовыми и дымовыми отходами, содержащими CO_2, SO_4^{2+}, Cl и т.д.; почвы, поверхностные и подземные воды - твердыми и жидкими отходами, стоками технических кислых вод. Источниками возникновения кислых вод являются шахты медноколчеданных, полиметаллических и угольных месторождений, месторождения, разрабатываемые методами выщелачивания, целлюлозно-бумажные комбинаты, химические кислотные заводы, коксохимические, газовые, нефтеперегонные, суперфосфатные, сахарные, крахмально-паточные и молочные заводы, фабрики, перерабатывающие сырье для текстильной промышленности, в составе которых содержатся серная, соляная, азотная, фтористо-водородная, уксусная, сахарная кислоты и множество других агрессивных компонентов. Выбрасываемые в атмосферу хлор, сернистый газ, фтор, сероводород и другие загрязняют воздух, создают ядра конденсации для формирования "кислых дождей".

Особенно низкие pH дождевых вод отмечаются в районах размещения крупных промышленных предприятий. По подсчетам специалистов американского агентства по охране окружающей среды, промышленными предприятиями и энергетическими объектами США выбрасывается в атмосферу 4 млн т диоксида серы. Поступая в воздушный бассейн над канадской территорией, он является причиной "кислых дождей", сделавших безжизненными 148 озер в провинции Онтарио. Промышленные объекты Англии выбрасывают только в осенне-зимний период около 150 тыс. т сернистых соединений, которые вместе с дождями выпадают на территорию Скандинавии. Таким образом, техногенный фактор оказывает огромное влияние на формирование агрессивных инфильтрующихся вод, и следовательно, на характер процесса выветривания горных пород.

Продуктом процесса выветривания являются элювиальные грунты, слагающие профиль коры выветривания. Формирование коры выветривания - сложный интегративный процесс, диалектически сочетающий конструктивное (формирование элювия) и деструктивное (разрушение материнских пород) начала. Он включает: разрушение и разложение исходного вещества материнских пород; частичный вынос и перераспределение минеральных (химических) компонентов, обусловливающих формирование зон выщелачивания и вмывания; взаимодействие

компонентов системы горная порода - раствор - биота - газ, результатом которого является синтез новых минералов (и в целом горных пород), проявляющийся в форме метасоматических замещений первичных минералов, формирования цемента, гранул, конкреций, блоков ("пряников") и в целом геологических тел, представленных различными литологическими разностями, находящимися между собой в строго фиксированных пространственных отношениях и составляющих определенный профиль коры выветривания.

В процессе выветривания отчетливо прослеживается действие закона материалистической диалектики - взаимного перехода количественных изменений в качественные. Он выражается в том, что постепенные количественные изменения в химическом и минеральном составе пород, степени и характере их разуплотнения, характере структурных связей приводят к формированию в профиле выветривания качественно различных в геохимическом, литолого-петрографическом и инженерно-геологическом отношении зон.

ЗОНАЛЬНОСТЬ СТРОЕНИЯ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

Строение и мощность кор выветривания определяются помимо региональных, зональных и техногенных факторов временем, в течение которого происходили выветривание, снос и аккумуляция продуктов выветривания.

Существуют два основных подхода к разделению коры выветривания на зоны - геохимический и инженерно-геологический. В основу первого положены геохимические критерии. Среди геологов и геохимиков наиболее широким признанием пользуется схема, предложенная И.И.Гинзбургом. Учитывая существенное влияние климатического фактора на процесс выветривания, многие авторы пытаются увязать с ним зональность строения коры выветривания (А.Г.Черняховский, 1974).

Схемы расчленения кор выветривания на зоны в инженерной геологии предложены Г.С. Золотаревым (1948, 1963, 1971), Н.В. Коломенским (1952), В.Б. Швецом (1970), Ю.Д. Матвеевым (1970), Э.А. Джавахишвили (1962), Г.К. Бондариком (1963), А.А. Скибой (1978), Л.А. Ярг (1974, 1985). Наиболее широко используемой в настоящее время является классификация Г.С. Золотарева (рис. 2).

В практике инженерно-геологических исследований для гидротехнического строительства применяется классификация пород коры выветривания, в основу которой положено представление о том, что нарушение первичной сохранности тесно связано с разуплотнением массива вследствие искусственных и естественных причин, развитием трещиноватости, структурной дезинтеграции, выщелачивания [15]. По степени дезинтеграции

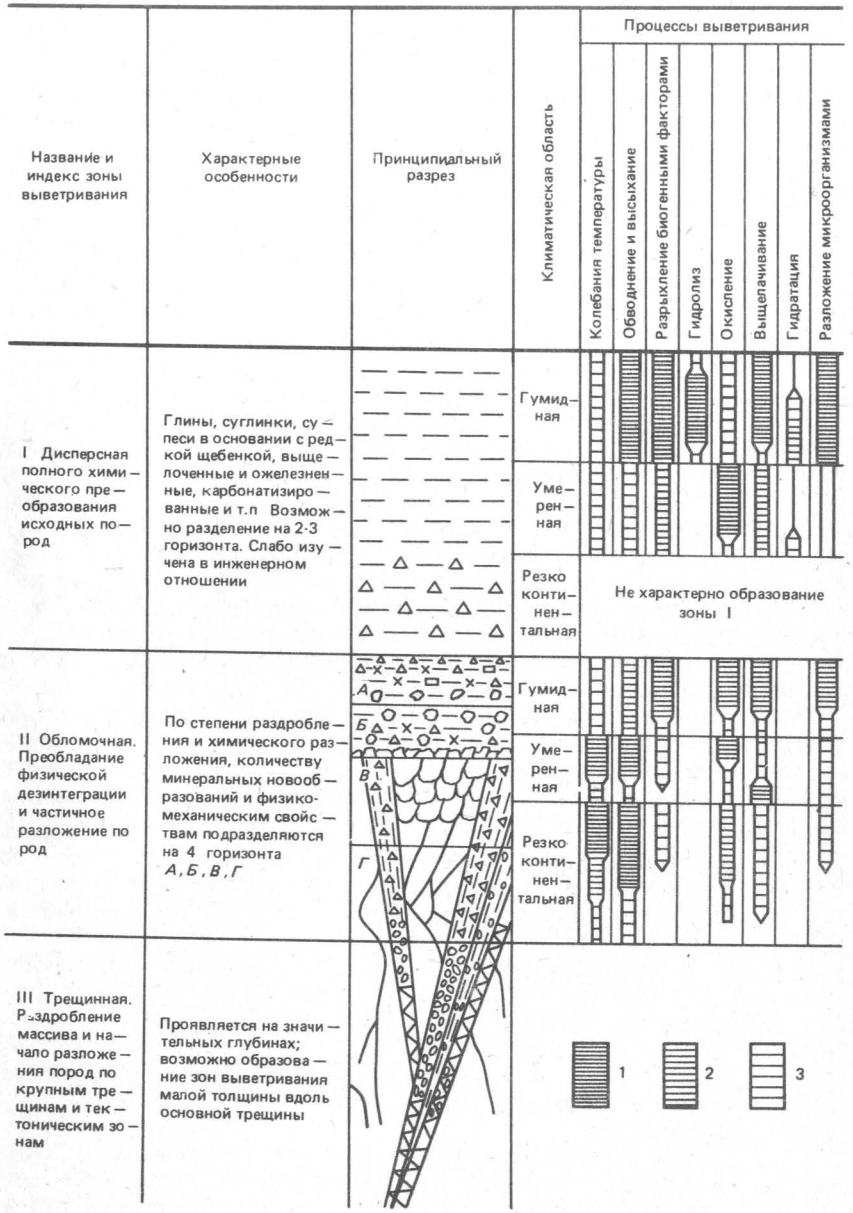


Рис. 2. Принципиальная схема инженерно-геологического расчленения коры выветривания (по Г.С. Золотареву, 1971).

Интенсивность действия процессов выветривания: *1* – значительная: *2* – средняя; *3* – слабая.

и изменения физико-механических свойств скальных пород в коре выветривания выделяют три зоны - *А, Б, В.*

Зона *А* - разрушенные сильно выветрелые и разуплотненные породы, характеризующиеся наличием большого числа разноориентированных трещин, которые частично или полностью выполнены рыхлыми продуктами выветривания или привнесенным мелкоземом. При легком ударе молотком порода рассыпается на мелкие обломки, щебень и плитки размером менее 10 см. Коэффициент выветрелости - отношение плотности образца выветрелой породы к плотности той же породы в невыветрелом состоянии - $K_{вс}$<0,8. Объемный коэффициент трещинной пустотности $K_{тп}$>5%. Породы поддаются разработке простыми механическими средствами без применения взрывчатых веществ и плохо укрепляются инъекцией. Они подлежат удалению в основании бетонных плотин и непригодны в качестве их противофильтрационных элементов. Зона *Б* - среднесохранные, отчасти выветрелые и разуплотненные массивы пород с отдельными расширенными трещинами, полностью или частично заполненными мелкоземом. По трещинам и зонам дробления наблюдается избирательное выветривание более интенсивное, чем в окружающей породе - $K_{вс}$ = 0,8-0,9; $K_{тп}$ = 2-5%. Скальные массивы этой зоны поддаются укреплению инъекцией, хотя, по экономическим соображениям, удаление их бывает выгоднее, чем укрепление. Полностью или частично породы этой зоны подлежат удалению, если по своим физико-механическим свойствам не удовлетворяют расчетным требованиям устойчивости или условиям напряженно-деформационного состояния сооружения.

Зона *В* - относительно сохранные, слабовыветрелые и разуплотненные массивы горных пород, отличающиеся избирательным выветриванием только вдоль тектонических трещин и зон дробления. $K_{вс}$ = 0,9-1; $K_{тп}$ = 1-2%. В основании плотин породы удалению не подлежат.

На основании анализа механизма процесса выветривания и закономерностей строения коры выветривания можно обосновать схему расчленения коры выветривания на зоны. Она разработана на базе схем расчленения коры выветривания на зоны, предложенных Н.В. Коломенским, Г.С. Золотаревым, но в отличие от них в основу разделения положены: механизм процесса, минеральный состав, характер эффективных структурных связей и структурных связей минерального уровня, структурно-текстурные особенности и физико-механические свойства пород. Использование перечисленных критериев обеспечивает расчленение кор выветривания на зоны, различающиеся в инженерно-геологическом отношении. Принципиальная схема зонного строения коры выветривания представлена в табл. 1. Схема отвечает полному профилю коры выветривания, формирующейся в условиях влажных тропиков (рис. 3). По мере движения к северу изменяется характер

Таблица 1

Принципиальная схема расчленения кор выветривания в инженерно-геологических целях (полный профиль)

Зона, подзона	Индекс зоны	Типоморфные минералы	Структурные связи		Структура	Текстура	Пустотность	
			минерального уровня	эффективные			поровая	трещинная
Зона вторичной цементации	V	Гематит, гётит, гиббсит	Цементационно-кристаллизационные	Цементационные	Бобовая	Нодулярная (каверзно-ячеистая)	Пузырчатая	
Кираса	V-б							
Структурный боксит	V-а							
Дисперсная зона	IV							
Латеритная	IV-б	Каолинит, гематит, гётит, гиббсит	Коагуляционно-цементационные		Коагуляционно-пластифицированная	Микротекстура – спутанно-волокнистая, беспорядочная	Межагрегатная, внутриагрегатная, межгранулярная, внутригранулярная	
Глинистая	IV-а	Охры, нонтронит, монтмориллонит (на ультраосновных), каолинит, гидрослюды (на кислых), монтмориллонит, гидрослюды (на основных)	Коагуляционные		То же	Микротекстура – блочно-беспорядочная	Межагрегатная, внутриагрегатная	
Зона литомаржа	III	Первичные минералы, вторичные глинистые (преимущественно гидрослюды), гидрохлориты, гидрооксиды железа	Смешанные (коагуляционно-кристаллизационные)	Коагуляционные, кристаллизационные	Реликтовая, псевдоморфная	Макротекстура – реликтовая, микротекстура – мозаичная	Межкристаллическая, межгранулярная, пористость выщелачивания	Микротрещины выветривания, обусловленные процессом выщелачивания
Обломочная зона	II							
Щебнистая	II-б	Первичные минералы; глинистые в составе заполнителя, гидроксиды железа	Кристаллизационные	Механические, коагуляционные	Крупно-, средне-, мелко-, разнощебневая; щебнисто-дресвяная	Щебнисто-дресвяная, листоватая, чешуйчатая	Межкристаллическая, межгранулярная	Литогенетическая, тектоническая экзогенная (разуплотнения, выветривания), раскрытия
Глыбовая	II-а	Первичные минералы, вторичные растворимые минералы (карбонаты, гипс и др.), гидроксиды железа (только по поверхности трещин)	Кристаллизационные	Механические	Исходных пород	Определяется формой первичной отдельности (столбчатая, плитообразная, матрацевидная и др.)	Межкристаллическая	
Трещинная зона	I	Первичные минералы	Кристаллизационные	Кристаллизационные, механические	Исходных пород	Исходных пород	Межкристаллическая	Литогенстическая, тектоническая, раскрытая за счет разгрузки
Невыветрелые породы	0	Первичные минералы	Кристаллизационные		Исходных пород	Исходных пород (массивная, слоистая, ленточная, шаровая, сланцевая и др.)	Межкристаллическая (межзерновая)	Литогенетическая тектоническая, преимущественно закрытая

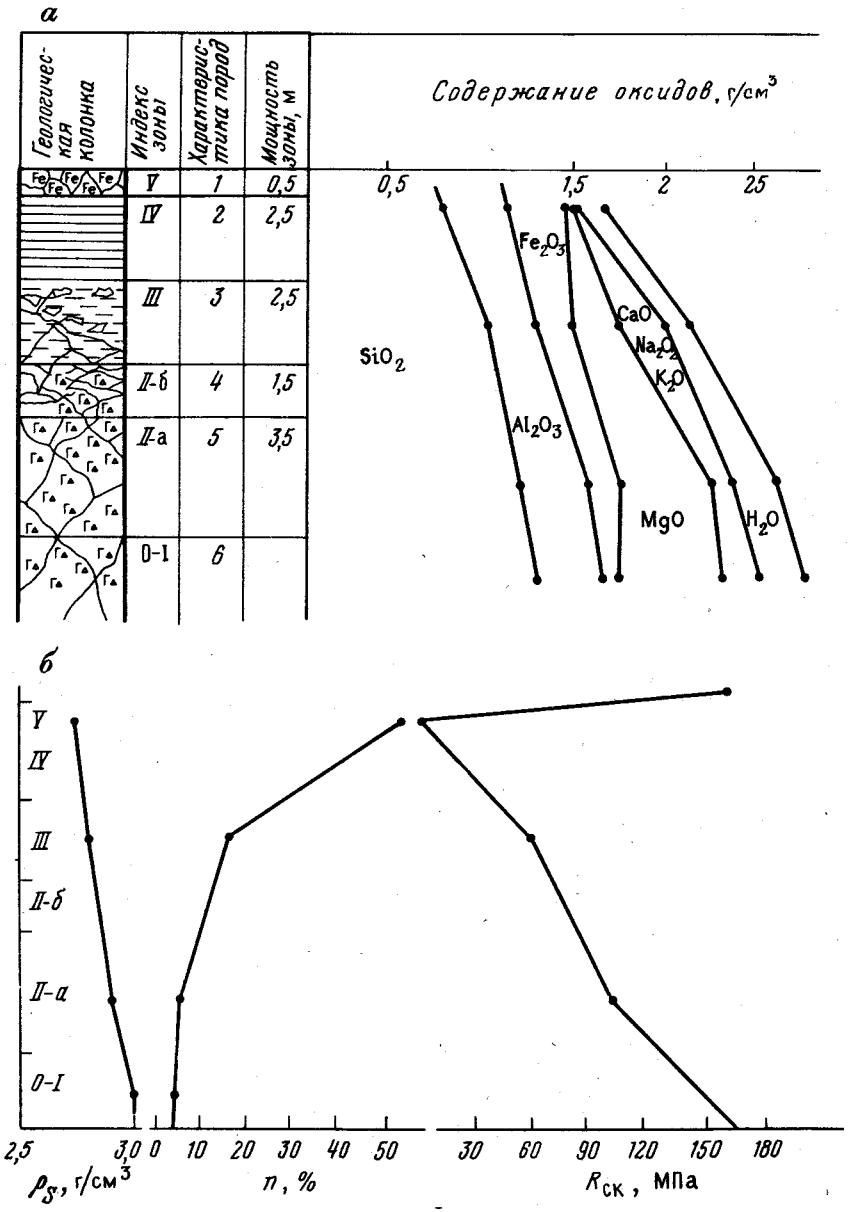


Рис. 3. Строение, изменение состава (*а*) и свойств (*б*) коры выветривания базальтовых порфиритов Вьетнама:

1 – кавернозная порода, сцементированная гидроксидами железа; *2* – пестроокрашенные каолиновые глины красного, коричневого, темного цвета, пластичные жирные, макропористые с червеобразными включениями оксидов железа; *3* – щебень эффузивов (размером 2–8 см) разобщен глинистым заполнителем (до 40 %), минеральный состав изменен, порода пропитана гидроксидами железа; текстура материнских пород сохранена; *4* – щебень эффузивов более крупного размера, с глинистым заполнителем до 15 %; *5* – порода со структурно-текстурными особенностями субстрата, разбита трещинами выветривания; *6* – базальтовый порфирит, темно-серый почти черный

процесса и происходит усечение (сверху) зон (подзон) современной коры выветривания. Так, в частности, на территории СССР в профиле современной коры выветривания полностью отсутствует зона У и подзона IV-Б; подзона IV-А характерна для южных районов страны (см. табл. 1). Зона III в полярных районах вырождается; там коры выветривания представлены подзонами II-А и II-Б. Древние коры выветривания могут иметь полный профиль.

ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЕ КЛАССЫ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ И МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА

Прогноз экзогенных геологических процессов (ЭГП) - одна из важнейших проблем современной инженерной геологии. Актуальность ее решения все больше увеличивается с ростом интенсивности хозяйственного освоения территории. Кроме того, прогнозирование экзогенных геологических процессов способствует решению глобальной проблемы - охраны окружающей среды и рационального использования земных недр. Освоение территории без учета закономерностей развития экзогенных геологических процессов может вызвать и вызывает отрицательные и даже катастрофические последствия.

Разработка прогноза требует изучения механизма процесса, т.е. исследования его характера, интенсивности и режима, предопределяемого взаимодействием геологической среды с внешними средами. Свойства внешних сред обусловлены широтной и высотной климатической зональностью. Различия температурно-влажностного режима литосферы (количества солнечной энергии и влаги, поступающей на единицу земной поверхности) и соответствующие им типы почв и биоценозов определяют различия механизмов.

Черты процесса выветривания и строение его продукта - коры выветривания - обусловлены зональными, региональными и техногенными факторами. Они определяют характер, тенденции и конкретный механизм процесса на некотором конечном этапе его неустановившейся стадии, за пределами которого процесс

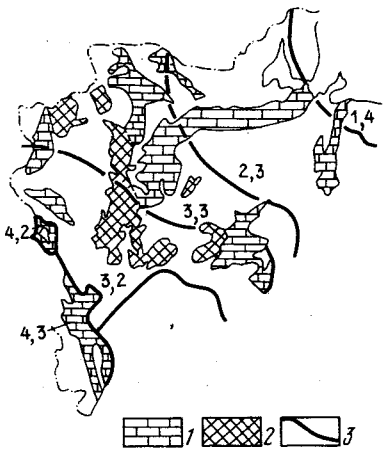


Рис. 4. Схематическая карта *TWK* кор выветривания карбонатных пород европейской части СССР:

1 – известняки, доломиты, промежуточные разности; *2* – мел; *3* – граница *TWK*. Цифры на рисунке – индекс *TWK*

переходит в стадию относительной стабилизации. Зональные факторы предопределены широтной климатической зональностью Земного шара, обусловливают формирование в пределах климатической зоны общих черт строения кор выветривания различных исходных пород. Это обстоятельство дает автору основание предложить понятие "тепловлажностный" (климатический) тип коры выветривания, под которым следует понимать присущее данной климатической зоне Земного шара типовое строение коры выветривания, определяемое набором, последовательностью смены по разрезу и мощностью зон коры выветривания [27].

Климатический тип коры выветривания по значению отношения количества атмосферных осадков к величине испарения целесообразно разделить на температурно-влажностные классы (*TWK*). Температурно-влажностный класс коры выветривания представляет собой семейство кор выветривания, формирующееся в условиях определенного температурного и влажностного режимов приповерхностной части некоторой области литосферы и отвечающих им типов почв и биоценов.

Температурно-влажностный класс коры выветривания в зависимости от региональных факторов, прежде всего состава субстрата, можно разделить на подклассы, сформировавшиеся на магматических, осадочных и метаморфических породах.

Проиллюстрируем рассмотренную классификацию примером карбонатных пород европейской части СССР. На базе Карты климатического районирования СССР под редакцией Б.П. Алисова можно выделить 7 областей (рис. 4), в пределах которых механизмы гипергенных процессов, развивающихся в карбонатных породах, должны существенно отличаться один от другого. Основные зонально-климатические характеристики выделенных областей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные типы климатических зон в пределах европейской части СССР

Климатический пояс	Характеристика теплового режима, сумма температур выше 10°С, °С	Код *TWK* при условии увлажнения			
		Сухо, $\frac{3}{10}$	Недостаточно влажно, $\frac{1-3}{10-50}$	Влажно, $\frac{0,45-1}{50-200}$	Избыточно влажно, $\frac{0,45}{200-800}$
Субарктический	Холодно, менее 1000	1.1	1.2	1.3	1.4
Умеренный	Умеренно холодно, 1000–2000	–	2.2	–	–
	Тепло, 2200–4400	–	3.2	3.3	–
Субтропический	Очень тепло, более 4400	–	4.2	4.3	–

Примечание. В числителе – индекс сухости, в знаменателе – средний годовой сток.

Температурно-влажностный класс экзогенных геологических процессов *TWK* 1.1-1.4 характерен для северных районов европейской части: северо-востока Русской равнины, северного Тимана и Пайхоя.

Механизм процесса выветривания и выщелачивания карбонатных пород в субарктическом климате при избыточном увлажнении можно выразить неравенством:

$$P_{сц} < P_{t_2} + P_р^л + P_р^{пл}, \qquad (1)$$

где $P_{сц}$ - локальная прочность известняков, P_{t_2} - объемно-градиентное напряжение, $P_р^л$ - расклинивающее действие льда, $P_р^{пл}$ - расклинивающее действие пленок воды.

В районах с дефицитом влаги механизм процесса обусловлен объемно-градиентными напряжениями, возникающими при замерзании и нагревании, и может быть выражен неравенством в виде: $P_{сц} > P_{t_2}$.

Как показали эксперименты В.М. Кувшинникова, определяющую роль в механизме разрушения карбонатных пород играет расклинивающее действие льда [28]. Так, морозостойкость сухих известняков в 1,5-2 раза выше водонасыщенных. Существенное влияние на морозостойкость оказывают пористость и степень заполнения пор водой. Для очень плотных разностей пород с пористостью 3-5% расклинивающее действие льда, как правило, ниже локальной прочности пород. При пористости от 15 до 33% морозостойкость сухих известняков в 1,25-1,5 раза выше, чем водонасыщенных. Графики зависимости коэффициента морозостойкости от пористости приведены на рис. 5.

TWK 2.2, 3.2 и 3.3 характерны для центральных районов

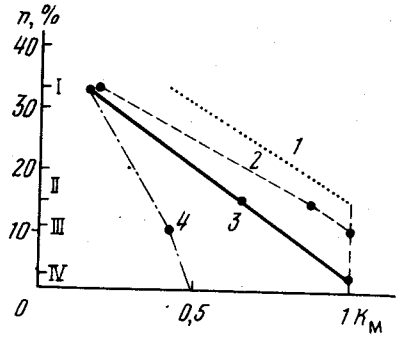


Рис. 5. Изменение коэффициента морозостойкости $K_м$ карбонатных пород в зависимости от исходной пористости n при различных условиях эксперимента при скорости инфильтрации 6 мл/мин (по В.М. Кувшинникову):

1 – 20 циклов замораживания-оттаивания (N), pH 7; *2* – $N = 25$, pH 7; *3* – $N = 50$, pH 7; *4* – $N = 20$, pH 3,1; I – доломит; II – известняк, $n = 15$ %; III – известняк, $n = 11$ %; IV – известняк, $n = 3$ %

европейской части и включают западное крыло Московской синеклизы, южную часть Тиманского поднятия, Силурийское плато, Латвийскую седловину, южную часть Воронежской и Белорусскую антеклизу, Вятский и Окско-Цнинский валы, Токмовский, Жигулевский, Пугачевский и Волго-Уральский своды.

В условиях этих гидротермодинамических систем криогидратационный механизм разрушения усиливает химическое взаимодействие в карбонатных породах. Вследствие интенсификации процесса растворения вынос вещества возрастает на 10-20%. Механизм процессов выветривания и выщелачивания в условиях умеренного климата можно выразить неравенством:

$$P_{сц} < P_{t_2} + P_р^л + P_р^{пл} + P^р, \qquad (2)$$

где $P^р$ – снижение прочности, обусловленное разгрузкой напряженного состояния вокруг пор, пустот и микротрещин, формирующихся вследствие процессов растворения.

В условиях нейтральной среды процессы растворения и выщелачивания известняков протекают крайне медленно, с увеличением пористости на 7-33% и развитием карстовых форм внутри массива без остаточного продукта на поверхности. На глинистых доломитах происходит раскрытие трещин, формирование пустот, распад на более мелкие обломки размером от 1 см до единичных зерен (0,1 мм), вымывание глинистых минералов, входящих в структуру пород, разрушение соответственно кристаллизационно-цементационных структурных связей и обособление свободных зерен доломита. В результате формируется остаточный продукт процессов выветривания и выщелачивания: карбонатный дресвяно-глинистый материал с вторичными цементационными связями.

Вследствие совместного воздействия физико-химических процессов прочность известняков может снижаться в 2,3-2,6 раза, доломитов в 6,6 раза.

TWK 4.2-4.3 характерен для южных районов европейской части СССР и включает Южный берег Крыма, Черноморское

побережье Кавказа, Колхидскую и Ленкоранскую низменности, Алазанскую долину и Куро-Араксинскую низменность.

Механизмы процессов выветривания и выщелачивания в субтропическом климате при избыточном увлажнении можно выразить неравенством $P_{сц} < P^р + P_{t_2}$.

В основе механизма разрушения карбонатных пород лежит процесс их растворения, многократно усиливающийся вследствие более высокого по сравнению с другими климатическими зонами температурного фона, протекающий в кислых средах, возникающих при разложении растительности и бактериологической деятельности. При этом интенсивность процессов растворения и соответственно карстообразования может возрастать в 100 раз по сравнению с нейтральными средами.

Состав конечного продукта карбонатных пород существенно зависит от количества глинистого вещества и нерастворимых примесей в составе субстрата, структурно-текстурных особенностей пород, степени их трещиноватости, величины пористости, геометрии порового пространства. Результатом процесса выщелачивания являются карбонатизированный дресвяно-дисперсный материал в доломитах и карстовые формы – в известняках.

Скорость выщелачивания карбонатных пород многократно возрастает вследствие техногенных воздействий. В зависимости от характера, вида и масштаба техногенного загрязнения существенно изменяется и механизм процесса.

Четкая зависимость состава и свойств выветрелых пород от характера гидрогеохимических, гидро- и термодинамических обстановок прослеживается не только в широтном плане, но и по высоте, в зависимости от абсолютных отметок рельефа.

ГЛАВА 2

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ИЗЫСКАНИЙ

В ходе инженерно-геологических исследований, проводимых в районах распространения выветрелых пород, а также в районах интенсивного протекания процесса выветривания вскрытых пород, приходится решать некоторые задачи, характер которых определяется теми вопросами, на которые предстоит ответить проектировщику. Основные из этих задач, решаемых при планировании, проектировании и строительстве сооружений, сформулированы ниже.

ТЭО	1. Установление закономерностей распространения кор выветривания, их типов (площадных, линейных), строения, мощности, возраста. 2. Разработка региональной схемы расчленения коры выветривания. 3. Выявление свойств выветрелых пород в целом, с полнотой, достаточно обеспечивающей инженерно-геологическую оценку территории. 4. Оценка современных тенденций процесса выветривания горных пород, распространенных в пределах изучаемого района. 5. Выявление приуроченности оползней, обвалов, осов, курумов к зонам выветривания. 6. Установление возможности использования выветрелых пород в качестве строительных материалов (при возведении дамб, плотин, насыпей)
ПРОЕКТ	1. Сравнительная оценка распространения выветрелых пород на перспективных для строительства участках территории в пределах изучасмого района; сравнительная оценка типов, строения и мощности выветрелых пород, приближенная оценка их свойств. 2. Выявление закономерностей распространения выветрелых пород на выбранном участке, установление пространственной изменчивости их мощности. 3. Расчленение коры выветривания на зоны. 4. Оценка показателей состава и свойств пород в пределах выделенных зон с точностью и доверительной вероятностью, обеспечивающей проведение предварительных расчетов оснований (обоснование компоновочного решения). 5. Предварительная оценка тенденции современного процесса выветривания горных пород в пределах выбранной площадки (скорость, интенсивность, изменения свойств). 6. Оценка пород разной степени выветрелости в отношении сопротивления их эрозионному и абразионному размыву, развитию выщелачивания и карста, осыпанию, оплыванию, устойчивости в обнаженных откосах и склонах.
Рабочая документация	1. Детальное расчленение коры выветривания в пределах будущей сферы взаимодействия проектируемого сооружения. 2. Оценка показателей свойств грунтов каждой зоны выветривания с точностью и доверительной вероятностью, достаточной для окончательных расчетов основания сооружения и разработки проекта строительных работ. 3. Количественный пространственно-временной прогноз процесса выветривания пород в период строительства и эксплуатации сооружений. 4. Определение глубины съема в основании сооружений и мощности защитного целика. 5. Выбор мер по укреплению методами анкерования , технической мелиорации и др. 6. Оценка эффективности мероприятий, направленных на предохранение пород от процесса выветривания. 7. Определение эффективных способов их разработки в котлованах и карьерах.
Строительство и эксплуатация сооружений	1. Проверка соответствия фактических (полученных в строительных выемках, опытно-эксплуатационных штольнях) и проектных данных о строении и свойствах пород коры выветривания. 2. Проверка достоверности прогноза процесса выветривания по фактической инженерно-геологической информации и его корректировка.

Анализ задач показывает, что при планировании строительства и в начале проектирования основные аспекты изучения выветрелых пород заключаются в установлении закономерностей их распространения и пространственной изменчивости их мощности и свойств. На последующих этапах проектирования они перемещаются в плоскость пространственного, а затем временного прогноза скорости процесса и интенсивности изменения свойств пород. Изменение характера задачи предопределяет изменение методики изучения выветрелых пород на разных этапах деятельности, применение различных методов.

ТЭО	1. Сбор, обработка и анализ накопленной информации о выветрелых породах и процессе выветривания. 2. Среднемасштабная инженерно-геологическая съемка с элементами специального изучения выветрелых пород. Съемка включает следующие методы: наземные наблюдения, геофизические исследования, проведение горных и буровых работ, опробование, лабораторные работы.
Проект	1. Сбор, обработка и анализ накопленной информации о процессе выветривания и корах выветривания. 2. Крупномасштабная (1:50 000 - 1:25 000) специальная инженерно-геологическая съемка территории конкурирующих вариантов (наземные наблюдения, геофизические исследования, опробования и лабораторные работы). 3. Детальная инженерно-геологическая съемка (1:10 000 и крупнее) специального назначения выбранной строительной площадки, включающая наряду с другими методами определения состава и свойств пород полевыми методами проведение режимных наблюдений за процессом выветривания горных пород.
Рабочая документация	1. Детальная инженерно-геологическая разведка мест размещения сооружений, включающая горные и буровые работы, полевые исследования выветрелых пород, с целью оценки их прочностных, деформационных и фильтрационных характеристик по зонам. 2. Режимные наблюдения за процессом выветривания одним или несколькими методами. 3. Лабораторное моделирование процесса выветривания.
Строительство сооружений	1. Инженерно-геологическая документация выветрелых пород, вскрытых строительными выемками. 2. Позонное опробование выветрелых пород с целью определения расчетных показателей свойств. 3. Наблюдения за скоростью процесса выветривания. 4. Лабораторное моделирование процесса выветривания (с целью прогноза техногенных воздействий, оценка условий разработки глубоких горизонтов, месторождений полезных ископаемых и др.).

За прошедшие 30 лет знания в области изучения процессов выветривания весьма расширились, а применение новых методов исследований помогает более глубоко исследовать сам процесс выветривания и его продукт, позволяя получить более объективные данные, необходимые для решения разнообразных инженерно-геологических вопросов, в том числе для разработки прогноза процесса. Любое изучение процесса и кор выве-

ривания, выполненное в районах инженерно-геологических работ, предусматривает сбор, обобщение и анализ накопленной геологической информации. Главная цель анализа геологических данных состоит в разработке рабочей гипотезы о процессе и коре выветривания и в обосновании программы дальнейших исследований. Накопленная информация включает данные геологических (инженерно-геологических) съемок, картировочного и разведочного бурения, других геологических и инженерно-геологических данных.

Наряду с данными общего геологического характера информация должна содержать сведения: о глубине залегания, мощности, составе и свойствах коры выветривания в целом и отдельных зон; о материнских породах, их возрасте, минеральном составе, структурно-текстурных особенностях, условиях залегания, степени метаморфизма и раздробленности, наличии рудной минерализации и органики; гидрогеологического характера (о мощности зоны аэрации, глубине залегания грунтовых вод и колебания уровня, высоте капиллярного поднятия, химическом составе, направлении и скорости движения). Собранные сведения заносят в журнал или на перфокарту.

Наряду с геологической информацией необходимо произвести сбор данных о метеорологических условиях района. Эти данные необходимы для:

оценки процесса выветривания;

составления программы проведения опытных работ;

разработки программы работ по моделированию процесса и др.

Следует собрать и систематизировать среднемесячные данные (за два-три десятилетия) о следующих параметрах:

количестве атмосферных осадков в жидком и твердом виде с указаниями ливневого максимума и распределениях по месяцам года;

температуре воздуха - максимальных, минимальных величинах и среднемесячных;

влажности воздуха - абсолютной, минимальной, дефиците влажности;

направлении и силе ветра (роза ветров, с учетом микроусловий);

глубине сезонного промерзания-оттаивания и мощности снежного покрова, если таковые имеют место;

химическом составе и pH атмосферных вод (снега);

типах почв и pH почвенных вод;

источниках техногенных воздействий, типах, масштабах и характере загрязнений.

В составе работ по изучению выветрелых пород входят: наземные наблюдения, геофизические исследования, горные и буровые работы, опробование, определение состава и свойств пород полевыми и лабораторными методами, камеральная обработка.

Изучение пород, ведущееся в ходе наземных наблюдений, документации горных и буровых выработок, при отборе образцов пород, в процессе полевых и лабораторных испытаний ставит своей целью предварительное визуальное расчленение коры выветривания на зоны - *трещинную, обломочную (глыбовую и щебнистую), литомаржа, дисперсную, вторичной цементации* (кирасу), получение данных о строении каждой из выделенных зон, изменении минерального состава, структурно-текстурных особенностей, структурных связей и свойств пород, слагающих кору выветривания по ее профилю и простиранию.

НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Наземные визуальные геологические наблюдения чрезвычайно информативны и включают изучение выветрелых (и невыветрелых) пород, вскрытых естественными и искусственными обнажениями (котлованами, выемками, траншеями, карьерами, шахтами, штольнями). В ходе наблюдений документируют:

геоморфологический облик территории и ее морфологическую структуру (расчлененность), определяющие условия формирования, развитие и сохранность кор выветривания;

условия залегания, состав и свойства, структурно-текстурные особенности выветрелых пород и субстрата;

геологическое строение коры выветривания, позволяющее установить важную для инженерно-геологической оценки данной системы - зональность строения;

тектоническое строение - структуру, складчатость и элементы залегания пород, тектонические нарушения, сбросы, зоны дробления, брекчирования, сланцеватость, трещиноватость - факторы, существенно влияющие на интенсивность процесса выветривания; особое внимание следует уделять местам пересечения зон крупных тектонических нарушений, вдоль которых, как правило, развиты линейные коры выветривания;

гидрогеологические и, в частности, гидрохимические условия, существенно влияющие на направленность процесса выветривания.

Сложные процессы-компоненты выветривания, накладывающиеся друг на друга, всегда приводят к более или менее существенному изменению внешнего облика горной породы: в одних случаях едва заметному, в других - весьма существенному, вследствие которого порода становится неузнаваемой. Каждый процесс-компонент выветривания оставляет на внешнем облике породы свой отпечаток, по которому представляется возможным не только индицировать процесс, но и в ряде случаев приближенно оценить его интенсивность и некоторые характеристики. Поэтому описание горных пород при изучении процессов выветривания должно быть особенно детальным и всесторонним.

К наиболее существенным внешним признакам выветривания пород, подлежащих описанию, в первую очередь можно отнести следующие: 1) цвет породы (в сухом и влажном состоянии); 2) степень и характер раздробленности (дезинтеграции); 3) минеральный состав; 4) структуру и текстуру породы; 5) характер и степень ее трещиноватости; 6) влажность; 7) механическую прочность.

Цвет породы. Изменение состава пород и образование новых минералов отражается на окраске, придавая ей иные оттенки. Поэтому при описании пород коры выветривания следует обращать внимание на их цвет. При описании цвета фиксируют изменение цвета породы по глубине, начиная от дневной поверхности; приуроченность того или иного цвета к отдельным прослоям; наличие желтых, красных пятен и подтеков; окраску влажной и сухой поверхности и внутренней части. Описание цвета сопровождается зарисовками и фотографированием на цветную пленку.

Для дисперсной зоны древних кор выветривания ряда месторождений Южного Урала характерны определенные цвета, зависящие от состава субстрата: зеленоватые - для диабазов, белые - для гранодиоритов, пестроцветные - красно-желто-белые - для кварц-хлорит-серицитовых сланцев. Это может явиться диагностическим признаком состава исходных пород при крутопадающем их залегании.

Раздробленность пород. Процесс выветривания приводит к нарушению монолитности породы и ее дезинтеграции. Сетью трещин порода разбита на блоки, обломки и куски, дресву и отдельные минеральные зерна. Трещины, разбивающие породы, или возникают вновь, вследствие неравномерных напряжений, или представляют собой трещины иного происхождения (тектонические, напластования, кливажа и т.п.), ранее существовавшие в невыветрелой породе и раскрытые в процессе выветривания.

Степень раздробленности выветрелых пород, более или менее быстро уменьшающаяся с удалением от дневной поверхности, в значительной степени определяет прочностные свойства пород в массиве и поэтому должна тщательно документироваться. Степень раздробленности пород - основа визуального выделения зон и подзон выветривания - трещинной, глыбовой, щебнистой, дисперсной.

Основными признаками являются при этом размер и форма обломков и блоков, на которые разбита порода, и характер ее трещин. Поэтому при изучении степени раздробленности породы детально описывают как слагающие породу обломки, так и разбивающие ее трещины с указанием их генезиса. При описании глыбовой и щебнистой зон необходимо указать форму и размер отдельностей, степень их выветрелости в куске, количество и состав заполнителя, степень ожелезнения (налеты, пленки, проникновение по всему объему породы).

При изучении разрезов выветрелых пород большое внимание должно уделяться трещиноватости, поскольку трещины являются границами активных элементов, на контакте которых происходят, во-первых, взаимодействие твердой и жидкой фаз и, во-вторых, взаимное перемещение при механических взаимодействиях, обусловливающих деформирование и устойчивость пород в массиве. Водопроницаемость и блочность горных пород зависят от их трещиноватости.

При описании трещин устанавливают их происхождение, выделяя трещины, вновь возникшие при выветривании и ранее существовавшие. Измеряют их элементы ориентировки - падение и простирание. При изучении трещин фиксируют форму, длину, ширину, густоту, изменение ширины трещин с глубиной, характер заполнителя и его состав. Описывают характер поверхности стенок - гладкая, шероховатая, глянцевая и т.п; налеты на поверхности стенок - железистые, известковые и т.д; указывают расположение отдельных компонентов заполнителя (например кристаллов гипса, кальцита). Особое внимание уделяют выявлению и описанию отложения на стенках трещин, являющегося косвенным признаком проникновения выветривания и позволяющего установить границу распространения трещинной зоны. Существование скрытых и волосных (закрытых) трещин устанавливают путем разламывания кусков породы, постукиванием по куску молотком или методом прокрашивания в лабораторных условиях.

Типичные участки трещиноватости фотографируются. Следует обращать внимание не только на распределение трещин, но и на другие формы пустот - каверны, жеоды, каналы, поры, отмечая их взаимное расположение, размеры, конфигурацию, приуроченность к породам, включения. По данным измерения параметров трещиноватости подсчитывают среднюю ширину трещин, среднее расстояние между трещинами, определяют модуль трещиноватости.

Преобразования минерального состава пород, изменения структуры, текстуры и характера структурных связей минерального уровня ощутимо начинают проявляться с зоны литомаржа и особенно существенны в дисперсной зоне древних кор выветривания и современных тропических. Они выражаются прежде всего в изменении состава алюмосиликатной части пород с переходом первичных алюмосиликатов (полевых шпатов, оливина, роговой обманки и др.) во вторичные (каолинит, монт-мориллонит, гидрослюды).

Изменения в составе осадочных, особенно глинистых, пород менее заметны и внешне проявляются в составе несиликатной части среди простых растворимых и не растворимых в воде минералов. Выветрелая часть нередко может быть обогащена гипсом, карбонатами кальция и магния, водными оксидами железа.

При описании породы по минеральному составу дается общее

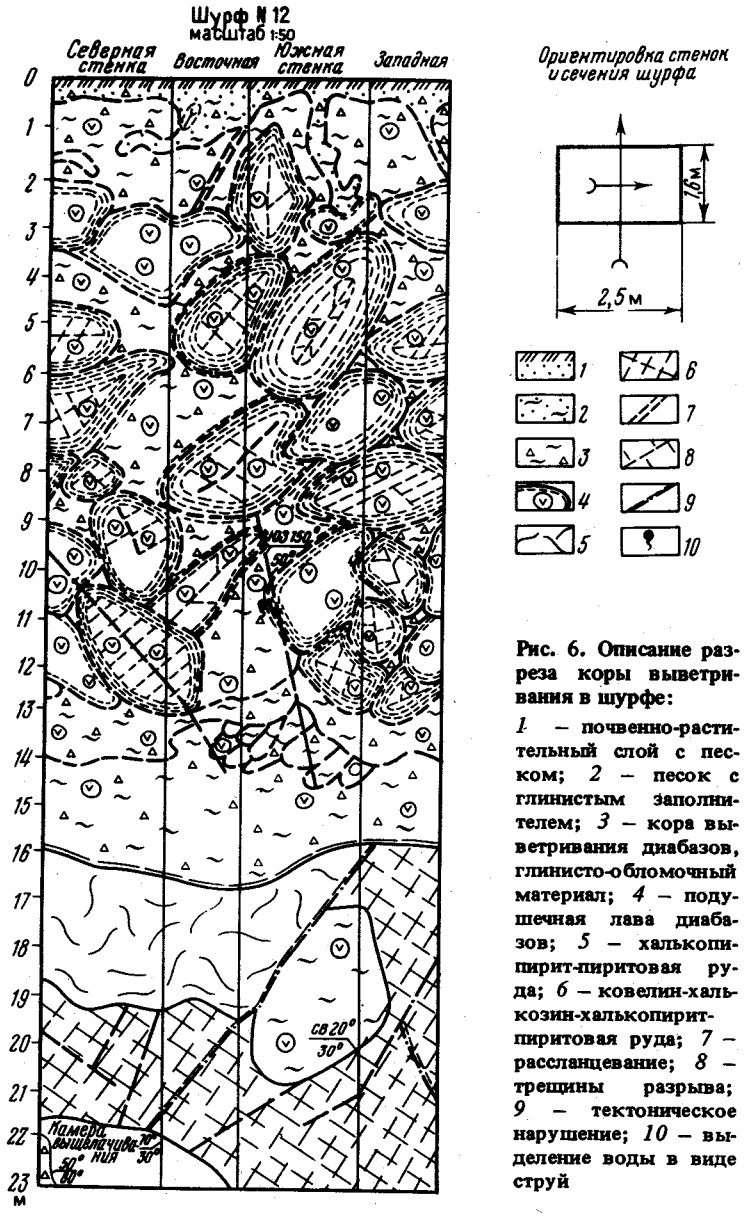


Рис. 6. Описание разреза коры выветривания в шурфе:

1 – почвенно-растительный слой с песком; *2* – песок с глинистым заполнителем; *3* – кора выветривания диабазов, глинисто-обломочный материал; *4* – подушечная лава диабазов; *5* – халькопирит-пиритовая руда; *6* – ковелин-халькозин-халькопирит-пиритовая руда; *7* – рассланцевание; *8* – трещины разрыва; *9* – тектоническое нарушение; *10* – выделение воды в виде струй

название породы. Затем для визуально выделенных компонентов разреза подробно описываются минеральный состав и его изменение, форма и размер составляющих компонентов, состав и формы включений, цемента, натеков, корочек, налетов, прослоев. При документации следует фиксировать степень замещения первичных минералов вторичными (гидрослюдами, монтмориллонитом, каолинитом, нонтронитом), появление водорастворимых минералов (карбонатов, ярозита, гипса), гидроксидов железа (пленок, натеков, бобовин, пизолитов и т.д.). В полевой обстановке необходимо опробовать все породы, включая налеты и натеки, на вскипание от соляной кислоты, отделяя включения от основной породы.

Если вещественный состав отдельных компонентов породы в полевых условиях определить трудно, ограничиваются точным описанием внешней формы, твердости, цвета, блеска, излома и других признаков. Неопределенная в полевых условиях составная часть отбирается на исследование в лабораторию.

Прочность пород. Дезинтегрируя породу и изменяя ее химический и минеральный состав, процессы выветривания изменяют и структурные связи, существовавшие в невыветрелой породе: кристаллизационные структурные связи сменяются кристаллизационно-коагуляционным, коагуляционными, коагуляционно-цементационными. Это приводит к уменьшению прочности породы. Поэтому при изучении и описании признаков выветривания следует отмечать прочность породы и отдельных ее частей при разламывании руками или раздавливании пальцами.

Для стандартизации такого описания можно различать четыре категории прочности:

1 - с трудом раскалывается молотком,
2 - разламывается руками,
3 - раздавливается пальцами,
4 - рассыпается при легком прикосновении.

В ходе полевой оценки прочности породы описывается характер частей, на которые распадается порода: их форма, размер, цвет внутренней и внешней частей, характер поверхности.

Пример полевого описания разреза коры выветривания приведен на рис.6.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геофизические методы являются неотъемлемой составной частью комплекса инженерно-геологических изысканий, проводимых при проектировании и строительстве крупных горных, гидротехнических и промышленных сооружений. С их помощью можно решать широкий круг вопросов, связанных с исследованиями коры выветривания. Эти вопросы можно объединить в две группы.

1. Вопросы структурно-геологического характера, включающие:

определение глубины залегания кровли коренных пород;
установление мощности выветрелых пород;
расчленение коры выветривания на зоны;
выявление мощности отложений, перекрывающих элювий;
оконтуривание линейных кор выветривания.

2. Вопросы изучения физико-механических свойств и состояния выветрелых пород, в частности количественная оценка плотности, влажности, показателей механических свойств, в том числе упругих и деформационных; количественная оценка трещиноватости; изучение анизотропности кор выветривания по свойствам.

Перечисленные вопросы решаются электро-, сейсморазведочными и радиоизотопными методами. Решение вопросов первой группы преследует цель построения пространственной модели строения кор выветривания.

Полевые геофизические методы могут проводиться на дневной поверхности - сейсмопрофилирование, электропрофилирование, ВЭЗ; в горных выработках - электрокаротаж, ультразвуковой каротаж в скважинах, радиоизотопные методы в скважинах, сейсмопрофилирование в штольнях; на образцах - использование ультразвука.

В последние годы при изучении кор выветривания успешно применяются методы сейсморазведки. Учитывая эффективность этих методов для инженерно-геологического изучения кор выветривания, на них следует обратить особое внимание. Реальные возможности сейсморазведки велики, поскольку наблюдения могут быть выполнены с дневной поверхности при отсутствии разведочных выработок и даже при отсутствии выходов изучаемых кор выветривания на дневную поверхность.

Физической основой изучения методами сейсморазведки строения коры выветривания, ее мощности, а также свойств отдельных зон (подзон) горизонтов является тесная связь между состоянием горной породы и скоростями распространения в ней упругих колебаний - сейсмических волн. Чем более выветрелая, следовательно более трещиноватая, пористая, с большим процентом вторичных минералов порода, тем меньше в ней скорость распространения сейсмических волн. Степень выветрелости породы постепенно уменьшается с глубиной, это приводит к соответствующему увеличению скорости от некоторого минимального значения v_c до величины v_{max} в подошве коры выветривания.

Для выяснения закона изменения скорости волн с глубиной необходимо провести наблюдения по методике продольного сейсмического профилирования. На местности сейсмический профиль располагают по линии со спокойным рельефом. При этом кора выветривания может выходить на дневную поверхность или быть покрыта чехлом рыхлых отложений (не более 5-10 м).

Применяя соответствующие способы обработки годографов, можно восстановить скоростной разрез и определить общую мощность кор выветривания.

При изучении особенностей выветривания определенного комплекса пород на некоторой территории задача может быть поставлена в различных вариантах. Иногда достаточно установить общие закономерности изменения степени выветрелости пород от дневной поверхности в глубину.

В таком случае одиночные годографы продольного профилирования, полученные в разных точках наблюдений, сводятся к одному источнику колебаний, а затем полученное семейство годографов усредняется одной плавной кривой. Обрабатывая усредненный годограф методами, используемыми для градиентных сред, получают обобщенный график изменения скорости с глубиной.

Для инженерно-геологических целей больший интерес представляют не обобщенные особенности строения коры выветривания, а характер ее пространственной изменчивости в пределах изучаемой территории, связь строения коры выветривания в конкретных точках с элементами рельефа, экспозицией склонов, мощностью рыхлого чехла, составом субстрата и т.п. В этих случаях каждый полученный годограф обрабатывают отдельно или получают детальные разрезы коры выветривания вдоль сейсмических профилей, обработанных по полным системам, т.е. с получением встречных и нагоняющих годографов.

Каждой зоне коры выветривания соответствует определенная степень дезинтеграции и соответственно трещиноватости пород. Зная величину снижения скорости по сравнению с ее максимальным значением в невыветрелых нетрещиноватых блоках, можно проводить предварительное расчленение коры выветривания на отдельные зоны по сейсмическим данным. С этой целью В.Н. Никитиным {18} предложен коэффициент $k_в = v_{сохр}$ (отношение скорости волн в данной зоне выветривания к скорости волн в невыветрелой породе).

Экспериментально установлено, что независимо от типа пород дисперсная зона коры выветривания, как правило, не может быть отделена от делювиального чехла, а трещинная обычно объединяется с относительно сохранной, невыветрелой породой. Следовательно, по данным сейсморазведки в большинстве случаев четко выделяется обломочная зона (глыбовая и щебнистая подзоны). Для более крепких пород скорость волн в обломочной зоне составляет, как правило, 0,4-0,8 от величины скорости волн в невыветрелой породе (табл. 3). Для более слабых сцементированных пород снижение скорости волн в пределах обломочной зоны несколько больше ($k_в$ = 0,2-0,3), что следует учитывать при расчленении коры выветривания на зоны.

Ультразвуковое прозвучивание образцов, отобранных из различных зон коры выветривания, также обнаруживает снижение скорости волн, что свидетельствует о возможности использо-

Таблица 3.
Значения коэффициента $k_в$ для обломочной зоны кор выветривания пород разного состава (по данным Н.В.Никитина, Л.А.Ярг)

Метод	Порода	Подзона	
		Щебнистая	Глыбовая
Сейсморазведка	Диабазы траппов (Сибирь)	0,5	0,8
	Перидотиты и пироксениты (Сибирь)	0,36	0,67
	Известняки (Средняя Азия)		0,54–0,64
	Известняки (Грузия)		0,4–0,75
	Песчаники (Казахстан)		0,4–0,75
	Песчаники (Средняя Азия)		0,44–0,6
	Аргиллиты (р. Днестр)	0,2–0,3	0,56–0,68
	Аргиллиты (Северный Кавказ)	0,15–0,24	0,45–0,56
Ультразвуковой	Габбро (Болгария)	0,94	0,98
	Известняки (Болгария)	0,85	0,9
	Граниты (Украинский щит)	0,51–0,7	0,88–0,93
	Граниты (юг Болгарии)	0,41	0,82
	Слюдяные гнейсы (Болгария)	–	0,81
	Базальты (север Болгарии)	0,51	0,76
	Аргиллиты (р. Днестр)	0,65	0,68–0,86

вания этого метода для расчленения коры выветривания на зоны (см. табл. 3). Для выполнения ультразвуковых измерений необходимы представительные образцы пород, отобранные из скважин, шурфов, обнажений.

Примером успешного применения геофизических методов (сейсмо- и электроразведки) при изучении кор выветривания является гидроузел Хаобинь (Северный Вьетнам) [25].

В процессе инженерно-геологических исследований свойств пород могут быть также использованы радиоизотопные методы; метод поглощенного и рассеянного гамма-излучения для определения объемной массы (плотности пород). В основе первого метода лежит зависимость между долей поглощаемого грунтом гамма=излучения, проходящего через него, и массой грунта, точность определения ± 0,01 г/см^3. Интенсивность рассеянного гамма-излучения зависит от плотности пород, энергии потока гамма-частиц и расстояния между источником гамма-лучей и детектором. В условиях стабилизации двух последних факторов по интенсивности рассеянного гамма-излучения определяют плотность грунта с точностью ± 0,03 г/см^3.

Влажность пород можно определить методом рассеянного нейтронного излучения, в основе которого лежит эффект замедления атомами водорода воды быстрых нейтронов, испускаемых источником. Число медленных нейтронов пропорционально влажности пород.

ГОРНЫЕ И БУРОВЫЕ РАБОТЫ

При проведении инженерно-геологических исследований бурят специальные инженерно-геологические скважины и используют горные выработки. Горные выработки проходят с целью детального расчленения коры выветривания на зоны; опробования пород для исследования их состава и свойств полевыми и лабораторными методами; проведения режимных наблюдений за изменением пород в процессе выветривания.

Горные выработки предпочтительнее скважин, так как дают возможность наблюдать разрез горных пород, слагающих кору выветривания и, следовательно, выявить все детали его строения, важные в инженерно-геологическом отношении; отобрать более качественные с меньшим нарушением естественного сложения монолиты. При размещении выработок следует учитывать различный характер строения кор выветривания на магматических, метаморфических и осадочных породах и их распространение. Для характеристик территории (исследуемого участка строительства) необходимо иметь данные о разрезах коры выветривания, сформировавшихся на наиболее широко распространенных в районе горных породах и имеющих большую мощность. Основой для размещения специальных инженерно-геологических скважин должна служить карта мощности коры выветривания, построенная по результатам предварительного изучения элювия. Такой подход дает возможность получить наиболее полные разрезы типичных кор выветривания. В процессе бурения инженерно-геологических скважин должна быть обеспечена возможность полного изучения разреза коры выветривания и установления положения границ отдельных ее зон, а также отбора образцов грунта требуемого диаметра, сохраняющих ненарушенное сложение и естественную влажность (дисперсной зоны). Вследствие этого предпочтителен колонковый способ бурения.

В отличие от проходки скважин в геологоразведочном деле инженерно-геологические скважины колонковым способом проходят с ограничением скорости вращения снаряда (не более 60-150 об/мин), давления на забой (не более 15 МПа), сокращенным интервалом проходки. Бурение в обводненных породах ведут "всухую", а в сухих - с продувкой воздухом. Соблюдение этих требований необходимо для получения образцов с ненарушенной структурой (из дисперсной зоны) и сохранения заполнителя и размеров обломков (в щебнистой). Независимо от густоты разведочной сети все скважины должны вскрывать полный профиль выветрелых пород с углублением в коренные не менее 2-3 м.

Инженерно-геологическую документацию обнажений, буровых скважин, горных выработок, включающую описание, зарисовку (фотографирование), простейшие инструментальные измерения (микропенетрация, испытание прочности методом ПОК,

молотком Кашкарова), а также инженерно-геологическое опробование выветрелых пород ведут преимущественно по зонам коры выветривания, выделенным визуально в зависимости от изменения окраски, текстуры и структуры, минерального состава и прочности.

ОПРОБОВАНИЕ. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ОПРОБОВАНИЯ

При изучении выветрелых пород проводят инженерно-геологическое опробование всех зон коры выветривания. Интервал опробования по скважинам в зависимости от геологических условий и степени однородности разреза выветрелых пород в зоне может быть получен путем расчета системы опробования. Данные, характерные образцы пород из коры выветривания и некоторые особенности их отбора приведены ниже.

V зона	Образцы неправильной формы
IV-Б	Монолиты с конкрециями
IV-А	Монолиты с ненарушенной структурой (20x20x20 см)
III	Монолиты неправильной формы, включающие фрагменты слабо выветрелых пород
II-А	Образцы, представляющие собой монолитные обломки + + заполнитель
II-Б	Образцы, отбираемые из внутренних и внешних частей глыб; заполнитель (без сохранения структуры)
I и 0	Образцы, отбираемые из стенок трещин (размером 2x2x5 см) и заполнителя трещин (лимонита, глинки трения и т.д.)

Определение параметров системы опробования сводится к установлению оптимального количества проб, интервала их отбора, числа скважин и мест их расположения. Оптимальное количество проб, необходимое и достаточное для получения надежных средних значений показателей свойств породы, может быть получено различными методами: приближенно-статистическим и путем расчета одномерной, двух- и трехмерной систем опробования, предложенным Г.К. Бондариком [3].

Приближенно-статистический метод определения числа проб, предложенный Н.В. Коломенским и И.Н. Ивановой, заключается в том, что определяют объем оптимальной выборки, т.е. выборки с минимальным количеством членов, среднее значение которой не существенно отличается от генерального среднего.

Исследования различных генетических типов глинистых пород показали, что оптимальное количество проб для пород статистически однородных по свойствам колеблется у физических характеристик от 4 до 30, а у прочностных от 5 до 25.

Результаты расчета оптимального количества частных значений показателей физических свойств для дисперсной зоны,

Таблица 4
Объем оптимальных выборок показателей свойств пород

Показатель	Объем выборки	
	Оптимальный	При $p = 0{,}95$, $\rho = 10\,\%$
Влажность	25	9
Плотность минеральных частиц	20	1
Плотность грунта	20	5
Предел пластичности		
верхний	10	35
нижний	10	35
Песчаная фракция	20	–
Глинистая фракция	15	–

Примечание. Объем выборок по СНиП 1.02.07 – 87 – не менее 10.

сформировавшейся на диабазах и диабазовых порфиритах, приведены в табл. 4.

Таким образом, число проб, необходимое и достаточное для получения надежных средних значений показателей влажности, плотности грунта, плотности минеральных частиц, показателей сдвига (угла внутреннего трения и сцепления), составляет 20-25 проб; пределов пластичности - 10, гранулометрического состава - 15.

Расчет одномерной системы опробования, предложенный Г.К. Бондариком, может быть использован для определения интервала опробования дисперсных зон коры выветривания.

Изменение показателя свойств породы по глубине представляет собой случайную функцию R по направлению (ξ). Разность между математическим ожиданием функции $M\,[R(\xi)]$ и оценкой ее среднего значения, полученной по частным значениям показателей свойств, будет меньше некоторой заданной величины E_0, т.е.

$$E = M\,[R(\xi)] - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i \cdot$$

В этом случае для определения интервала опробования $(\Delta\xi)$ можно использовать неравенство

$$\Delta\xi \le \frac{E_0}{\max\,|R_i(\xi)|},$$

где $R_i\,(\xi)$ - среднее значение производной случайной функции,

$$R(\xi) = \frac{R_{i+1} - R_i}{\xi_{i+1} - \xi_i}.$$

Величина E включает: случайные ошибки, связанные с точностью метода исследуемого показателя свойств породы; естественное рассеяние показателя свойств; случайные ошибки, обусловленные способом аппроксимации случайной функции случайной последовательностью.

Исходя из этого величина E не может быть меньше абсолютной точности метода измерения $E_м$ и больше величины размаха исследуемого показателя $\Delta R_{крит}$:

$$\Delta R_{крит} = R_n - R = St_\alpha,$$

где R_n - крайнее значение упорядоченного ряда измерений геологического параметра; R - оценка среднего выборочного значения; S - стандартное отклонение; t_α - величина, зависящая от объема выборочной совокупности и принятого уровня значимости.

Таким образом, $E_м < E_0 < \Delta R_{крит}$.

Оценку стандартных отклонений S определяем по формуле:

$$S' = \rho^n \bar{A},$$

где A - средний размах, вычисляется по размаху частных

Таблица 5
Пример расчета интервала опробования

Глубина отбора проб, м	Расстояние между точками отбора проб, м	Плотность пород, г/см^3	$R_{i+1} - R_i$	$\frac{R_{i+1} - R_i}{\xi_{i+1} - \xi_i}$
9,5		2,33		
	0,7		0,4	0,57
10,2		1,93		
	1,1		0,10	0,09
11,3		2,03		
	0,9		0,05	0,05
12,2		1,98		
	1,6		0,02	0,01
13,8		1,96		
	4,7		0,03	0,01
18,5		1,99		
	2,0		0,15	0,04
20,5		1,84		
	0,7		0,08	0,11
21,2		1,92		
	0,8		0,59	0,73
22		2,51		
	0,8		0,36	0,45
22,8		2,15		

Таблица 6
Шаг опробования пород коры выветривания

Месторождение	Материнская порода	Состав дисперсной зоны, ее мощность, м	Расчетный интервал опробования для показателей свойств, м						
			По влажности	По плотности минеральных частиц	По шотности	По пределу пластичности		По гранулометрическому составу	
						верхнему	нижнему	Песчаная фракция	Глинистая фракция
50 лет Октября	Диабаз	М-Г, 8	1,5	2	1,1	1,7	1,6	1,8	2,3
	Диабазовый порфирит	М-Г, 27	3	3,6	2,1	3	2,7	2,3	2,2
Весеннее	Диабаз	М-Г, 7	1,7	1,8	2,6	0,7	0,6	1,7	1,1
	Гранодиорит	Г, 14	1,9	1,7	2,5	1,5	4,1	2,7	2,5
Приорское	Диорит	Г, 10	1,5	2,4	1,2	4	1,2	–	–

Примечание. М-Г – монтмориллонит-гидрослюдистый, Г – гидрослюдистый.

значений R_i. В подвыборках, состоящих из двух вариантов

$$\overline{A} = \frac{0,4 + 0,05 + 0,03 + 0,08 + 0,36}{5} = 0,184;$$

$p^{(n)}$ коэффициент, зависящий от числа вариантов в подборке n, определяется по специальной таблице [21] для $n = r(\rho^{(n)} = 0,886, S = 0,163)$; $R_{крит} = St_\alpha$; t_α при $n = 10$ и уровне значимости 5% равно 2,41 [21], а $\Delta R_{крит} = 0,163 \cdot 241 = 0,392$. Среднее значение производной случайной функции

$$\overline{R'_{\pm}} = \frac{0,57+0,09+0,05+0,01+0,01+0,04+0,11+0,74+0,45}{10} = 0,229.$$

Шаг опробования $\Delta\xi \leq \frac{\Delta R_{крит}}{\overline{R'}} = 1,71$ м

Расчет интервала опробования проводился по частным значениям показателей свойств (табл. 5). Несмотря на довольно широкий диапазон полученных значений интервала опробования (0,6-4,1 м), наблюдается повторяемость минимальных значений. Полученные результаты показывают, что шаг опробования должен составлять не более 1,5 м (табл. 6).

Для отбора образцов с ненарушенной структурой следует использовать грунтоносы или двойную колонковую трубу.

Сразу после отбора монолитов из дисперсной зоны их тщательно консервируют с помощью парафина, гудрона или специальных пластиковых стаканов и упаковывают. До отправки в лабораторию образцы хранятся в помещении при положительной температуре воздуха (0-20 °С). Сроки хранения между отбором и производством лабораторных анализов не должны превышать 6 мес., так как при более длительном хранении свойства пород могут существенно изменяться.

ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА, СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И СВОЙСТВ ВЫВЕТРЕЛЫХ ПОРОД

В процессе полевых исследований пород коры выветривания для оценки прочностных и деформационных свойств применяют экспресс-методы. При изучении пород, слагающих зоны дезинтеграции, могут быть использованы такие методы, как сопротивление сжатию образцов неправильной формы, раскалывание образцов клиньями, метод соударного отскока с помощью склероскопа Тора, молотка Кашкарова, определение крепости методом толчения. Для исследования свойств пород дисперсной зоны применимы динамическое и статическое зондирование, пенетрационно-каротажные методы, прессиометрия.

Однако оценка пород экспресс-методами носит только предварительный характер. Основные же определения состава и свойств пород должны проводиться в лабораторных условиях, в стендовых установках и путем выполнения специальных опытных работ.

В процессе лабораторных работ изучают химический и минералого-петрографический состав и физико-механические свойства пород. Исследования химического состава пород коры выветривания проводятся на образцах, отобранных методом борозды или задирки в каждой зоне. При сравнительном анализе данных химического состава разных участков вертикального профиля коры выветривания необходимо сопоставлять графики изменения содержания окислов железа, алюминия, кремния, кальция.

Изучение минерального и химического состава пород коры выветривания ведут комплексом методов, включающим валовый анализ, петрографический, рентгеноструктурный, термический, электронно-микроскопический.

Путем петрографических исследований изучаются состав минералов, микроструктурные и текстурные особенности пород, последовательность замещения минералов субстрата, взаимоотношения новообразованных минералов; производится уточнение выделенных в поле структурно-минеральных зон коры выветривания. Глинистые минералы дисперсной зоны наследуют в нижних горизонтах коры выветривания структуру и форму первичных минералов, а в верхних - образуют разноориентированные колломорфные структуры, редко наблюдающиеся в других генетических типах глинистых пород.

Рентгеноструктурный анализ используется для диагностики глинистых минералов и определения особенностей их структуры, поскольку от минерального состава глин зависят их пластичность, набухаемость, сжимаемость, прочность. Присутствие *каолинита* индицируют четкие базальные рефлексы 001, 002, 003, соответствующие межплоскостным расстояниям (*d*) 0,712, 0,356 и 0,237-0,238 нм. При определении каолинита в смеси с другими минералами, дающими рефлексы около 0,71-0,72 нм, например хлоритом, имеющим слабое отражение 001 (~0,14 нм), и совпадающих с каолинитом отражения 002 (0,71 нм) и 004 (0,35 нм), применяется специальная отработка пробы. Наиболее эффективно растворение хлорита в кипящей соляной кислоте, которая растворяет практически весь хлорит. Для установления присутствия каолинита используют прокаливание при температуре 600 °С, при которой он полностью разрушается.

Присутствие минералов группы *гидрослюд* устанавливается по

наличию на дифрактограммах серии четких базальных отражений, соответствующих межплоскостным расстояниям 0,105; 0,33 и 0,25 нм. Приведенные рефлексы не совпадают с рефлексами других глинистых минералов и не смещаются при насыщении глицерином, отработке кислотами, нагревании до 600°С.

Для определения *монтмориллонита* достаточно установить смещение серии базальных рефлексов на рентгенограммах после насыщения глицерином до 0,177-0,178 нм. Это служит надежным критерием присутствия минерала. При использовании соляной кислоты для удаления хлорита следует учитывать, что одновременно происходит полное или частичное растворение некоторых минералов группы монтмориллонита (сапонита, нонтронита).

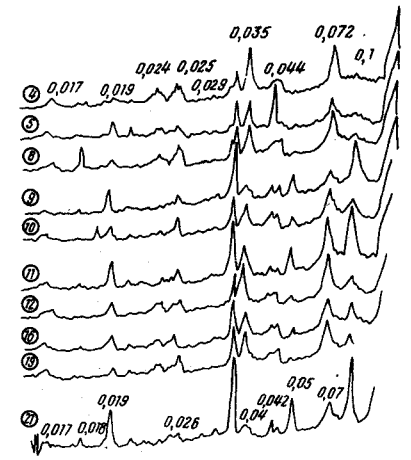
Минералы группы *хлорита* определяются по серии базальных рефлексов 001 и особенно по межплоскостному расстоянию 0,14-0,15 нм рефлекса 001. Главная трудность анализа хлорита состоит в установлении его присутствия в смеси с другими глинистыми минералами. В этом случае лучше использовать ориентированные препараты, усиливающие базальные рефлексы хлорита. Наблюдаемые на дифрактограммах отражения 003, соответствующие межплоскостному расстоянию 0,47-0,48 нм, принадлежат только хлориту, по нему надежно устанавливают присутствие минерала.

Определение *смешаннослойных минералов* выполняется на ориентированных препаратах фракции менее 0,001 мм, так как они диагностируются по наличию отражений при малых углах, соответствующих сдвоенным межплоскостным расстояниям от 0,3 до 0,24 нм, характерным для хлорита и гидрослюд.

Рентгенограммы глинистой фракции выветрелых гранодиоритов Кошенсайского массива (Южный Урал), по которым можно судить о характере изменения состава глинистых минералов в мезозойской коре выветривания, приведены на рис. 7. В щебнистой зоне (обр. 12, 16) глинистые минералы представлены в основном гидрослюдами, каолинит присутствует в небольшом количестве; в зоне литомаржа (обр. 9-11) превалируют гидрослюды при значительном содержании каолинита; в дисперсной - порода состоит из каолинита; количество гидрослюд - незначительное (обр. 4, 5).

В качестве вспомогательного диагностического метода для характеристики формы частиц тонкодисперсных минералов может быть рекомендован *электронно-микроскопический анализ.* Метод позволяет установить характер перехода одних минералов в другие и оценить изменения микроструктуры пород в процессе их выветривания. Примеры микроструктур пород кор выветривания приведены на рис. 8-12. Фотографии образцов пород, отобранных из обломочной зоны и литомаржа тропической коры выветривания, наглядно показывают характер изменения геометрии порового пространства ультрабазитов Кубы за счет выщелачивания серпентина в центре ячеек в обломочной зоне;

Рис. 7. Рентгенограмма глинистой фракции пород дисперсной зоны коры выветривания гранодиоритов Кошенсайского кристаллического массива (Южный Урал).
Цифры в кружках – номер образца



разрушения хризотила, образующего петельчатую структуру породы, в зоне слабо- и сильновыщелоченных пород - литомаржа.

Использование электронной микроскопии весьма целесообразно при принятии решения по закреплению корочек выветривания при архитектурно-реставрационных работах. Примером такого опыта являются данные по микроструктуре красноцветных песчаников "Шишкинских писаниц" в верховьях р. Лены. Фотографии, сделанные с интервалами 0,5; 1; 2; 10; 15; 30; 35 мм (см. рис. 9), позволили получить представления об изменении структурно-текстурных особенностей пород в пределах малых объемов, установить глубину проникновения процесса выветривания в породы с наскальными рисунками, составляющую 1-1,5 см, определить толщину слоя пород равную 2 мм с максимальной пористостью.

В зависимости от цели инженерно-геологических исследований лабораторные испытания физико-механических свойств выветрелых пород предусматривают выполнение комплекса определений, состав которого зависит от зоны коры выветривания (табл. 7). Методика оценки физико-механических свойств связана с наличием в составе кор выветривания пород различного гранулометрического состава (глин, песков, дресвы, щебня, глыб скальных пород).

При изучении обломочной зоны из ее разреза должна быть отобрана представительная проба, масса которой может быть определена по формуле Э.М. Доброва [8] $Q = \alpha D$, где D - максимальный диаметр включений; α - коэффициент, характеризующий распределение объема включений, при нормальном распределении равный примерно 50 г/см^2. Для дисперсных пород (с размером частиц менее 1 см) достаточной является проба массой 50 г, для дресвяных - 10-20 кг, щебнистых - 30-50 кг.

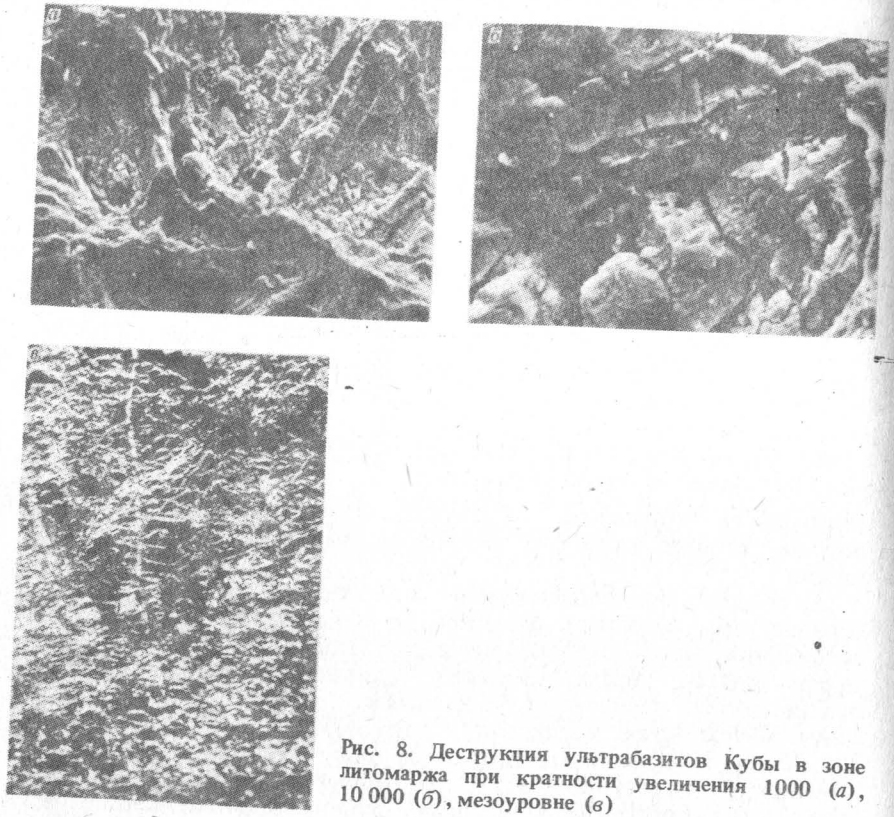


Рис. 8. Деструкция ультрабазитов Кубы в зоне литомаржа при кратности увеличения 1000 (*а*), 10 000 (*б*), мезоуровне (*в*)

Э.М. Добров предлагает руководствоваться следующими объемами проб: при размере частиц более 200 мм - 1 т, 200-40 мм - 40 кг, 40-20 мм - 20 кг.

Среди методов определения гранулометрического состава в практике изысканий наиболее широко применяется метод грохочения. Грунты при этом просеивают через набор сит 200; 200-100; 100-60; 60-40; 40-20 и 20 мм. Обломки крупнее 200 мм измеряют рулеткой или линейкой. Частицы размером менее 200 мм подвергают ситовому анализу (объем пробы 2-5 кг), пропуская через набор сит 10; 10-5; 5-2; 2-1; 1-0,5; 0,5-0,25; 0,25-0,1 мм. Анализ пылевато-глинистой фракции проводится методами пипетки Рутковского, ареометрическим. В качестве экспресс-метода используют метод накидной сетки и метод фотографирования (А.И. Шеко).

Особое внимание следует уделять оценке плотности пород, так как она находится в тесной связи с геометрией порового пространства, является хорошим индикатором степени выветрелости пород и вместе с тем расчетной характеристикой. Определение плотности пород обломочной зоны (щебнистой и глыбовой подзон) можно проводить путем непосредственного взвешивания грунта, извлеченного из шурфа (по возможности правильной формы) с определением объема прямым обмером или путем заливки воды в шурф, в котором предварительно проведена гидроизоляция дна и стенок (затирка глинистой пастой, полиэтиленовый экран и другие способы); гидростатического взвешивания; ядерными методами - по рассеиванию нейтронов и гамма-лучей (В.И. Ферронский).

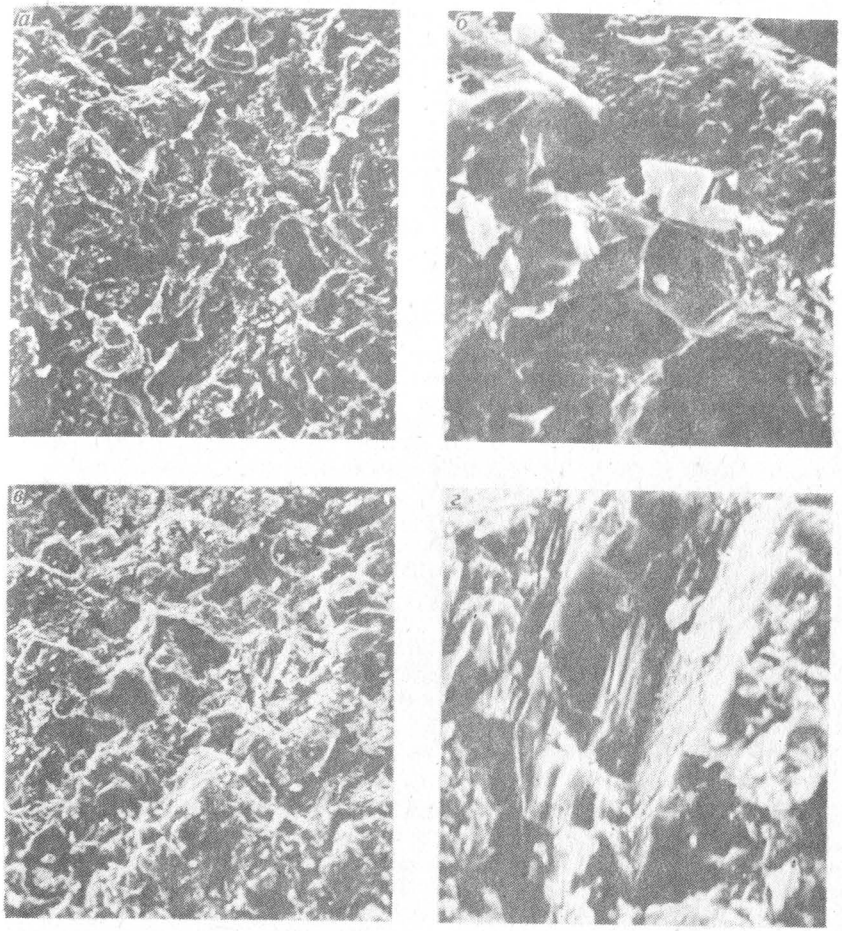


Рис. 9. Микроструктура красноцветных песчаников в зоне выветривания (Шишкинские писаницы, верховья р. Лены) на глубине 1–3 мм от поверхности при кратности увеличения 300 (*а*) и 3000 (*б*), на глубине 1–2 см при кратности увеличения 300 (*в*) и 3000 (*г*)

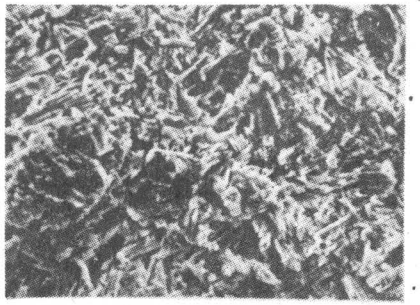


Рис. 10. Микроструктура базальтовых порфиритов толщи Хаобинь (вулканическое стекло) при кратности увеличения 2500

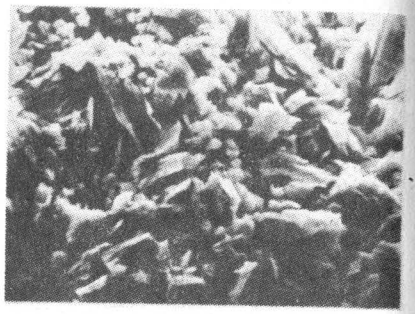


Рис. 11. Микроструктура латеритов Северного Вьетнама при кратности увеличения 10 000

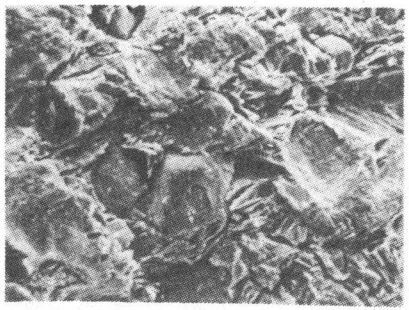


Рис. 12. Микроструктура кварц-хлорит-карбонатных пород зоны брекчирования при кратности увеличения 1000

В.И. Федоровым [23] предложен обобщенный коэффициент физических характеристик $M\tau$, являющийся комплексной характеристикой обломочного грунта при содержании обломков от 20 до 30%:

$$M\tau = \frac{P_1}{P_2} I_P (1 + I_i),$$

где P_1 - содержание заполнителя; P_2 - содержание крупных обломков; I_P - число пластичности заполнителя; I_i - консистенция заполнителя (показатель текучести).

Изучение прочностных и деформационных свойств пород проводят полевыми, лабораторными способами в стендовых установках (табл. 8).

Испытания прочности пород дисперсной зоны в лабораторных условиях обычно проводятся тремя методами: одноосного сжатия, одноплоскостного среза и трехосного сжатия. Результаты исследований этими методами показывают, что при одноплоскостном срезе вследствие неоднородности пород даже в пределах одного образца может получаться большой разброс резуль-

Таблица 7

Перечень лабораторных испытаний элювиальных пород

Определение, ГОСТ	Зона коры выветривания			
	I–II	III	IV	V
Гранулометрический состав ситовой, 12536–79	–	+	–	+
комбинированный, 12536–79	–	–	+	–
Плотность твердых частиц грунта, 5180–84	+	+	+	+
Плотность, 5180–84	+	+	+	+
Пористость	+	+	+	+
Пористость эффективная	+	–	–	+
Границы текучести и раскатывания, 5180–84	–	+	+	–
Размокание	–	+	+	+
Набухание	–	–	+	–
Сжимаемость грунта, 26518–85	–	–	+	–
Временное сопротивление грунтов одноосному сжатию, 21153. 2–84, 24941–81	+	+	+	+
Предел прочности при одноосном растяжении, 21153.3–85	+	+	–	+
Метод комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании, сжатии, 21153.3–85	+	+	–	–

Примечание. Знак "+" – испытание проводится, "–" – не проводится.

татов, иногда не позволяющий построить график сдвига и получить значения φ и C. Поэтому для определения прочности пород дисперсной зоны рекомендуется использовать методы одноосного и трехосного сжатия.

Прочностные и деформационные свойства обломочных пород весьма существенно зависят от объемного содержания и структуры (распределения в грунте) обломков; размера и морфологических особенностей крупных обломков; плотности и механической прочности обломков (степени их выветрелости).

В зависимости от соотношения обломков и заполнителя В.И.Федоров [23] предложил пять схем, определяющих поведение обломочного грунта:

I- обломки плавают в заполнителе C и $\varphi_{ког} = C$ и $\varphi_{зап}$;

II - обломки соприкасаются: $\varphi_{ког} > \varphi_{зап}$, $C_{ког} = C_{зап}$;

III - формируется прочный каркас (характер обломков начинает влиять на φ и $C_{ког}$);

IV - возникает жесткий каркас (глинистый заполнитель играет роль смазки);

V - свойства крупнообломочного грунта (КОГ) не зависят от свойств заполнителя.

Экспериментальным путем установлено, что при увеличении содержания обломков с 10 до 50% наблюдается пропорциональное увеличение сопротивления пород сдвигу, после достижения этого предела (более 50%), по данным П.В. Радченко, угол внутреннего трения существенно изменяется в зависимости от размеров обломков: при увеличении крупности частиц с 1 до 5

Таблица 8
Методы определения свойств пород коры выветривания

Индекс зоны выветривания	Деформационные свойства		Прочностные свойства	
	Лабораторные методы	Полевые методы	Лабораторные методы	Полевые методы
V	—	—	Пределы прочности при одноосном сжатии, растяжении	Полевое определение крепости (ПОК)
IV	Компрессионные, испытания образцов в одометрах	Прессиометрия, испытания статическими нагрузками на штамп; испытания статическими нагрузками на сваю	Испытания на сдвиг; испытания в условиях одноосного сжатия, трехосного сжатия, сжатия-растяжения	Кольцевой и поступательный срез в скважинах, круговой срез в шурфах, сдвиг целиков
III	Компрессионные, испытания образцов в стендовых установках	Испытания статическими нагрузками на штамп	Испытания образцов в сдвиговых установках большого диаметра (ДИИТ)	Обрушение, раздавливание, выпирание призм
I,II	Те же, что для исходных пород		Метод комплексного определения прочности при многократном раскалывании, пределы прочности при одноосном сжатии, растяжении	ПОК, молоток Кашкарова

мм φ возрастает на 11°; при увеличении с 20 до 80 мм - на 7-8°. Сопротивление сжатию образцов грунта, содержащих обломки с шероховатой поверхностью, на 15-30% выше сопротивления сжатию грунтов, содержащих то же количество обломков того же размера, но имеющих гладкую поверхность. Степень окатанности обломков начинает заметно сказываться на величине φ, когда их содержание достигает 35-40%.

Влияние плотности и прочности обломков на механические свойства обломочных пород становится существенным при их содержании более 5-15%. Зависимость угла внутреннего трения от плотности пород описывается эмпирической формулой [23]:

$$\varphi = Ae^{-B},$$

где e - пористость; A, B - коэффициенты, пропорциональные крупности щебня.

Чем выше плотность, тем сжимаемость меньше; чем ниже механическая прочность обломков, тем ниже φ.

Достоверные прочностные характеристики обломочных пород можно получить только путем полевых испытаний или при испытании образцов достаточно большого объема в специальных стендовых установках. Чаще всего крупногабаритные стендовые установки представляют собой увеличенные модификации лабораторных приборов. При лабораторных испытаниях крупнообломочных грунтов требуется применение оборудования, куда могут быть помещены образцы, размер которых не менее чем в 5 раз превышает размер самого крупного включения (Р.Г.Тулинов). При подготовке крупнообломочных образцов грунта большое внимание уделяют тщательной подготовке их торцов, которые выравнивают путем устройства песчаной подушки. Подушка состоит из чистого кварцевого песка размером 0,5-1 мм, плотность и влажность которого соответствуют плотности и влажности мелкозема в испытуемом образце.

Компрессионные испытания проводят по методике Р.Г.Кальбергенова [8] в приборах диаметром 210 мм. Давление измеряют на нижнем торце образца. Это позволяет уточнить положение компрессионной кривой в координатах осадка - нагрузка и определить коэффициент бокового давления, который следует учитывать при расчете модуля общей деформации.

Боковое давление на каждой ступени нагрузки определяют по формуле:

$$\sigma_{бок} = \frac{P_1 - P_2}{f_{тр} F_{бок}},$$

где P_1 и P_2 - соответственно давление на верхнем и нижнем торцах образца; F - площадь боковой поверхности образца; $f_{тр}$ - коэффициент трения грунта по металлу, определяемый опытным путем.

Коэффициент бокового давления ξ рассчитывают по формуле:

$$\xi = \frac{\Sigma\sigma_{ось}\sigma_{бок} - \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\sigma_{ось}\sum_{1}^{n}\sigma_{бок}}{\sum_{1}^{n}\sigma_{ось}^{2} - \frac{1}{n}(\sum_{1}^{n}\sigma_{ось})^{2}},$$

где $\sigma_{ось}$ и $\sigma_{бок}$ - соответственно осевые и блоковые напряжения; n - число ступеней нагрузки.

Наиболее универсальным методом оценки деформационных и прочностных характеристик грунтов следует считать их трехосные испытания в стабилометре. В процессе опыта сохраняется соотношение между напряжениями, вызывающими изменение формы, и напряжением, вызывающим изменение объема. Это позволяет учитывать фактор напряженного состояния и получить инвариантные характеристики на идентичных образцах.

Коэффициент бокового расширения определяется в вакуумном стабилометре, являющемся частью УЛС-1 - 10, и рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{0{,}5\ (\Delta\varepsilon_{v} - \Delta\varepsilon_{1})}{\varepsilon_{1}},$$

где $\Delta\varepsilon_{1} = \frac{\Delta h}{H}$; $\Delta\varepsilon_{v} = \frac{V_{н} - V_{к}}{V_{н}}$;

$V_{н}$ - начальный объем; H - начальная высота; $V_{к}$ - конечный объем; h - конечная высота, поскольку

$\Delta V_{1} = \Pi R^{2}\Delta h$;

$$\mu = \frac{\Delta r}{R}\cdot\frac{h}{\Delta h},$$

где $\Delta r/R$ - относительная боковая деформация; $h/\Delta h$ - относительная осевая деформация.

Модуль деформации рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{(\Delta\sigma_{1} - \Delta\sigma_{2-3})\ (\Delta\sigma_{1} + 2\Delta\sigma_{2-3})}{\Delta\sigma_{1}\varepsilon_{1} + \Delta\sigma_{2-3}(2\varepsilon_{1} - \varepsilon_{V})},$$

где $\Delta\sigma_{1}$, $\Delta\sigma_{2-3}$ - приращение осевых напряжений; ε_{1}, ε_{V} - относительные осевые и объемные деформации.

Прочность грунта определяют графически. Для этого в координатах "τ - σ" строят огибающие кругов Моора, которые аппроксимируют прямой, описываемой уравнением Кулона $\tau = \sigma\mathrm{tg}\varphi + C$. Стабилометрические испытания позволяют получить эффективные величины показателей прочности (при наличии соответствующих устройств для измерения порового давления).

Для определения параметров прочности КОГ Р.Г. Кальбергенов [8] рекомендует метод наклонной нагрузки, прикладываемый в приборах одноплоскостного среза (лабораторный метод) или среза целика (полевой).

Срез целиков наклонной нагрузкой выполняется на установке УИС=1м, подготовка и проведение испытания занимают 30 мин. Возможно проведение опыта с поверхности в котлованах, откосах, шурфах, забоях.

Сжимающие (σ) и сдвигающие (τ) напряжения в момент среза рассчитывают по формулам:

$$\tau = \frac{P}{F}\sin\beta;\ \sigma = \frac{P}{F}\cos\beta,$$

где P - суммарная нагрузка; β - угол наклона нагрузки к нормали плоскости среза; F - площадь сечения целика.

Приложение результирующей наклонной нагрузки позволяет при поступательном движении срезного кольца "плавно обтекать" неровности и выступы в плоскости среза и избежать искажений, вызванных заклиниванием включений между обоймами.

Для получения C и φ опыты надлежит проводить при соблюдении условий:

1) угол результирующей нагрузки (β) к целику не может быть меньше φ ($\beta \geq \varphi$);

2) отношение зазора между обоймами h к диаметру обоймы D должно быть равным 0,14;

3) отношение зазора к диаметру обломков d одного образца должно составлять 1,5.

Площадь среза образца корректируется введением поправки на изменение площади среза:

$$\Delta F = \frac{F}{\frac{2}{r}\sqrt{\frac{\sigma hr + h^{2}}{3}}\left(r - h\sqrt{2hr - h^{2}}\right)},$$

где F - начальная площадь сечения образца; ΔF - изменение площади сечения; h - стрелка сегмента; r - радиус кольца-обоймы; S - перемещение кольца-обоймы.

Значения сжимающих и касательных напряжений находятся из соотношений:

$$\sigma = \frac{P}{F - \Delta F}\cos\beta;\ \tau = \frac{P}{F - \Delta F}\sin\beta.$$

Глава 3

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫВЕТРИВАНИЯ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Принято считать, что процессы выветривания идут крайне медленно. Однако опыт инженерно-геологических исследований показывает, что процессы выветривания могут протекать со значительной скоростью (табл. 9). Поэтому знание скорости и интенсивности процессов выветривания необходимо для оценки мощности съема пород, мощности защитных целиков, устойчивости пород в бортах карьеров, котлованов, откосах, стенках подземных выработок и т.д.

Под скоростью процесса выветривания следует понимать приращение мощности коры выветривания (зоны коры выветривания) в единицу времени (отношение приращения мощности коры выветривания ко времени).

Интенсивность процесса выветривания есть степень изменения минерального, химического и гранулометрического составов, структуры, текстуры, свойств выветривающих пород в единицу времени.

Интенсивность процесса в какой-либо точке A разреза выветрелых пород численно равна $\Delta R^A/\Delta t$, где

$$\Delta R^A = R^A_{t_i} - R^A_{t_{i+j}}; \quad \Delta t = t_{t_{i+j}} - t_i;$$

$R^A_{t_i}$ - некоторый показатель, характеризующий любой признак породы в точке A (состав, свойства, структуру) в момент времени t; $R^A_{t_{i+j}}$ - то же в момент времени t_{i+j}.

Скорость выветривания можно оценить по мощности зоны выветривания, образовавшейся в определенных условиях за год. Показатель скорости выветривания будет существенно различен в разных породах и обстановках, при отсутствии или наличии сноса (осыпания, смыва мелкозема на склоне, отмели, бичевнике) выветривающегося материала.

При изучении скорости процессов выветривания можно основываться на данных натурных исследований и результатах моделирования процесса.

Натурные исследования могут проводиться путем наблюдений на существующих природных отношениях; существующих искусственных отношениях (откосах, выемках, шурфах, штольнях); искусственно заданных откосах и опытных площадках; опытных отвалах и отвалах из штолен; повторной документации и опробования керна. Моделирование процесса выветривания может осуществляться путем натурного моделирования; лабораторного моделирования; моделирования на ЭВМ.

Таблица 9
Скорость выветривания некоторых пород (Л.А.Молоков, 1985 г.)

Порода, возраст, геологический индекс	Район распространения	Скорость выветривания, м/год		Сроки наблюдения
		Площадка	Склон	
Глины				
неокомовые, K_1 cn	Саратовская ГЭС	0,34	0,8	2 года
неокомовые, K_1 cn	г. Ульяновск	0,25	–	2 мес
майкопские, $P_3^3 + N$	Канал Волго-Дон	–	0,6	2 мес
палеогеновые, P_g^3	Соколово-Сарбайский карьер	–	0,73	8 мес
апшеронские, Nap	Мингечаурская ГЭС	0,3 – 0,5	–	1 год
Аргиллиты				
протерозойские, PZ	Днестровская ГЭС	0,3	–	Несколько лет
ордовикские, Obr	г. Братск	0,3	–	4 года
пермские, P_2	Воткинская ГЭС	0,35	–	6 мес
юрские, J_2	Иркутская ГЭС	0,41	–	3 года
Песчаники, $J_3 + K$				
верхнеюрские – меловые	г. Чита	0,3	–	2 мес
массивные	Прибайкалье	0,22	–	30 лет
тонкослоистые	”	0,49	–	30 лет
на глинистом цементе	г. Иркутск	0,65 – 1,75	–	1 год

СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Для изучения процессов выветривания в настоящее время применяют стереометоды, основанные на использовании стереофотограмметрии. Для получения стереофотограмметрических пар снимков объект фотографируют с близкого расстояния (1-20 м) малоформатными камерами типа СКИ-5, 7, 8, выпускаемыми в СССР, или UMK-10/1318 фирмы "Карл Цейсс Иена". Установки состоят из двух камер подвижных или симметрично закрепленных на базисной линейке. Камеры синхронные, с изменяющимися фокусными расстояниями. Установка крепится на топографическом штативе. Съемку можно проводить с наклонной оптической осью ($0\pm90^{\circ}$). С увеличением снимков можно получить планы площадок размером 10x10 и 15x15 м в масштабе 1:100 - 1:400.

Съемкой малоформатными камерами с близкого расстояния можно установить, как идет процесс выветривания, в частности развитие трещиноватости во времени, определить общую и сезонную роль в этом льдообразовании по трещинам. С этой целью разновременные снимки, полученные с постоянных точек фотографирования при одинаковом положении фотокамер, составляют для совместного стереоскопического наблюдения в определенных сочетаниях, при которых получают несколько новых видов стереоскопических моделей (например A_2A_3; A_2B_3 или A_3B_2), дающих зрительное ощущение пространственных изменений и движений [14].

Применение стереофотограмметрии представляет особый интерес при изучении выветриваемости пород в искусственных отложениях, когда процесс протекает быстро. Во-первых, метод обеспечивает большую документальность и наглядность в изучении выветривания пород во времени. Во-вторых, удается количественно оценить влияние неоднородности массива, льдообразования на пространственно-временное протекание в нем выветривания, развитие его от конкретных линий, центров, участков. В-третьих, по усложнению сети трещин выветривания определяется время начала осыпания откоса, а в дальнейшем - и его интенсивность.

Тенденции выветривания могут быть прослежены с помощью стереометодов и в приустьевых частях штолен, т.е. в разных зонах выветривания. При этом определяют, как меняются границы и мощности различных зон.

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СКОРОСТЬЮ ВЫВЕТРИВАНИЯ ПОРОД, ВСКРЫТЫХ ОТКОСАМИ

Наблюдать за скоростью выветривания можно по разрезам зон выветривания, сформированных в пределах разновозрастных элементов рельефа, если кровля зоны выветривания не подверга-

лась денудации, а время образования обнажения известно; во вскрытых в откосах дорожных и других выемках, в бортах карьеров, длительное время не подвергавшихся расчистке.

Определение скорости выветривания пород по существующим искусственным и природным откосам можно проводить следующим образом.

1. Перед составлением рабочей программы исследований выполняется полевая рекогносцировка, в ходе которой осматриваются и наносятся на карту все искусственные и естественные обнажения в исследуемом районе и прилегающей к нему местности.

2. Для всех осмотренных искусственных обнажений устанавливаются возможно точные даты их вскрытия. Желательно отыскать такие обнажения, сроки вскрытия которых отличались бы друг от друга на несколько месяцев, а все вместе они охватывали бы период в несколько лет.

3. Из осмотренных искусственных обнажений выделяют такие, в которых можно наблюдать интересующие типы пород.

Наблюдения начинают с измерений формы и высоты откоса с помощью рулетки и горного компаса. Одновременно фиксируют геолого-литологическое строение, состав пород, элементы их залегания, трещиноватость, обводненность, выветрелость, состояние поверхности откоса, промоины, наличие осыпи, растительность, характер перемещения выветрелого материала, наличие источников воды.

4. Для определения мощности выветрелых пород, их состава и строения на типичных откосах (обнаженных и задернованных) задаются одно-двухступенчатые расчистки; расчистки производят на всю мощность выветрелых пород, с заглублением в материнские породы на 1-1,5 м. Зоны активно выветрелых пород визуально подразделяются в зависимости от размера отдельностей, плотности сложения, числа трещин, характера ожелезнения, наличия новообразований - гипса, соляных выцветов, конкреций и т.д. Если в основании откоса развита осыпь, состоящая из продуктов выветривания пород, слагающих откос, необходимо в 1-3 точках по линии профиля в зависимости от размеров осыпи для определения мощности осыпных накоплений заложить шурфы (закопушки). Знание мощности (объема) осыпи - основание для количественной оценки скорости разрушения пород.

5. В каждом выбранном для наблюдения пункте из профиля выветрелых пород, из разных его зон, отбирают образцы для лабораторных испытаний.

В результате проведенных исследований получают информацию о глубине проникновения процесса, его интенсивности, скорости, состоянии и свойствах выветрелых пород на склонах разной экспозиции и обнаженности.

Наблюдения за процессом выветривания различных геолого-литологических типов пород проводят на существующих природ-

ных откосах. С этой целью выбирают характерные участки (различной высоты, строения, экспозиции, наветренности), находящиеся на разных стадиях формирования и в различном состоянии. Наблюдения на этих участках начинают с некоторого промежуточного этапа их существования.

В природных откосах закладывают несколько наблюдательных створов, число которых определяют в ходе полевых работ. Все створы для долгосрочных наблюдений должны быть закреплены на концах реперами, промежуточные точки - металлическими рейками; на характерных точках профиля устанавливают пикетные знаки.

Головки металлических реек, размещаемые через 1-2 м, в начале наблюдений нивелируют, и последующие изменения в положении поверхности откоса фиксируют путем замера. В верхней и средней частях створа рейки забивают на значительную глубину (1,5-2 м), так как на этих участках возможно интенсивное обрушение. В нижней трети откоса, где будет происходить накапливание осыпающегося и смываемого материала, рейки высотой 1-1,5 м забивают на глубину 0,5-1 м.

Измерение положения опорных точек профиля периодически проводят с помощью тахеометрической съемки. Длительность наблюдений зависит от скорости процесса выветривания и должна составлять не менее 5-6 лет.

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СКОРОСТЬЮ ВЫВЕТРИВАНИЯ НА СПЕЦИАЛЬНО СОЗДАННЫХ ОТКОСАХ И ОПЫТНЫХ ПЛОЩАДКАХ

Наиболее достоверными методами определения скорости выветривания следует считать натурные наблюдения на опытных откосах и площадках. Выветривание пород в искусственных откосах происходит в весьма специфических условиях и отличается от выветривания пород, слагающих естественные склоны и горизонтальные площадки. Это обусловлено быстрым изменением напряженного состояния пород, изменением термодинамических условий и влиянием производственных процессов (например взрывных работ). Скорость выветривания пород и вклад процесса выветривания в формирование профиля откосов зависят от их крутизны. Разрушение крутых откосов происходит в результате оседания и обрушения крупных блоков пород, отчленяющихся по вертикальным трещинам закола (аналог трещин бортового отпора). Происходящие одновременно выветривание пород на обнаженных стенках и осыпание щебенки играют подчиненную роль. Роль процессов выветривания в формировании пологих склонов возрастает. На склонах пологих и средней крутизны (12-25°) условия развития процессов выветривания достаточно благоприятные; мощность элювия определяется соотношением величин скоростей выветривания и денудации.

Учитывая вышеизложенное для решения вопроса о скорости выветривания пород в откосах, рекомендуется устройство искусственно заданных откосов с разным заложением (2:1; 1:1; 1:1,5; 1:2) в невыветрелых породах. Они должны быть высотой не менее 10-12 м, разной экспозиции, с различной ориентировкой по отношению к господствующим направлениям ветров и размещены на типичных породах.

Сразу же после вскрытия опытного участка проводят его детальную геологическую документацию с количественной оценкой трещиноватости и блочности пород. Желательно проведение фотограмметрии. Первичное опробование горных пород в пределах опытных откосов (площадок) проводят по квадратной сетке. Число проб n определяют исходя из среднего значения коэффициента изменчивости показателя временного сопротивления пород сжатию и уровня доверительной вероятности (α = 0,9; 0,95).

Число проб рассчитывают по формуле

$$n = \frac{V^2_{R_{ск}} \; t^2_\alpha}{\rho^2_\alpha}.$$

Режимные наблюдения за состоянием пород выполняют путем проведения повторной фотограмметрии или повторной документации с количественной оценкой изменения трещиноватости, интенсивности ожелезнения и новообразований. Визуальные наблюдения сопровождаются отбором проб для лабораторных испытаний пород.

Через 1 год опытную площадку вскрывают траншеями или расчистками, по которым проводят исследования скорости выветривания. При этом необходимо учитывать скорость эрозии (интенсивность осыпания пород в уступах). С этой целью предусматривают закладку горизонтальных и вертикальных реперов, позволяющих осуществлять инструментальную съемку положения в плане бровок уступов и поверхностей откоса. Кроме того, следует проводить замеры мощности и объема образующейся у подошвы уступа осыпи.

Наблюдения в полевых условиях скорости выветривания на опытных площадках требуют проведения горных работ и длительного срока наблюдений. Для этой цели необходимо следующее.

1. Вскрыть в пределах площадки не затронутые выветриванием коренные породы. Каждая такая площадка представляет собой один пост длительного наблюдения за процессом выветривания (его режимом), входящий в режимную сеть.

2. Посты наблюдения располагают таким образом, чтобы они находились на различных формах рельефа (плато, склон, долина) и размещались на типичных породах.

3. Посты наблюдений располагают по створу; все виды работ (проходка, периодические наблюдения, отбор проб на лабора-

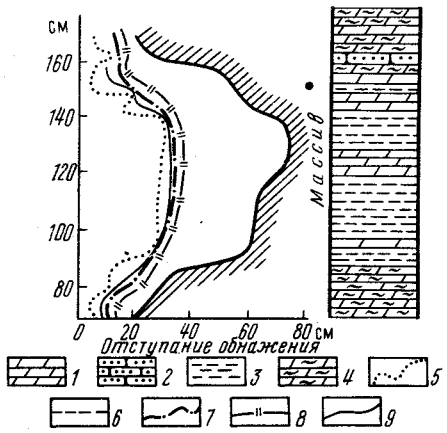


Рис. 13. Оценка скорости выветривания на опытном обнажении по данным многолетних наблюдений (по С.В. Николаеву, Э.Л. Олферовой):

1 – мергель известняковый; *2* – песчаник; *3* – аргиллит; *4* – мергель глинистый; *контуры поверхности обнажения в различные годы наблюдений: 5* – 1971 г., *6* – 1972 г., *7* – 1973 г., *8* – 1974 г., *9* – 1982 г.

торные исследования и т.д.) в пределах одного створа производят одновременно.

4. Частоту и сроки наблюдений устанавливают в зависимости от климатических условий и первые 2-3 месяца выполняют 1 раз в неделю, а затем ежемесячно на протяжении года. По данным режимных наблюдений, выполненных в течение года, рассчитывают период (или частоту) дальнейших наблюдений, руководствуясь требуемой точностью оценок процесса и доверительной вероятностью [4].

5. Для каждого наблюдательного створа ведут полевой журнал, в котором регистрируют (записывают, зарисовывают, фотографируют) результаты наблюдений.

Подробные наблюдения позволяют повысить надежность количественной оценки скорости выветривания различных типов пород, обнажающихся в пределах изучаемых площадок, оценить неравномерность скорости выветривания пород, выяснить степень воздействия на процесс выветривания различных природных и техногенных факторов. Результаты проведения таких 10-летних режимных наблюдений в обнажении флишевой толщи мелового возраста Черноморского побережья приведены на рис. 13.

Установлено, что надежность оценки скорости выветривания при этих исследованиях на нескольких опытных участках можно получить за 3-4 года наблюдений.

Результаты кратковременных (несколько лет) наблюдений за скоростью выветривания пород на опытных площадках по возможности целесообразно дополнять данными о мощности и строении кор выветривания, вскрытых откосами дорожных и иных выемок, существующих десятки лет. Установив на основании литературных или архивных материалов (отчетных документов о строительстве), опроса местных жителей время (год) сооружения выемки и определив мощность коры выветривания на момент

проведения исследований, представляется возможным оценить скорость процесса с достаточной точностью.

Моделирование воздействия некоторых агентов выветривания на горные породы на опытной площадке. Для изучения скорости выветривания пород в условиях переменного водонасыщения, связанного с сухими и влажными сезонами года, колебаниями уровня воды при наполнении водохранилищ и т.д.,можно проводить модельные испытания, позволяющие сократить время, требуемое для решения вопроса о скорости процесса.

С этой целью породы, обнаженные на опытной площадке размером 1x1 м, подвергают попеременному увлажнению путем искусственного полива и высушиванию. Полив можно осуществлять посредством дождевого распылителя с заданной интенсивностью, растворами различной кислотности и разным компонентным составом. Чередуя периоды увлажнения (5 дней по 300 мм/сут) и высушивания (7 суток), соответствующие сезону дождей и сухому сезону года, можно воспроизвести годовой цикл водообмена за 10-12 дней. Выполнение 10-20 циклов позволяет приближенно воспроизвести процесс выветривания, протекающий в природе в течение 10-20 лет. Применение в процессе моделирования растворов различного компонентного состава (с учетом изменения окружающей среды при возведении сооружений) позволит получить данные для инженерно-геологического прогноза. До проведения опыта с площадки отбираются образцы для исследования плотности, прочности, коэффициента крепости пород. Площадка тщательно документируется, дается количественная оценка трещиноватости и блочности пород.

По окончании эксперимента на площадке проходят шурф, фиксируя признаки выветривания горных пород; проводят отбор проб на микроскопические исследования и изучение физико-механических свойств пород.

Наблюдение за выветриванием монолитов-"близнецов". Для проведения эксперимента подбирают 12 монолитов пород, характеризующихся идентичным минеральным составом, одинаковым размером, с отношением высоты к диаметру равным 2:1. На предварительно выбранной площадке размером 1x2,5 м 10 образцов закапывают заподлицо с поверхностью в элювиальные грунты, два монолита оставляют в качестве эталонных. Наблюдения за характером изменения пород в монолитах выполняют в течение 10 мес. В процессе наблюдений каждый месяц извлекают по одному монолиту. Монолит подвергается макро- и микроисследованиям, сопровождающимся определением плотности, временного сопротивления пород сжатию и коэффициента крепости. Наблюдения в "интенсифицированных" условиях предусматривают аналогичный комплекс исследований при дополнительном увлажнении дождевым распылителем растворов заданного состава.

Исследования таким способом целесообразно проводить в тех случаях, когда мощность рыхлых отложений велика и сооружение опытных площадок связано с большим объемом земляных работ.

КОНТРОЛЬНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ОТВАЛОВ ГОРНЫХ ПОРОД. ПОВТОРНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ СТАРЫХ ШУРФОВ, УСТЬЯ ШТОЛЕН, КЕРНА СКВАЖИН

Для установления характера изменения пород в теле каменно-набросных плотин целесообразно проведение наблюдений за породами в опытных отвалах.

Н.П. Лушнов (1977) предлагает с этой целью отсыпку из исследуемых пород определенного фракционного состава опытной полосы размером 5х10 м, высотой 0,8-1 м. Через 1, 10 и 24 месяца с момента наблюдений определяют степень выветрелости образцов пород, находящихся на поверхности и различной глубине; в конце опыта производят рассев материала на 9-10 фракций крупностью от 2 до 1200 мм.

Изучение пород в отвалах, время отсыпки которых известно, позволяет оценить характер их изменения:

за определенные промежутки времени, т.е. получить график зависимости $x = f(t)$, где x - показатель состава или свойства; t - время;

по глубине $x = f(H)$, где H - глубина.

Контрольные обследования рекомендуется проводить 3 раза в год, выполняя при этом следующий комплекс работ: визуальное описание характера изменения пород с замерами размеров отдельных обломков;

отбор проб на шлифы;

отбор проб для исследования физико-механических свойств пород: плотности, эффективной пористости, временного сопротивления пород сжатию в сухом и водонасыщенном состоянии (по 10-15 образцов из каждого отвала);

определение гранулометрического состава валовым способом (три определения из каждого отвала).

Рассмотренные выше опытные работы рекомендуется выполнять на существующих в районе отвалах пород, извлеченных из горных выработок при добыче полезных ископаемых или из строительных выемок.

Повторная документация старых шурфов, устья штолен, керна. Изучение скорости выветривания пород можно проводить путем обследования старых шурфов, пройденных в разное время и вскрывших невыветрелые породы. Детальная документация повторно расчищенных и углубленных (на 0,5-1,5 м) выработок позволяет определить дополнительное приращение мощности выветрелых пород за время, прошедшее со дня проходки шурфа. Аналогичные исследования рекомендуется проводить в устьевой части штолен. Документация сопровождается отбором проб для исследования физико-механических свойств пород.

Повторная документация и анализ керна скважин, пройденных в разные годы, в ряде случаев могут оказаться весьма полезными, так как дают сведения о характере изменения пород за достаточно продолжительный отрезок времени (от 1 года до

нескольких лет). Для получения необходимой информации рекомендуется ревизия кернового материала (двух-трех скважин каждого года проходки) с документацией интервалов глубин, охватывающих обломочную (щебнисто-глыбовую) зону и невыветрелые породы. В процессе документации необходим отбор образцов на микроскопические исследования и лабораторные испытания пород. После проведения лабораторных работ по полученным результатам строят графики изменения состава и свойств пород во времени $x = f(t)$.

ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ СЪЕМА ВЫВЕТРЕЛЫХ ПОРОД

Для определения глубины съема выветрелых пород необходимо учитывать комплекс различных факторов:

конструктивные особенности сооружения;

экономические соображения;

пространственную изменчивость мощности выветрелых пород;

скорость процесса выветривания;

зональность строения и физико-механические свойства выветрелых пород.

Для решения вопроса о закономерностях пространственной изменчивости мощности выветрелых пород необходимы:

использование результатов геологической съемки и буровых работ;

проходка шурфов, расчисток (вскрывающих материнские породы) для детального описания коры выветривания, с установлением общих признаков выветривания для отдельных типов пород;

проходка выработок и непосредственное установление мощности выветрелых пород на месте каждого проектируемого сооружения (на стадии рабочего проекта);

опробование горных пород, слагающих различные зоны коры выветривания, и изучение их физико-механических свойств;

определение удельного водопоглощения методом налива в отдельные зоны или сравнительной оценки отдельных пород и зон.

Скорость процесса выветривания может быть учтена в результате постановки специальных наблюдений.

Глава 4

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВЫВЕТРИВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

ВЕЩЕСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫВЕТРИВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Применительно к решению инженерно-геологических задач выделяют следующие виды моделирования: образное, логико-математическое, эвристическое, предметно-математическое, физическое [20], кибернетическое и содержательное. При разработке прогнозов процессов выветривания можно использовать физическое моделирование на эквивалентных материалах и вещественных моделях.

Методика выщественного моделирования процесса выветривания горных пород в лабораторных условиях зависит прежде всего от целей и задач инженерно-геологических исследований и конкретных природно-климатических условий. До начала эксперимента необходимо установить главные агенты процесса выветривания (температуру, воду, кислород, CO_2, органические и неорганические кислоты и др.), для того чтобы создать в лабораторных условиях среду, близкую к природной путем определенного сочетания факторов.

Лабораторное моделирование процесса выветривания позволяет решить следующие задачи:

выявить влияние гидрохимической среды (pH и компоненты состава инфильтрующихся вод) на интенсивность процесса выветривания;

установить зависимость скорости процесса выветривания от гидродинамических условий;

определить относительную скорость выветривания различных пород, распространенных на изучаемой территории;

количественно оценить вклад разных компонентов в процесс выветривания пород;

разработать рекомендации по прогнозу изменения состава и свойств пород в процессе выветривания в натурных условиях.

В зависимости от природных условий процесса выветривания, состава горных пород и задач исследований можно реализовать различные модели процесса на соответствующих им лабораторных установках. Модель должна воспроизводить комплекс процессов - компонентов и механизм их взаимодействия, что в конечном счете приведет к изменению состава и свойств образцов горных пород в лабораторной установке, адекватному натурным условиям, и даст возможность изучить характер и скорость химико-минералогических изменений состава пород, их структурно-текстурных особенностей и свойств.

Правильный выбор модели и методики проведения эксперимента, отвечающий условию достижения цели моделирования,

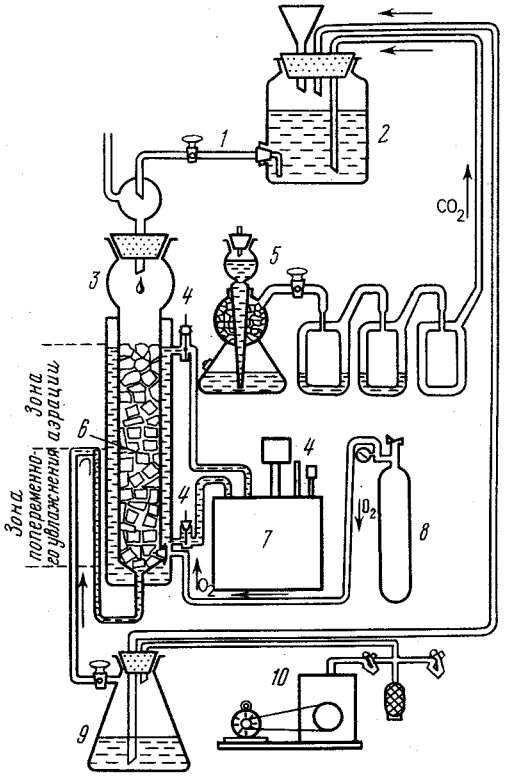


Рис. 14. Схема прибора МАК:

1 – дозирующий кран; *2* – верхний резервуар; *3* – трубка-реактор; *4* – термометры; *5* – аппарат Киппа; *6* – образцы горных пород; *7* – термостат; *8* – баллон со сжатым газом (кислородом); *9* – нижний резервуар; *10* – воздуходувка

обеспечивается соблюдением условий однозначности и равенством критериев геологического подобия. Для моделирования процесса выветривания могут быть использованы динамические циркуляционные установки МАК-1, МАК-2, прибор типа Сокслет, аппарат Джеймса (рис. 14-16).

При лабораторном моделировании процесса выветривания динамические установки позволяют:

1) воспроизводить различные гидрохимические условия путем сочетания различных действующих компонентов (табл. 10);

2) создать две зоны, различающиеся гидрогеологической характеристикой - зону аэрации, в пределах которой растворы инфильтруются через горные породы, и нижнюю - зону попеременного увлажнения;

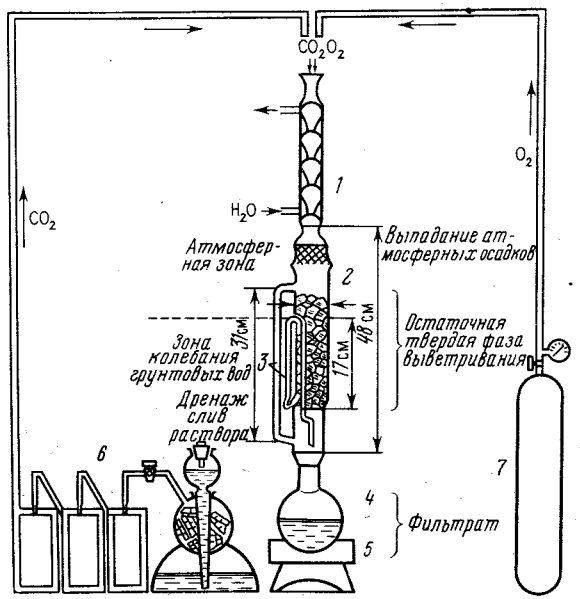


Рис. 15. Схема прибора "Сокслет":

1 – холодильник; *2* – цилиндр; *3* – боковые сифоны; *4* – колба; *5* – нагревательный прибор; *6* – аппарат Киппа; *7* – кислородный баллон

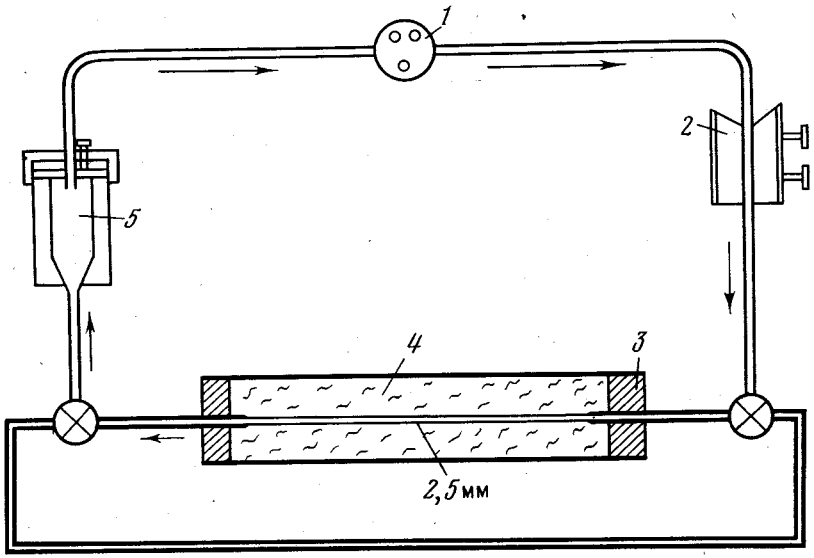


Рис. 16. Прибор Джеймса для изучения растворимости карбонатных пород:

1 – насос; *2* – измеритель концентрации раствора с самописцем; *3* – резиновая прокладка; *4* – образец карбонатных пород с трещинами; *5* – герметичный цилиндрический резервуар

Таблица 10

Лабораторные модели процесса выветривания и отвечающие им гидрохимические условия

Гидрохимическая среда	pH	Модель	Набор агентов
Сильнокислая с участием органических и неорганических кислот	< 3	I	H_2O, CH_3COOH
		II	H_2O, CH_3COOH, CO_2
		III	H_2O, CH_3COOH, O_2
		IV	H_2O, CH_3COOH, CO_2, O_2
			H_2O, HNO_3, H_2SO_4
Кислая	3–6	V	H_2O, CO_2
		VI	H_2O, CO_2, O_2
Нейтральная	7	VII	H_2O
		VIII	H_2O, CO_2

3) имитировать различные гидродинамические условия. (изменять скорость инфильтрации атмосферных осадков, условия их дренирования, стока, периодичность увлажнения горных пород, мощность зоны аэрации и попеременного увлажнения, а также их соотношение);

4) воссоздавать, менять, интенсифицировать температурный режим вещества, взаимодействующего в ходе лабораторного моделирования процесса выветривания;

5) подвергать процессам выветривания образцы пород разных размеров и формы (обломков неправильной формы, кубиков, уложенных в виде природного разреза).

Начальный этап моделирования состоит в выборе модели и обосновании геологического подобия моделируемого процесса натурному (критерии подобия, условия однозначности). Создание моделей, отвечающих различным гидрохимическим условиям, ведется путем подбора растворов, требуемого компонентного состава и pH. Раствором наполняют верхний резервуар (см. рис. 14), откуда он через дозирующий кран поступает в виде капель в центральный реактор. Подвод газов CO_2, O_2 и др.) может осуществляться путем насыщения раствора в верхнем резервуаре или непосредственной подачи их в реактор.

Варьирование компонентов (воды, кислот, кислорода, углекислоты) позволяет воссоздать в модели требуемую гидрохимическую обстановку процесса выветривания. Интенсивность фильтрации раствора регулируется дозирующим краном. Задание требуемой величины зоны попеременного увлажнения достигается установкой соответствующего положения колена сливного сифона. Постоянство заданной в диапазоне от +100 до -20 °C температуры в реакторе или поддержание требуемого ее режима обеспечивает термостат. Если целями моделирования допускается проведение эксперимента в диапазоне колебания комнатной

температуры, то можно использовать установку более простой конструкции - без термостата и с одинарным центральным реактором.

После выбора параметров эксперимента в реактор загружают образцы горных пород правильной и неправильной форм, общей массой 500-1000 г. В зависимости от цели эксперимента испытаниям подвергают образцы одной породы или нескольких в соответствии с природным профилем. Например, испытывают породы различной степени выветрелости, эффузивы с кварц-карбонатным заполнителем из зон брекчирования, переслаивание карбонатных пород разного состава (доломитов, известняков, доломитизированных и известковистых разностей) и др.

Предварительно, до моделирования, изучают состав и физико-механические свойства пород. Продолжительность эксперимента зависит от цели моделирования. Эксперимент разделяют на этапы. Длительность этапа определяется составом пород и может колебаться от 0,5 до 5 мес (до появления существенных визуальных признаков изменения пород). Для устранения влияния систематических ошибок каждый этап опыта дублируют.

После проведения эксперимента исследователь располагает двумя фазами выветривания. Жидкая фаза в нижнем резервуаре содержит все компоненты, вынесенные из горных пород. Ее анализ позволяет оценить интенсивность процесса выветривания (по массе сухого остатка фильтрата) и миграционный ряд элементов (по химическому анализу фильтрата), изменение кислотно-щелочных условий (путем измерения pH приборами типа pH-340). Анализ твердой фазы различными методами (бинокулярным, микроскопическим, рентгеноструктурным, термометрическим, микрозондовым, электронно-микроскопическим) позволяет установить преобразования минерального состава и изменения структурно-текстурных особенностей пород в ходе экспериментального выветривания. Изучение твердой фазы желательно сопровождать фотографированием образцов и шлифов.

Основной задачей петрографических исследований является изучение изменения вещественного состава пород, структурно-текстурных особенностей, этапов растворения, формирования пористости, распространения и структуры глинистого вещества. Для уточнения минерального состава и оценки изменения количественного соотношения различных минералов целесообразно использовать качественный и количественный рентгеноструктурный анализы. Определение количественного содержания минералов, входящих в состав исследуемого образца породы, может быть проведено путем оценки интенсивности дифракционных максимумов на порошковой рентгенограмме. Возможность решения такой задачи основываеся на существовании зависимости дифракционных максимумов от концентрации каждой кристаллографической фазы, входящей в состав породы. Использование микрозондового метода позволяет выявить начальные стадии преобразования минерального вещества (в малых количествах на ограниченном пространстве). Сканирующий электронный микроскоп представляет возможность заглянуть в "микромир", оценить изменение структурно-текстурных особенностей горных пород при лабораторном моделировании процесса выветривания. На образцах кубической и неправильной форм представляется возможным детально изучить изменение физико-механических свойств пород - плотности, пористости, прочности.

Для лабораторного моделирования процесса выветривания горных пород в условиях жаркого влажного климата можно использовать прибор типа Сокслет (см. рис. 12). Принцип работы и возможности его применения подробно обсуждались в литературе [27]. В отличие от динамической установки МАК-1, он более прост, но не позволяет управлять температурным режимом, а дает возможность лишь поддерживать температуру опыта в строго определенных пределах: 70-80 °С - в зоне аэрации, до 40 °С - в зоне попеременного увлажнения. Как известно, с увеличением температуры уменьшается растворимость углекислого газа и кислорода, поэтому их роль в процессе эксперимента в приборах типа Сокслет нивелируется. Следует обратить внимание на некоторые технические детали: колбы и резервуары приборов необходимо изготавливать из пирексового стекла или инертных искусственных материалов; в стандартных приборах Сокслет необходима перепайка бокового сифона в соответствии с заданным соотношением зоны аэрации и попеременного увлажнения.

Изучение скорости растворения пород по трещине можно проводить в аппарате А. Джеймса (см. рис. 13). Все детали этого аппарата - соединения, рабочие трубки, клапаны и резервуар сделаны из нержавеющей стали. Принцип работы прибора заключается в следующем. Раствор заданной концентрации циркулирует по системе обводных труб до тех пор, пока не устанавливается определенная концентрация и соответственно электропроводность. Затем, изменяя положение клапанов, раствор направляют через образец, при этом величина проводимости достигает величины $\sigma_т$. Раствор циркулирует по системе вплоть до момента полного насыщения σ_f. Так как проводимость электролита пропорциональна увеличению в ней концентрации ионов, т.е. растворимости, то скорость растворения можно получить из уравнения $dM/dt = kA(C_3 - C_1)$, где k - скорость растворения, определяемая экспериментально; A - содержание $CaCO_3$ в исходной породе; C_3 - полная насыщенность раствора $CaCO_3$; C_1 - исходная насыщенность раствора $CaCO_3$.

В прибор можно помещать образцы карбонатных пород различного возраста, состава и структурно-текстурного строения. Опыты проводятся с чистой водой или водой, насыщенной CO_2, при скорости течения 0,25 м/с. А.Джеймсом установлено, что в зависимости от ширины трещин и агрессивности раствора скорость растворения пород будет различной, так как расто-

яние, на котором вода насыщается $CaCO_3$, пропорционально скорости растворения.

Используя метод лабораторного моделирования процесса выветривания, возможно приближенно оценить вклад различных факторов в процесс выветривания. Решение этой задачи возможно путем реализации методики дробного факторного эксперимента. Для планирования эксперимента используется метод Бокса - Уилсона. В качестве параметра оптимизации выбирают массу вещества, выносимого из горных пород; из числа факторов, наиболее существенно влияющих на процесс, могут быть взяты: температура (°С); скорость инфильтрации (мл/мин); концентрация CO_2 (мг/л) и др. Методика дробного факторного эксперимента и его возможности подробно рассмотрены в ранее опубликованных работах [27].

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ЭВМ[1]

Физико-химическое моделирование геологических процессов представляет собой метод их изучения путем создания идеальной модели, качественно и количественно описывающей исследуемый процесс (или геологический объект) в соответствии с имеющимися геологическими и геохимическими экспериментальными данными.

Физико-химическое моделирование начинают с построения содержательной модели геологического процесса на основе конкретных геологических наблюдений и экспериментальных геохимических, гидрогеохимических и других данных. Затем проводят анализ возможных химических процессов в рассматриваемой геологической модели и их описание на основе законов термодинамики и химической кинетики. На заключительном этапе физико-химическую модель процесса описывают с помощью системы математических уравнений; выбирают методы и алгоритмы ее решения с целью получения количественных данных об исследуемом геологическом процессе (или объекте). Для описания реального геологического процесса требуется очень сложная физико-химическая модель, включающая несколько десятков, а то и сотен процессов-компонентов. Вследствие этого система математических уравнений становится настолько сложной и громоздкой, что для ее решения требуется применение высокоэффективных вычислительных программ и быстродействующих ЭВМ.

В случае несоответствия результатов численного моделирования имеющимся геохимическим экспериментальным данным необходимо скорректировать физико-химическую или геологическую модель.

В настоящее время все большее распространение получает физико-химическое моделирование геологических процессов,

[1]Раздел написан А.П. Никаноровым.

предусматривающее учет термодинамики и применение современных ЭВМ. Подобное моделирование называют термодинамическим моделированием геологических процессов. Оно позволяет решать многие задачи гидрогеохимии, геотехнологии, инженерной геологии, охраны окружающей среды.

Основные понятия химической термодинамики

Термодинамическая система (или просто система) - это любая область литосферы, выделенная геологическими или операционными границами, в том числе месторождение, участок размещения сооружений и т.д. Рассматриваемая применительно к задачам моделирования система должна состоять из большого количества частиц, т.е. быть макроскопической, так как только макроскопические системы могут быть охарактеризованы такими понятиями, как температура, давление, теплоемкость, теплота.

Открытая система может обмениваться с окружающей средой энергией и веществом.

Закрытая система может обмениваться с окружающей средой энергией, но обмен веществом отсутствует.

Изолированная система не обменивается с окружающей средой ни веществом, ни энергией, и объем ее остается постоянным.

В природе невозможно найти абсолютно изолированную систему. Но на практике часто пренебрегают обменом энергией или веществом, если это допущение сравнительно мало влияет на точность конечного результата.

Система является гомогенной (однородной), если она состоит из одной фазы, и гетерогенной, если состоит из двух или большего числа фаз. Примером гомогенной системы может служить раствор NaCl в воде, гетерогенной - насыщенный раствор кальцита $CaCO_3$ в воде (состоящий из твердой фазы $CaCO_3$ и истинного раствора кальцита в воде), смесь кристаллов кальцита и доломита и т.д.

Всякая система характеризуется совокупностью ее физических и химических свойств, таких как объем, давление, температура, химический состав, масса и др. Благодаря наличию уравнений, связывающих различные свойства системы, для однозначной характеристики ее состояния оказывается достаточным знание не всех свойств, а лишь нескольких из них. Эти свойства выбирают в качестве независимых переменных и называют параметрами состояния системы. Их выбор в каждом конкретном случае определяется соображениями целесообразности. Так, например, в случае идеального газа в качестве параметров состояния могут быть выбраны любые два параметра из трех: давление P, объем V и температура T, так как между

ними существует связь в виде уравнения Менделеева - Клапейрона:

$$PV = nRT,$$

где n - число молей идеального газа, R - универсальная газовая постоянная (8,31441 Дис·град$^{-1}$·г·моль).

Экстенсивные свойства системы (например объем, масса, внутренняя энергия, энтропия, свободная энергия Гиббса системы и т.п.) пропорциональны количеству вещества в системе.

Интенсивные свойства (температура, давление, молярная теплоемкость, молярный объем, химический потенциал компонента и т.п.) не зависят от количества вещества в системе.

Если в системе происходит изменение хотя бы одного из термодинамических свойств, то это значит, что в системе протекает термодинамический процесс. Если, например, наблюдается изменение химического состава системы, то такой термодинамический процесс называется химической реакцией.

Все процессы, встречающиеся в природе, делятся на самопроизвольные и несамопроизвольные. Самопроизвольный процесс протекает спонтанно и не требует затраты энергии извне, например растворение вещества в воде, диффузия газов, переход теплоты от более нагретого тела к телу с более низкой температурой и т.п. Самопроизвольное протекание процессов возможно только в направлении выравнивания интенсивных свойств во всех частях системы, что в конечном счете приводит систему в состояние равновесия. Несамопроизвольные процессы требуют для своего протекания затраты энергии извне.

Равновесное состояние - такое состояние системы, которое сохраняется постоянным во времени. В системе, находящейся в равновесном состоянии, самопроизвольные процессы невозможны.

Независимые компоненты системы - это наименьший набор таких структурных единиц, с помощью которых могут быть составлены химические формулы всех веществ системы. В качестве независимых компонентов выбирают простые и сложные вещества, химические элементы. Так, например, в системе вода - кальцит - углекислый газ в качестве независимых компонентов можно выбрать Ca, C, O, H.

Зависимые компоненты системы - это все вещества, из которых состоит система: ионы или молекулы в водной фазе, образовавшиеся в результате процессов электролитической диссоциации и гидролиза; молекулы веществ в газовой фазе, минералы и вещества, образующие твердую фазу. Химические формулы зависимых компонентов системы должны быть известны и однозначно выражаться набором выбранных независимых компонентов.

На практике нередко встречаются термодинамические системы, находящиеся в изобарно-изотермических условиях (т.е. при постоянных давлении и температуре). В этом случае условием равновесия системы служит минимальное значение изобарно-изотермического потенциала системы или свободной энергии

Гиббса. Ее можно выразить через химические потенциалы зависимых компонентов системы:

$$G_T^P = \sum_i \mu_i \, n_i,$$

где n_i - количество каждого компонента в системе;

$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{P,T,n_j}$ - химический потенциал компонента системы;

в твердой фазе - это изобарно-изотермический потенциал этого вещества: $\mu_i = \Delta G^P_{T,i}$. Этот потенциал характеризует изменение энергии Гиббса при образовании 1 моля вещества из простых веществ при данных давлении и температуре.

Стандартный химический потенциал твердого вещества - это энергия Гиббса образования 1 моля этого вещества из простых веществ при стандартных условиях (P = 0,1 МПа, T = 298,15 K):

$$\mu_i^0 = \Delta G^0_{f,298}.$$

Значение энергии Гиббса образования сложного вещества при любых давлениях и температурах можно вычислить по уравнению:

$$\Delta G_T^P = \Delta G^0_{f,298} - \Delta S^0_{f,298}(T - 298) + \int_{298}^{T} C_P \, dT - T \int_{298}^{T} C_P \, d\ln T + \int_{1}^{P} \Delta V_T \, dP,$$

где T - абсолютная температура; ΔV_T - изменение объема вещества от давления P при температуре T; C_P - теплоемкость вещества; $\Delta S^0_{f,298}$ - энтропия образования сложного вещества из простых веществ при стандартных условиях, вычисляется по стандартным значениям абсолютных энтропий веществ (S^0_{298}).

Например, для кальцита

$$\Delta S^0_{f,298}\,(CaCO_3) = S^0_{298}\,(CaCO_3) - S^0_{298}\,(Ca) - S^0_{298}\,(C) - {}^3/_2\, S^0_{298}\,(O_2).$$

Зависимость теплоемкости вещества C_P от температуры описывается эмпирическими интерполяционными уравнениями, например

$$C_P = a + bT - \frac{c}{T^2},$$

где a, c, b - коэффициенты, приводимые в справочниках термодинамических свойств.

Изменение объема твердого вещества не зависит от давления при $P < 10$ МПа и его можно считать равным молярному объему при стандартных условиях. Он может быть вычислен по уравнению $V_m = M/\rho$, где M - молярная масса вещества; ρ - плотность.

Химический потенциал компонента системы, находящегося в жидкой или газообразной фазе,

$$\mu_j = \mu_j^0 + RT \ln a_j = \mu_j^0 + RT \ln(\gamma_j x_j / \sum_j x_j),$$

где $\mu_j^0 = \Delta G_T^0$ - стандартный химический потенциал компонента в растворе при заданной температуре и давлении $1 \cdot 10^5$ Па; в стандартном состоянии активность компонента в растворе равна 1; a_j - активность компонента; R - универсальная газовая постоянная; γ_j - коэффициент активности, характеризующий отклонение свойств вещества в реальных условиях от свойств этого вещества в стандартном состоянии.

Расчет равновесного состава сложных гидрогеохимических систем методов минимизации свободной энергии Гиббса

Большинство задач гидрогеохимии, геотехнологии, инженерной геологии и т.п., связанных с изучением перехода веществ путем физико-химических процессов между твердой, жидкой и газовой фазами, сводится к определению количественного равновесного состава твердой, жидкой и газовой фаз. Эту задачу можно решить методом минимизации свободной энергии Гиббса системы с применением быстродействующих ЭВМ.

Постановка задачи. Рассмотрим сложную гетерогенную систему, состоящую из N компонентов водного раствора и P фаз. Обозначим j - номер компонента раствора ($1 \le j \le N$), а p - номер фазы ($1 \le p \le P$). Пусть водный раствор является фазой № 1. Вода - последний компонент водной фазы ($j_{H_2O} = N$). Твердые фазы, которых может быть несколько, могут растворяться или выпадать в осадок, при этом концентрации компонентов в растворе будут изменяться, а следовательно, будут меняться химические потенциалы зависимых компонентов системы до тех пор, пока не наступит термодинамическое равновесие. Состоянию равновесия системы будут отвечать такие количества компонентов водной фазы x_j и веществ в твердых фазах x_P, при которых энергия Гиббса системы будет иметь минимальное значение (при постоянных давлении и температуре):

$$G_T^P = \sum_{j=1}^{N} x_j \left(\mu_j + RT \ln \frac{x_j}{x_1} + RT \ln \gamma_j\right) + \sum_{P=2}^{P} \mu_P x_P, \quad (3)$$

где μ_j, μ_P - химические потенциалы компонента соответственно в растворе и твердой фазе при заданных давлении и температуре; γ_j - коэффициент активности компонента j в растворе; R - универсальная газовая постоянная. Общее количество вещества в водной фазе

$$x_1 = \sum_{j=1}^{N} x_j. \quad (4)$$

Запишем систему уравнений баланса масс в виде:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j + \sum_{P=2}^{P} a_{i,l} x_P = b_i \ (i = 1,2,\ldots, I;$$

$$l = N + P - 1). \quad (5)$$

Здесь I - число независимых компонентов системы; i - номер независимого компонента; a_{ij} - число молей независимого компонента в растворе j; $a_{i,l}$ - число молей независимого компонента i в твердой фазе $P = l + 1 - N(N + 1 \le l \le N + P - 1)$; b_i - общее начальное количество независимого i компонента в системе.

Каждое из уравнений (5) является уравнением материального баланса для одного из независимых компонентов термодинамической системы.

Сформулируем функционал, как это делают в методе неопределенных множителей Лагранжа:

$$\Phi(x_j; x_P; u_i) = \frac{G_T^0}{RT} + \sum_{i=1}^{I} u_i \left[b_i - \sum_{j=1}^{N} a_{i,j} x_j - \sum_{P=2}^{P} a_{i,l} x_P\right], \quad (6)$$

где u_i - множители Лагранжа.

Задача нахождения равновесного состава системы путем минимизации энергии Гиббса (3) при ограничениях (4) и (5) сводится к нахождению минимума функционала (6), где все x_i и x_P могут рассматриваться как независимые переменные.

Введем обозначения $\mu_j/RT = z_j$ и $\mu_p/RT = z_p$ и назовем их приведенными химическими потенциалами. Будем пока считать, что раствор идеальный, т.е. $\gamma_j = 1$.

Из условия минимума функции

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_j}\right)_{x_p, u_i} = z_j + \ln \frac{x_j}{x_1} - \sum_{i=1}^{I} u_i a_{ij} = 0$$

получим

$$x_j = x_1 \exp\left(-z_j + \sum_{i=1}^{I} a_{ij} u_i\right). \qquad (7)$$

Из соотношения (7) видно, что множители Лагранжа u_i могут интерпретироваться как приведенные химические потенциалы независимых компонентов системы. Обычное условие равновесия в виде равенства химических потенциалов компонентов в разных фазах здесь эквивалентно равенству химических потенциалов независимых компонентов во всех зависимых компонентах системы.

Суммируя левую и правую части уравнения (7) и учитывая (4), получим:

$$\sum_{j=1}^{N} \exp\left(-z_j + \sum_{i=1}^{I} a_{ij} u_i\right) = 1,$$

т.е. сумма мольных долей компонентов водной фазы равна 1.

Аналогично из условия минимума функции получим

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_p}\right)_{x_j u_i} = z_p - \sum_{i=1}^{I} a_{il} u_i = 0.$$

Таким образом, задача нахождения равновесного состава термодинамической системы сводится к решению следующей системы $[I + P]$ уравнений относительно независимых переменных u_i и x_p - уравнения баланса масс, полученные подстановкой (7) в (5):

$$x_I \sum_{j=1}^{N} a_{ij} \exp\left(-z_j + \sum_{i=1}^{I} a_{ij} u_i\right) + \sum_{P=2}^{P} a_{il} x_p = b_i; \qquad (8)$$

уравнения для суммы концентраций компонентов водной фазы:

$$\sum_{i=1}^{N} \exp\left(-z_j + \sum_{i=1}^{I} a_{ij} u_i\right) = 1; \qquad (9)$$

P-I уравнений для химических потенциалов однокомпонентных фаз

$$-z_p + \sum_{i=1}^{I} a_{il} u_i = 0. \qquad (10)$$

Решение этой системы нелинейных уравнений (8)-(10) можно провести методом Ньютона (или методом итераций). Математические подробности этого решения приведены в работе [1].

Учет неидеальности раствора. В результате расчетов получены равновесные концентрации компонентов раствора и количества веществ в фазах в предположении, что раствор ведет себя как идеальный, т.е. коэффициенты активности компонентов водного раствора γ_j принимались равными 1. Для того чтобы учесть неидеальность раствора, необходимо вычислить коэффициенты активности компонентов раствора. Это можно сделать, например, с помощью формулы Дебая - Хюккеля:

$$\lg \gamma_j = -\frac{A Q_j^2 \sqrt{I}}{1 + r_j B \sqrt{I}} + CI, \qquad (11)$$

где Q_j, r_j - соответственно заряд и "радиус" j компонента раствора; A, B - эмпирические параметры Дебая - Хюккеля, характеризующие растворитель (для воды при стандартных условиях $A = 0{,}5098$, $B = 0{,}3284$ [17]; C - эмпирический параметр, характеризующий данный электролит (во многих случаях принимаемый равным 0,05); $I = 0{,}5 \sum_{j=1}^{N-1} Q_j^2 m_j$ - ионная сила раствора; m_j - моляльная концентрация компонента j в растворе (моль/1000 г H_2O).

Из уравнения (3) видно, что учет неидеальности раствора соответствует модификации химических потенциалов компонентов раствора:

$$\mu_j + RT \ln \frac{x_j}{x_1} + RT \ln \gamma_j = \mu'_j + RT \ln \frac{x_j}{x_1},$$

где $\mu'_j = \mu_j + RT \ln \gamma_j$ - модифицированный химический потенциал компонента j. Далее проводится решение системы уравнений (8)

- (10) с учетом модифицированных химических потенциалов. Эту процедуру ("Дебай") мы рекомендуем выполнять после решения системы уравнений (8) - (10) методом Ньютона. Процедуру "Дебай" проводят до тех пор, пока значение ионной силы раствора не перестанет изменяться.

Учет окислительно-восстановительных процессов. Так как в ходе процесса выветривания идет окислительно-восстановительная реакция, то независимые компоненты имеют различную степень окисления в различных зависимых компонентах (например, Fe - независимый компонент может быть в растворе в виде Fe^{2+} и Fe^{3+}). Вследствие этого в систему уравнений необходимо ввести уравнение электронейтральности (баланс заряда). Это делают, вводя новый независимый компонент - электрон (e) и соответствующую ему новую независимую переменную u_e. Тогда ион железа Fe^{2+} будет иметь вид составной частицы $Fe^{3+} \cdot e$. Равновесное значение u_e, отвечающее решению системы (7), имеет ясный физический смысл. Оно характеризует окислительно-восстановительный потенциал системы *Eh*:

$$Eh = \frac{RT}{F} u_e,$$

где R - универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура; F - число Фарадея (96484,6).

Вычислительная программа для персональных ЭВМ. Задача расчета гетерогенных равновесий в сложных гидрогеохимических системах реализована в виде действующей программы "Баланс", разработанной на кафедре химии Московского геологоразведочного института. Программа "Баланс" написана на языке ФОРТРАН-4 и реализована на микроЭВМ ДВК-2. Для получения большей точности результата программа оперирует переменными двойной точности. Объем занимаемой оперативной памяти 35 Кбайт. Программа позволяет рассчитывать равновесия в системах с числом независимых компонентов $I \leq 15$, компонентов водной фазы $N \leq 60$, числом твердых и газообразных фаз $p \leq 15$. Время расчета зависит от сложности системы. Например, при $I = 8$, $N = 30$ и $p = 8$ время расчета составляет около 15 с. Ограничение на сложность системы связано с размером оперативной памяти у ДВК-2 (которая составляет 64 Кбайта). Это ограничение может быть снято, если использовать персональную ЭВМ (или большую ЭВМ) с большей оперативной памятью. Программа "Баланс" легко может быть адаптирована на любую ЭВМ. Существуют и другие программы расчета равновесий в сложных гетерогенных системах: "Селектор" и "GIBBS" для ЕС-ЭВМ. Эти программы реализованы на макроЭВМ и у них нет ограничений, связанных с объемом оперативной памяти. Однако, преимуществом программы "Баланс" является возможность работы с машиной в диалоговом режиме. В процессе расчетов можно оперативно менять исходные данные: физико-химическую модель,

термодинамические данные, начальные условия и т.д. С помощью программы "Баланс" можно решать, например, такие задачи, как расчет равновесного состава системы с заданным химическим составом, включающей твердую, жидкую и газовую фазы; состава растворов, насыщенных относительно заданной ассоциации твердых фаз; степени насыщения природных вод относительно заданной ассоциации минералов; форм нахождения химических элементов в природных водах; растворимости различных минералов и минеральных ассоциаций при заданных давлениях и температурах и др. Наиболее важной и интенсивно развивающейся областью применения расчета равновесий в сложных геологических системах является моделирование геохимических процессов.

Физико-химическое моделирование растворения карбонатных пород водами различного химического состава

В практике инженерно-геологических работ часто приходится решать задачи прогноза развития процесса выветривания под влиянием природных или техногенных факторов. Один из методов решения таких задач - численное физико-химическое моделирование процесса растворения карбонатных пород на ЭВМ.

Физико-химическое моделирование процесса растворения породы начинают с анализа растворимости минералов (конгруэнтного, инконгруэнтного, растворения с разложением), составляющих породу, и выбора возможных компонентов твердой, жидкой и газообразной фаз.

Для расчета по программе "Баланс" необходимо подготовить следующие данные.

1. Набор независимых компонентов системы.

2. Набор зависимых компонентов системы - возможных ионов, молекул, комплексных ионов, водного раствора возможных минералов и газов.

3. Изобарно-изотермические потенциалы образования зависимых компонентов системы при заданных температуре и давлении.

4. Значения эмпирических коэффициентов A, B и C и радиусов ионов в уравнении Дебая - Хюккеля. Решение задачи сводится к решению следующей системы уравнений. I уравнение баланса масс:

$$x_1 \sum_{j=1}^{N} a_{ij} \exp\left(-z_j + \sum_{i=1}^{I} a_{ij} u_i\right) + \sum_{P=2}^{P} a_{i_1 l} x_P = b_i;$$

II уравнение суммы концентраций компонентов водной фазы:

$$\sum_{j=1}^{N} \exp\left(-z_j + \sum_{i=1}^{I} a_{ij}\, u_i\right) = 1;$$

III уравнение химических потенциалов однокомпонентных фаз:

$$-z_P + \sum_{i=1}^{N} a_{i_1 l}\, u_i = 0,$$

где a_i - активность компонента; $a_{i_1 l}$ - число молей независимого компонента i в твердой фазе P; b_i - общее начальное

Таблица 11

Компоненты системы известняк – доломит – вода

Компонент	Независимые компоненты					Приведенные потенциалы Гиббса $z^{\circ}_{298} = \frac{\Delta G^{\circ}_{f,298}}{R \cdot 298{,}15}$	Заряд иона Q	Радиус иона $r \cdot 10^{-1}$, нм
	Ca	Mg	C	O	H			
Водная фаза								
H^+	0	0	0	0	1	0	1	9
OH^-	0	0	0	1	1	−63,45	−1	3,5
Ca^{2+}	1	0	0	0	0	−223,00	2	6
$CaOH^+$	1	0	0	1	1	−289,08	1	4,5
$CaHCO_3^+$	1	0	1	3	1	−462,57	1	4,5
$CaCO_3^0$	1	0	1	3	0	−443,37	0	4,5
Mg^{2+}	0	1	0	0	0	−184,49	2	8
$MgOH^+$	0	1	0	1	1	−253,02	1	4,5
$MgHCO_3^+$	0	1	1	3	1	−423,69	1	4,5
$MgCO_3^0$	0	1	1	3	0	−404,31	0	4,5
$H_2CO_3^0$	0	0	1	3	2	−251,37	0	4,5
HCO_3^-	0	0	1	3	1	−236,74	−1	4
CO_3^{2-}	0	0	1	3	0	−212,96	−2	4,5
H_2O	0	0	0	1	2	−95,67	–	–
Твердая и газовая фазы								
$CaCO_3$, к	1	0	1	3	0	−455,38	–	–
$CaMg(CO_3)_2$, к	1	1	2	6	0	−874,19	–	–
CO_2, газ	0	0	1	2	0	−159,09	–	–

Таблица 12

Равновесные концентрации компонентов (в моль/ л H_2O) при стандартных условиях

Компонент	Система		
	$CaCO_3 - H_2O$	$CaMg(CO_3)_2 - H_2O$	$CaCO_3 - CaMg(CO_3)_2 - H_2O$
Водная фаза			
H^+	1,231−10	1,343−10	1,183−10
OH^-	8,638−0,5	7,898−05	8,998−05
Ca^{2+}	1,223−04	5,440−05	1,129−04
$CaOH^+$	1,339−07	5,471−08	1,284−07
$CaHCO_3^+$	1,634−07	6,727−08	1,570−07
$CaCO_3^0$	6,083−06	2,296−06	6,083−06
Mg^{2+}	–	5,480−05	1,621−05
$MgOH^+$	–	6,392−07	2,138−06
$MgHCO_3^+$	–	4,686−08	1,559−08
$MgCO_3^0$	–	1,336−06	5,044−07
$H_2CO_3^0$	1,293−08	2,311−08	2,298−08
HCO_3^-	8,631−05	7,952−05	9,010−05
CO_3^{2-}	3,612−05	3,035−05	3,933−05
pH	9,910	9,872	9,927
Твердая и газовая фазы			
$CaCO_3$, к	1,287−04	0	1,023−04
$CaMg(CO_3)_2$, к	0	5,682−05	1,694−05
CO_2, газ	0	0	0

количество независимого i-компонента в системе; i - номер независимого компонента; I - число независимых компонентов; a_{ij} - число молей независимого компонента i в растворе j; $z_j = M_j/RT$; $z_P = M_P/RT$; M_j, M_P - химические потенциалы компонентов в растворе и твердой фазе при заданном давлении P и температуре T соответственно; R - газовая постоянная; u_i - множители Лагранжа (приведенные химические потенциалы независимых компонентов системы).

В системе $CaCO_3$ - $CaMg(CO_3)_2$ - H_2O и $CaMg(CO_3)_2$ - H_2O можно выбрать в качестве независимых компонентов - Ca, Mg, C, O, H; возможных компонентов водного раствора - ионы H+, OH-, Ca2+, Mg2+, CaOH+, MgOH+, $CaHCO_3$+, $MgHCO_3$+, HCO3-,

CO_3^{2-} и молекулы $CaCO_3^0$, $MgCO_3^0$, $H_2CO_3^0$, H_2O; в качестве твердых фаз - $CaCO_3$ и $CaMg(CO_3)_2$ (табл. 11). Результаты расчетов по программе "Баланс" показали, что растворимость в воде кальцита выше растворимости доломита приблизительно в 2,3 раза (табл. 12). В случае, если порода состоит из кальцита и доломита, растворимость кальцита в такой породе становится в 6 раз выше, чем доломита. Вынос массы вещества из породы, состоящей из кальцита - 12,88 мг/кг H_2O; из доломита - 10,45 мг/кг H_2O; из кальцита + доломита - 13,36 мг/кг H_2O. Расчеты показали, что при растворении карбонатных пород в чистой воде углекислый газ не выделяется.

Исследование влияния углекислого газа, растворов уксусной, азотной и серной кислот на растворимость карбонатных пород

Карбонатные породы увеличивают свою растворимость в водах, насыщенных углекислым газом и содержащих органические и неорганические кислоты. По программе "Баланс" была рассчитана растворимость породы в водных растворах CO_2, H_2SO_4,

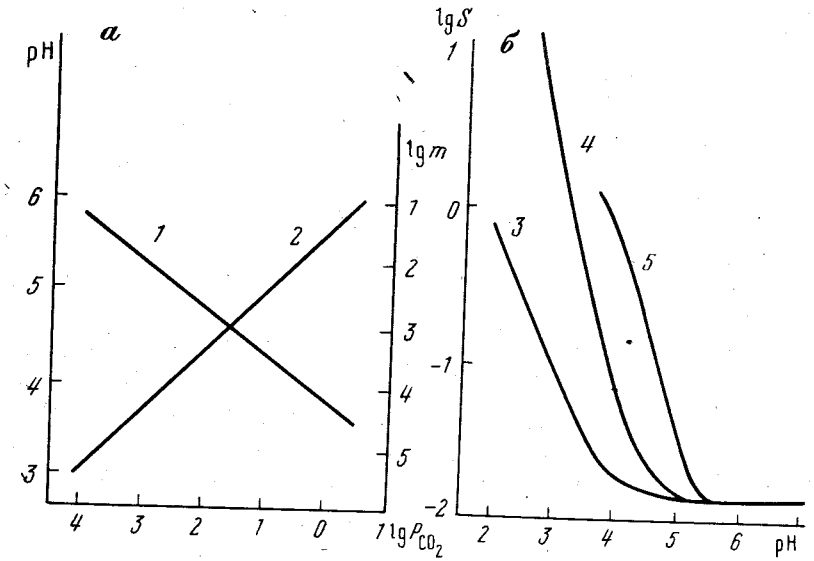
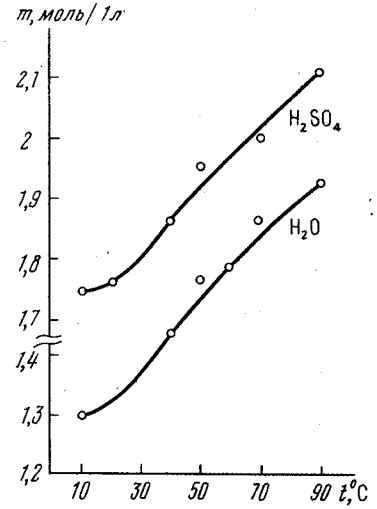


Рис. 17. Зависимость растворимости CO_2 и pH раствора от парциального давления CO_2 (*а*) и растворимости породы, состоящей из кальцита и доломита в водных растворах от начального pH (*б*):

1 – CO_2; *2* – pH; *водные растворы: 3* – HNO_3, H_2SO_4; *4* – CH_3COOH, *5* – CO_2

Рис. 18. Изменение растворимости карбонатных пород в воде и водном растворе H_2SO_4 в зависимости от температуры жидкой фазы



HNO_3 и CH_3COOH при различных начальных pH исходных растворов.

Результаты предварительно проведенных расчетов по растворимости CO_2 в воде и pH получаемого раствора в зависимости от парциального давления углекислого газа приведены на рис. 17.

К системе $CaCO_3$ - $CaMg(CO_3)_2$ - CH_3COOH - H_2O добавлялись в качестве независимого компонента CH_3COO и компонент водной фазы CH_3COOH (z^0_{298} = -10,951). В систему $CaCO_3$ - $CaMg(CO_3)_2$ - HNO_3 - H_2O добавлялся компонент NO_3 и компонент водной фазы NO_3 (z^0_{298} = -44,95). В системе $CaCO_3$ - $CaMg(CO_3)_2$ - HSO_4 - H_2O к независимым компонентам добавлен SO_4, а к компонентам водной фазы - $CaSO_4^0$, $MgSO_4^0$, HSO_4^- и SO_4^{2-}.

Результаты расчетов приведены на рис. 18. Они показывают, что растворимость карбонатных пород одинакова в растворах азотной и серной кислот и сильно возрастает при участии органических при прочих равных условиях (одинаковом исходном значении pH воздействующих растворов).

Данные термодинамического моделирования совпадают с результатами лабораторного вещественного моделирования. Их можно использовать при прогнозе развития процесса выветривания в ходе техногенных воздействий.

Глава 5

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О КОРЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ И ПРОЦЕССЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ КАРТ *TWK*

Результаты изучения кор выветривания должны быть глубоко и всесторонне проанализированы для получения представлений об основных этапах корообразования, возрасте кор выветривания и их пространственном размещении; зональности их строения; составе, структурно-текстурных особенностях и свойствах слагающих их пород. Анализ результатов региональных исследований предполагает использование специальных инженерно-геологических карт, в частности *TWK* кор выветривания.

В качестве примера ниже приводится опыт подобного обобщения материалов о корах выветривания пород территории острова Шри-Ланка.

Шри-Ланка - один из островов Индийского океана, расположенный между 5 и 10° с.ш. Несмотря на сравнительно небольшую площадь (около 66 тыс.км^2), для него характерны большое разнообразие рельефа, значительные изменения количества и распределения атмосферных осадков и температур воздуха. Центральная часть острова гористая с отдельными вершинами от 915 до 2524 м (г. Пудуруталагала). Низменные равнины, опоясывающие горную часть, простираются до берегов океана. Речная сеть тесно связана с локальной и региональной структурами. Почти все 72 реки острова, в том числе и самая крупная р. Махавелли, берут начало в центре горной страны.

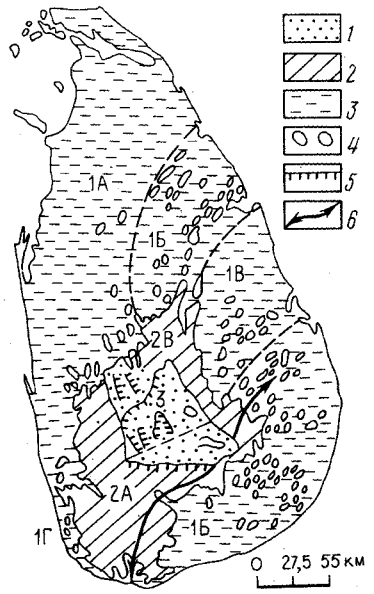
Климат Шри-Ланки влажный, тропический. Различия температурного режима областей (северное побережье 28-33° С, центральная часть - менее 15° С, юго-восточная - 26° С) обусловлены характером рельефа. Количество атмосферных осадков колеблется от 1000 до 4000 мм в год и более; чередование сухих и влажных муссонов предопределяет наличие сухого (3-4 мес.) и влажного (6-7 мес.) сезонов.

Структурные и морфологические данные, несомненно, свидетельствуют о том, что формирование главных денудационных поверхностей и поверхностей выравнивания происходило за счет дифференцированных воздыманий территории и эрозии коренных пород в течение всей истории геологического развития вплоть до настоящего времени.

На основании анализа высот Д.Вадием выдвинута гипотеза о блоковых поднятиях, приведших к образованию поверхностей

Рис. 19. Схематическая морфоструктурная карта Шри-Ланки (по П. Витанге, 1970):

1 – высокогорье, абс. отм. более 1000 м; *2* – нагорье, абс. отм. 300–1000 м; *3* – низменности, абс. отм. 0–300 м; *4* – эрозионные останцы; *5* – крупные уступы; *6* – максимальная ось поднятия территории; *морфоструктурные районы:* 1А – северо-западная низменность, приподнятые пляжи, пологие равнины; 1Б – северо-восточная, восточная, юго-восточная низменности с хребтами и эрозионными останцами; 1В – речные террасы рек Махавелли и Мадуру; 1Г – пологие приобрежные равнины юго-запада; 2А – южное нагорье; 2Б – хребты Сабарагамуба; 2В – нагорье Матале-Дамбулла; 3 – высокогорье



выравнивания на абсолютных отметках 30, 90 и 120 м; 720, 1500 и 1800 м.

Современный рельеф можно подразделить на три морфоструктуры области - низменности, нагорья и высокогорье (рис. 19).

Высокогорье занимает центральную часть острова и состоит из серии четко выраженных плато (позднеюрских пенепленов на абс.отм. 1500 и 1800 м, с реликтами латеритных кор выветривания), окруженных вершинами гор с абс.отм. до 2524 м.

Нагорья (абс.отм. 300-1000 м) занимают юго-западную и центральную части острова (около 30% территории) и характеризуются сложным рельефом; сюда входят изрезанное узкими долинами южное нагорье, юго-западные хребты Сабарагамуба, нагорье Матале-Дамбулла с поверхностями выравнивания на абс.отм. 720 м.

Низменности занимают более половины площади территории острова. Прибрежные равнины (абс.отм. 30-50 м), протягиваясь в виде узкой 4-километровой полосы на юге, расширяются к северу, переходя в обширную равнину, простирающуюся от западного до восточного побережья. На северо-западе прослеживаются поверхности выравнивания (абс.отм. 30 м), сложенные " красными землями"; на юго-западе, в глубине острова, - пенепленизированные останцы (абс. отм. 120 м) с латеритовыми шляпами в форме "спины черепахи".

Для восточных и юго-восточных районов острова характерно широкое развитие цокольно-денудационных равнин, переходящих

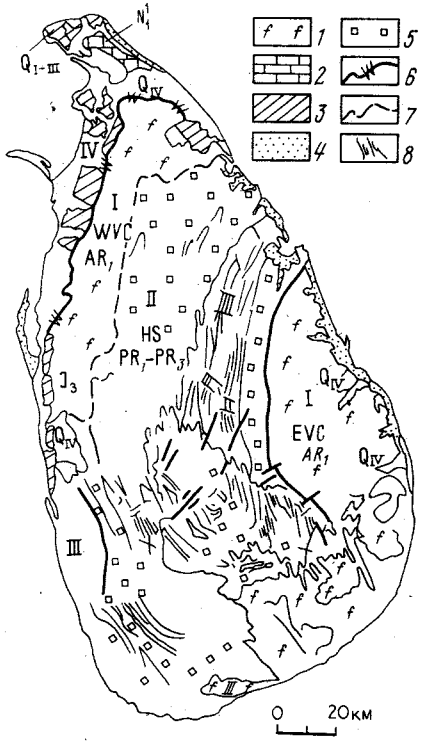


Рис. 20. Геологическая карта Шри-Ланки:

1 – породы амфиболитовой фации; *2* – известняки; *3* – красные земли; *4* – песчаные пляжевые, дюнные отложения; *5* – метаморфические породы; *6* – граница Полкского грабена; *7* – крупные тектонические разломы; *8* – зоны повышенной трещиноватости; I – древняя Индостанская платформа, сложная куполовидная тектоническая структура, комплекс Виджаян; II – протерозойский авлакоген юго-западного простирания, линейный пояс серии Хайленд; III – протерозойский авлакоген северо-западного простирания, линейный комплекс серии Хайленд; IV – молодая мезо-кайнозойская платформа, граничащая с Полкским грабеном

у подножья возвышенностей в эрозионно-аккумулятивные и прослеживающихся до абс.отм. 300 м.

Большая часть (90%) территории Шри-Ланки сложена докембрийскими кристаллическими породами (идентичными додахарварскому комплексу пород южной части Индостанского щита), в течение длительного времени подвергавшимися выветриванию и многократному изменению. Остальная часть территории (в основном северо-западное побережье) сложена верхнеюрскими, нижнемиоценовыми и четвертичными отложениями.

П.Курея впервые выделил две крупные докембрийские толщи, отличающиеся по тектоническому строению и петрологии: серию Хайленд (Highland), занимающую центральную часть острова и комплекс Виджаян (Vidgine) - восточный (EVC) и западный (WVC) (рис. 20). Контакты этих толщ нечеткие. Ряд исследователей (М.Катц, Ж.Котс, Д.Вадий) [19] считает, что комплекс Виджаян служит основанием серии Хайленд, а исходным материалом для них явились осадки протогеосинклинального типа. Серия Хайленд (HS) представлена гиперстеновыми гнейсами (чарнокитами), гранат-силлиманитовыми гнейсами (кондалитами), гранулитами, кварцитами, кальцифирами с пачками мраморизованных известняков.

Восточный комплекс Виджаян (EVC) состоит из монотонных однородных кварц-полевошпатовых (микроклинсодержащих) гнейсов, биотит-роговообманковых гнейсов с темными прослоями амфиболитов. В западном комплексе Виджаян (WVC) преобладают мигматизированные розовые кварц-полевошпатовые гранито-гнейсы.

В региональном плане тектоническая структура докембрия о.Шри-Ланка представляет собой сочленение Восточно-Гатского пояса и юго-западного пояса Керала Южной Индии, отделенное от нее в эоцене Полкским грабеном (рифтом) (В.Е. Хаин, 1979; К.Кришнан, 1968; М.Катц, 1978). В пределах острова выделяются:

1) древняя Южно-Индостанская платформа, сложенная архейскими метаморфическими породами комплекса Виджаян субмеридионального простирания на севере и осложненная куполовидными структурами на востоке;

2) протерозойский авлакоген северо-северо-западного простирания (продолжение Восточно-Гатского пояса), линейный пояс серии Хайленд;

3) протерозойский авлакоген юго западного простирания (продолжение юго-западного пояса Керала), линейный пояс серии Хайленд;

4) молодая мезо-кайнозойская платформа, граничащая с Полкским грабеном.

В докембрийской толще широко распространены различные разрывные нарушения - разломы, зоны дробления, смятия, рассланцевания. Данные аэромагнитной съемки позволяют предположить существование трех мегалинеаментов - Кала-Оя (K-O), Матера (M) и Ратнатура (Rt), совпадающих с южно-индийскими при условии перемещения блока Шри-Ланки вдоль протокраевого сброса (рис. 21). В пределах острова выявлены две крупные зоны скалывания (дробления): меридионального направления - MSL (вдоль р. Махавелли, длиной 65 км) и широтного (по линии г. Кимбулантота - г. Минипе, 20 км). В северных и северо-западных районах известны системы взаимопересекающихся сдвиг-сбросовых разломов (северо-северо-западного и северо-восточного направлений) с амплитудой смещения до 1 км.

В истории геологического развития выделяют несколько этапов формирования Шри-Ланки: первоначально - как части Индостанского субконтинента, а затем - как самостоятельной структуры.

К середине раннеархейского этапа закончился цикл метаморфизма и гранитизации; сформировалось древнейшее гнейсовое основание Южно-Индостанской платформы. К концу этого этапа платформа находилась в приподнятом положении и подвергалась интенсивному докембрийскому выветриванию и денудации.

В позднеархейский этап в земной коре в основном действовали силы растяжения, приведшие к образованию архейских мегалинеаментов северо-восточного и северо-западного направле-

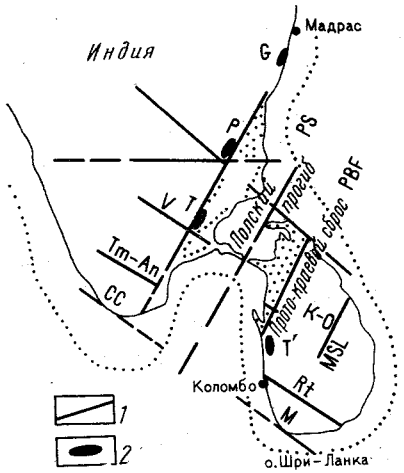


Рис. 21. Схематическая тектоническая карта южного Индостана (по Н.А. Еременко, П.В. Витанга):

1 – древние докембрийские разломы; 2 – "тройные узловые точки"

ний и авлакогена Восточный Гаты - Хайленд, в настоящее время четко ограниченного зонами скалывания Махавелли (MSL) и Ян-Ойя (JSL).

В раннепротерозойский этап происходили осадконакопление в авлакогене, две стадии метаморфизма, формирование складчатых структур Хайленда.

В венд-раннекарбоновый этап Южно-Индостанская платформа испытывала общее поднятие, сопровождавшееся процессами регрессивного метаморфизма, орогенеза, внедрением мелких интрузий. К концу этого периода территория Шри-Ланки являлась часть огромного континента Гондвана. Палеомагнитные данные свидетельствуют, что он находился до среднего триаса в южном полушарии и с позднего карбона был охвачен гигантским оледенением, носившим на Индостане полупокровный характер. В этот период кристаллические породы, слагающие верхнюю часть разреза материака, подвергались выветриванию и эрозионно-денудационным процессам. Нивальный климат способствовал развитию процессов физического разрушения и формированию палеозойской коры выветривания.

Позднетриасовый-раннемеловой этап явился началом образования внутри материка протокраевых прогибов с одновременным воздыманием территории вдоль одного из них - Полкского (PS). Остров отстает от Индостана примерно на 200 км; в пределах Полкского протокраевого прогиба накапливались морские отложения. К концу этапа интенсивность поднятия центральной части острова увеличилась, а большинство периферийных районов было покрыто морем. Эрозионно-денудационные процессы разрушали палеозойскую кору выветривания с последующим переотложением ее в низменных частях - сбросовых впадинах. Климат района, по фаунистическим данным морских отложений (J_3), становится умеренно-влажным.

В начале позднемелового - ранненеогенового этапа, по данным палеомагнитных аномалий, Южно-Индийская платформа пересекла экватор и оказалась в северном полушарии. В этот период, вплоть до олигоцена, продолжалось отделение острова Шри-Ланка от южного Индостана. Оно сопровождалось "омоложением" древних докембрийских разломов, интенсивным поднятием центральной части острова, накоплением мелководных морских осадков мелового, палеогенового и миоценового возраста мощностью до 2100 м в Полкском прогибе.

Установившийся к позднему мелу тропический климат обусловил формирование латеритных и мощных линейных кор выветривания, сохранившихся до настоящего времени на пенепленизированных поверхностях нагорий (абс.отм. 750 м) и высокогорий (абс.отм. 1500 и 1800 м).

Поздненеогеновый-четвертичный этап начался общим воздыманием территории, которое сопровождалось выветриванием и пенепленизацией кристаллических (абс.отм. 120, 90 м) и осадочных (абс.отм. 30 м) пород. В конце неогена произошла относительная стабилизация территории в геолого-тектоническом отношении. С раннечетвертичного периода и до настоящего времени проявляются неотектонические движения. Климат острова остается тропическим, близким к современному. В особенно благоприятных условиях (юго-западная часть территории) образовались наиболее проработанные коры с мощностью кирасы до 7 м.

Таким образом, на протяжении истории геологического развития территории Шри-Ланки можно выделить следующие периоды корообразования:

докембрийский - кора выветривания гнейсов серии Виджаян явилась источником материала при формировании пород серии Хайленд;

палеозойский - переотложенная кора выветривания залегает в юрских впадинах;

мезо-кайнозойский - кора выветривания сохранилась в виде останцов высокогорных пенепленов в центральной и юго-западной частях острова;

олигоценовый - остаточная кора выветривания распространена на холмистых цокольно-денудационных равнинах;

четвертичный - кора выветривания ("красные земли") распространена в северо-западной части острова.

В соответствии с особенностями структурно-тектонического, геологического, геоморфологического и гидрогеологического строения и характера развития ЭГП территория острова Шри-Ланка может быть подразделена на четыре инженерно-геологические области, районы и подрайоны (рис. 22).

Область I - древняя Южно-Индостанская платформа, сложенная архейскими метаморфическими породами; по составу пород и характеру рельефа подразделена на два района.

I-А - покрытые лесными массивами низменные платообразные

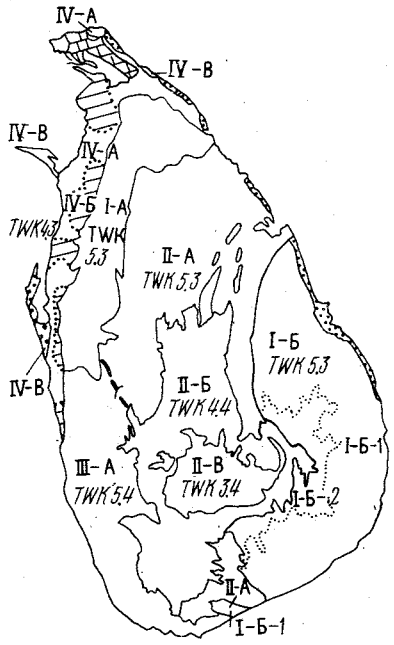


Рис. 22. Карта инженерно-геологического районирования территории острова Шри-Ланки и *TWK* кор выветривания (по Н. Ранатунга, 1985 г. с дополнениями Л.А. Ярг).

Область I – древняя Индостанская платформа, сложенная архейским комплексом Виджаян: I-А – северо-западные низменные платообразные равнины (абс. отм. до 50 м); I-Б – юго-восточные и восточные низменности (абс. отм. до 150 м) и нагорья (абс. отм. до 300 м). *Область* II – протерозойский авлакоген северо-восточного простирания, линейный пояс серии Хайленд: II-А – холмистая равнина эрозионно-денудационного происхождения (абс. отм. 300 м); II-Б – нагорья с крайне сложным расчлененным рельефом эрозионно-тектонического происхождения (абс. отм. 300–1500 м); II-В – высокогорье (тип гор – тектонический блоково-моноклинальный, сводово-глыбовый). *Область* III – протерозойский авлакоген северо-западного простирания, линейный пояс серии Хайленд: III-А – низкогорный рельеф (абс. отм. до 150 м), район распространения латеритных кор выветривания. *Область* IV – молодая мезозойская платформа с мощностью осадочного чехла до 200 м, сложенного миоценовыми известняками: IV-А – северо-восточная низменность, включающая п-ов Жаффна; IV-Б – пенепленизированные останцы; IV-В – пляжи

равнины цокольно-денудационного происхождения; сложены породами западного комплекса Виджаян (WVC) - гранитогнейсами и биотит-роговообманковыми гнейсами субмеридионального простирания; с поверхности перекрыты каолиновыми корами выветривания мощностью до 30 м, разрез которых представлен дисперсной и щебнисто-глыбовой зонами.

I-Б - районы распространения метаморфических пород восточной серии Виджаян (EVC) - биотит-роговообманковых гнейсов, кварц-полевошпатовых гранитогнейсов; делится на два подрайона: I-Б-1 - юго-восточная и восточная низменности (абс. отм. до 150 м) с многочисленными эрозионными останцами (абс.отм. 550-685 м), платообразные эрозионно-аккумулятивные и цокольно-денудационные равнины; I-Б-2 - предгорный расчлененный рельеф - нагорья (абс.отм. 150-300 м) с горными хребтами и узкими долинами. ЭГП: выветривание, эрозия, морская абразия, оползни.

Область II - протерозойский авлакоген северо-северо-восточного простирания (продолжение Восточно-Гатского пояса

Южной Индии), сложенный протерозойскими метаморфическими породами серии Хайленд, делится на три района.

II-А - северная, северо-восточная и южная части острова, холмистая равнина с абс.отм. до 300 м эрозионно-денудационного происхождения с мягкими формами рельефа, покрытая лесными массивами, с низкими параллельными уступами и хребтами, отдельные вершины которых достигают абс.отм. 766 м. Грунтовые воды залегают на глубине 3-10 м, имеются термальные источники. ЭГП представлены современным выветриванием, карстом, плоскостным сплывом, морской абразией вдоль северо-восточной береговой линии.

II-Б - юго-западное, западное, восточное и центральное нагорья, с крайне сложным глубоко расчлененным рельефом с абс.отм. 300-1500 м; тип горных сооружений - эрозионно-тектонический; породы серии Хайленд смяты в складки, в северных частях - субмеридионального, в юго-восточных - субширотного простирания. Набор ЭГП включает выветривание, карст, оползни, обвалы.

II-В - горный рельеф, сформированный в условиях интенсивных восходящих движений. Острые горные хребты и глубокие долины окружают плато (абс.отм. 1500, 1800 м). Тип гор - эрозионно-тектонический (блок - моноклинальный, сводово-глыбовый). В центре расположена самая высокая вершина острова Пудуруталагала (2524 м).

Область III - протерозойский авлакоген северо-западного простирания (продолжение юго-западного пояса Керала, Южная Индия); представлена одним районом - III-А, занимающим западную и юго-западную части территории с низкогорным рельефом (абс.отм. до 150 м). Горы имеют округлую форму ("спины черепахи"). Район сложен протерозойским метаморфическим комплексом серии Хайленд северо-западного простирания, перекрытым латеритовой корой выветривания мощностью до 40 м. Глубина залегания грунтовых вод - 5-20 м. В районе развиты ЭГП: выветривание, эрозия, суффозия, морская абразия (вдоль западного побережья), заболачивание в долинах реки Келани (в сезон дождей). Район густо заселен.

Область IV - северо-западная часть острова, молодая мезозойская платформа с мощностью осадочного чехла более 200 м, отделенная Полкским краевым сбросом от соседней куполовидной тектонической структуры комплекса Виджаян. Рельеф равнинный, слабо всхолмленный с абс.отм. 30 м и уклоном поверхности 0,0008. По характеру рельефа, составу и генезису осадочных пород в пределах области выделено три района.

IV-А - п-ов Жаффна, сложенный миоценовыми светло-серыми органодетритовыми известняками мощностью более 200 м; ЭГП - карст.

IV-Б - пенепленизированные останцы (абс.отм. 30 м), покрытые с поверхности "красными землями" - горизонтами красных

и коричневых песков и гравия мощностью 2-15 м, залегающими на миоценовых известняках; возраст отложения - Q_{I-III}.

IV-В - район (абс.отм. от 0 до 30 м) распространения аллювиальных, лагунных, дельтовых отложений, представленных галькой, гравием, песками, глинами, мощность 5-10 м.

Особенности строения кор выветривания Шри-Ланки предопределены тем, что формирование всех петрологических типов метаморфических пород завершилось до раннего кембрия и сопровождалось тектономагматической активизацией; породы подвергались, по крайней мере, двухкратному региональному метаморфизму и на протяжении всей дальнейшей истории испытывали общее дифференцированное поднятие. Установление тропического климата начиная с позднего мела по настоящее время способствовало интенсивному развитию процесса выветривания и возникновению площадных и линейных кор. Различия в их строении обусловлены различиями температурно-влажностных условий, связанных, в первую очередь, с высотной зональностью. Так, в пределах нагорий и высокогорья процесс выветривания горных пород распространялся на значительную глубину - более 100 м, но в некоторых случаях элювиальный покров полностью отсутствует. В юго-западных районах развиты латеритовые коры выветривания мощностью до 40 м. На низменных и высокогорных плато сформировались площадные коры выветривания, состоящие из дисперсно-обломочных зон каолинового состава. Линейные и линейно-контактные коры выветривания приурочены к зонам тектонических нарушений, местам внедрения пегматитовых и долеритовых даек, контактам пород разного состава при их крутопадающем залегании. Переотложенные и погребенные коры сохранились в основном в низменных областях аккумуляции.

Опираясь на историю геологического развития острова с одной стороны, и его климатические особенности - с другой, автором в пределах территории Шри-Ланки выделено пять TWK кор выветривания (табл. 13, 14). При составлении карты TWK использованы материалы инженерно-геологических изысканий, выполненных для гидроэнергетического, гражданского, промышленного строительства, сооружения водохранилищ, ирригационных каналов, геологических исследований, проведенных для поисков бокситовых руд (см. рис.19)[1].

Ниже приведена характеристика основных температурно-влажностных классов кор выветривания острова Шри-Ланка.

TWK 5.4. Температурно-влажностный класс латеритной коры выветривания развит в пределах инженерно-геологического района III-А, занимающего западную и юго-западную низкогорные части острова с абс.отм. до 150 м. Среднегодовая температура воздуха 28 °С, количество атмосферных осадков от 3000 до 4000 мм/год и более. Протерозойские гранитогнейсы, биотит-роговообманковые, розовые кварц-плагиоклазовые гнейсы северо-западного пояса серии Хайленд перекрыты латеритной корой выветривания мощностью до 40 м, состоящей из пяти зон (сверху вниз).

[1]Исследования выполнялись Департаментом Ирригации Шри-Ланки, английскими фирмами Sir William Halorow; Sir Alexander Gibb в сотрудничестве с центральным консультативным бюро С.Е.С.В. Шри-Ланки, японскими фирмами Japan International cooperation, Japan Engineering consultants CO LTD, Гидропроектом СССР, Технопромэкспортом СССР и Н.Ранатунге [19].

Таблица 13
Основные типы климатических зон и TWK кор выветривания на территории о.Шри-Ланка

Климатический пояс, сумма температур выше 10 °С, °С	Зона влажности	
	Слабо аридная, 0,75–1,25*	Семигумидная, 1,25–1,75*
Умеренный, 1000-2200		3,4
Субтропический, 2200-4400	4,3	4,4
Тропический, 4400	5,3	5,4

* Индекс сухости.

V зона вторичной цементации (кираса) - кавернозная полускальная порода, сцементированная гидроксидами железа и кремнием, вниз по разрезу переходящая в рыхлую массу вследствие уменьшения степени цементации. Крепость пород изменяется в широких пределах: слабые разности разрабатываются киркой, крепкие - пневматическим молотком. Кираса залегает в виде железных шляп на низких холмах округлой формы ("спины черепахи"), мощность ее изменяется от 0,5 до 7 м (максимальная - 14 м). Кираса служит основанием многих гражданских сооружений, кроме того, из нее вырубают блоки, которые используют как строительный материал.

IV дисперсная зона мощностью от 1 до 20 м состоит из двух подзон - латеритной (IV-б) и глинистой (IV-а):

IV-б - пестроцветные суглинки и глины с розовато-коричневыми железистыми конкрециями, со свободными кварцевыми зернами и следами реликтовой структуры в нижней части горизонта;

IV-а - пестроцветные глины с белыми и желтыми пятнами, макропористые с отчетливыми признаками субстрата, с включениями каолинизированной дресвы размером 1-3 см, в нижней части подзоны - с "ядрами" неизмененных латеритных пород.

III зона - литомаржа визуально прослеживается в верхней части обломочной зоны; в ее пределах наблюдается каолинизация пород по плагиоклазам, хорошо прослеживаются первичная структура и текстура пород; подошва зоны часто находится на одном уровне с грунтовыми водами; мощность ее невелика - 0,5-5 м.

Таблица 14

Внешние и внутренние условия процесса формирования *TWK* кор выветривания о. Шри-Ланка

Индекс *TWK*	Тип коры выветривания, м	Мощность коры выветривания, м	Мощность зоны коры выветривания, м	Индекс и характеристика инженерно-геологических районов	Географическая зона
5.4	Латеритная	40	V – 0,5–7 IV – 1–20 III – 0,5–5 – II – 2–20 I – 5	III-А. Протерозойский авлакоген северо-западного простирания; низкогорный рельеф с абс. отм. 150 м	Влажные тропики, $t^\circ = 28\ ^\circ C$, атмосферные осадки 3000 – 4000 мм/год
5.3	Каолинит-монтмориллонитовая	До 14	IV – 5–20 II – 17 I – 5 –	I-А, I-Б, II-А. Куполовидные структуры Виджаян; холмистая равнина, нагорье цокольно-денудационного происхождения, абс.отм. 50, 150, 300 м	Тропики, $t^\circ = 28–33\ ^\circ C$, атмосферные осадки 1000–3000 мм/год
4.4 3.4	Обломочная	30–50	IV – 0,5–3,5 II-б – 20–30 II-а – 1–10	II-Б, II-В. Протерозойский авлакоген северо-северо-восточного простирания серии Хайленд; высокогорье с абс.отм. 1800–2500 м	Высокогорье, $t^\circ = 15\ ^\circ C$, атмосферные осадки 3500–5000 мм/год
4.3	"Красные земли"	20–35	IV – 20–35 I – III – нет данных	IV-А. Мезозойская платформа, миоценовые известняки, низменная равнина, абс. отм. 30 м	Прибрежно-морская, $t^\circ = 28–33\ ^\circ C$, атмосферные осадки 1000 мм/год

II зона - обломочная, сложена щебнем и глыбами коренных пород, размер которых увеличивается с глубиной, сменяющимися трещиноватым субстратом; пространство между обломками заполнено глинами, суглинками и песком; мощность зоны - 2-20 м.

I зона - трещинная, в породе трещины выветривания распространены спорадически; поверхность их покрыта гидроксидами железа; по отдельным трещинам породы изменены на глубину 0,5-5 см; мощность зоны не превышает 5 м.

TWK 5.3. Температурно-влажностный класс каолиновых кор выветривания развит в пределах инженерно-геологических районов I-А, I-Б, II-А, занимающих "засушливую" часть острова с годовым количеством осадков 1000-2000 мм и среднегодовой температурой 33 °С. Это территория северо-западных низменных платообразных равнин с абс.отм. до 50 м, северо-восточных холмистых равнин с абс.отм. до 300 м (I-А), восточных и юго-восточных низменностей и нагорий (абс.отм. 150-300 м) цокольно-денудационного происхождения, сложенная породами WVC, EVC и частично HS. Здесь сооружены гидроузлы Малвату-Ойя и Ингинимития на р.Ми-Ойя (I-А) и Кириндн-Ойя вблизи г.Тисса (I-Б).

Х.В.Хератом (1980) эта территория определена как область распространения монтмориллонит-каолиновых глин, которые являются верхней частью коры выветривания мощностью 5-20 м.

В вертикальном ее профиле выделяются (сверху вниз):

IV дисперсная зона представлена красноцветными глинами и суглинками, не сохранившими структурно-текстурные особенности материнских пород; в нижней части разреза пестроцветные разности носят следы реликтовой структуры и текстуры субстрата. Красная, кирпично-красная, коричневато-желтая окраска обусловлена наличием окисных форм железа. В минеральном составе пород преобладают глинистые минералы группы каолинита, монтмориллонита, карбонаты.

II обломочная зона состоит из щебнистой и глыбовой подзон. Первая из них II-б мощностью до 12 м сложена обломками пород со слабовыраженной первичной структурой, вторично сцементированными гидроксидами железа. II-а глыбовая подзона имеет мощность до 5 м.

I трещинная зона мощностью до 5 м постепенно переходит в невыветрелые породы.

TWK 4.4, 3.4. Температурно-влажностные классы коры выветривания распространены в центральной части острова в пределах инженерно-геологических районов II-Б и II-В, охватывающих нагорья с абс.отм. 300-1500 м и высокогорья с абс.отм. 1500-2500 м и выше. Количество атмосферных осадков 3500-5000 мм/год, температура воздуха 15-24 °С. Здесь сооружены гидроузлы Куда-Ойя (II-В), Котмале-Ойя в верховьях р.Махавелли (табл. 15); Виктория в среднем течении р.Махавелли; Гана и Самам Веве (район II-Б).

Ниже приведен характерный разрез коры выветривания района гидроузла Котмале-Ойя (сверху вниз).

Таблица 15
Характеристика пород коры выветривания
(гидроузел Котмале-Ойя на р.Махавелли)

Зона выветривания	Мощность зоны, м	v, м/сек	ρ_s, Ом	Выход RQD керна, %	
Делювий	10	200 – 500	40 – 50	0	0
Дисперсная	10	600 – 900	40 – 50	0	0
Щебнистая	10 – 12	1000 – 1400	10 – 300	0	0
Литомарж	15	1500	500	60	0
Глыбовая	3 – 20	2300	500	80	40
Трещинная	4 – 25	2400 – 3400	–	100	30
Относительно сохранная порода		3500 – 5600	1	100	90

Примечание. v – скорость прохождения ультразвуковых волн, ρ_s – кажущееся электрическое сопротивление.

IV дисперсная зона (элювиально-делювиальная) развита слабо, представлена супесями, суглинками буровато-коричневого и красного цвета, макропористыми, с включениями обломков сильно выветрелых пород (до 10 %), переходящих вниз по разрезу в песчано-дресвяную массу. Образования повсеместно перекрывают коренные породы, отсутствуя лишь в пределах крупных склонов и вершин гор; мощность их невелика - 0,5 - 3,5 м.

II-б - щебнистая подзона представлена дресвяно-щебнистыми и песчано-глинистыми гетерогенными образованиями с реликтами сохраненных пород. Содержание песчано-глинистого материала снижается вниз по разрезу, а количество обломков увеличивается. Первичная структура в верхней части зоны выражена слабо, в нижней - наблюдается вторичная цементация гидроксидами железа. Содержание щебня составляет около 60 %. Обломки целиком пропитаны гидроксидами железа, за счет чего они приобретают кирпично-красный цвет. Породы легко разрушаются от удара молотком, рассыпаясь на мелкозернистую массу. Тонкодисперсная фракция состоит из мелких обломков минералов субстрата и гетерогенных минералов, в частности каолинита. Вторичные образования распределены неравномерно. Мощность зоны изменяется от 1 до 30 м (на пологих склонах и вдоль зон тектонических нарушений). Прочность и деформируемость пород, по сравнению с материнскими, изменяются в десятки раз. Сжимаемость пород в массиве определяется составом обломочного материала, степенью выветрелости, размером обломков и сложением; сопротивление пород сдвигу - составом дисперсной фракции.

III зона литомаржа распространена повсеместно, максимальная мощность зоны отмечается на водораздельных участках и пологих склонах. Это разборная скала, сложена глыбами сильно выветрелого субстрата коричневато-бурого цвета, полностью пропитанного гидроксидами железа. Глыбы разделены трещинами с песчано-глинистым заполнителем, составляющим 30-40 %.

Наблюдается каолинизация пород по полевым шпатам. Глыбы (размер их увеличивается с глубиной до 1 м) пронизаны волосными трещинами и при ударе молотком распадаются на щебень. В отличие от трещинной зоны, в литомарже наблюдается тенденция к снижению анизотропии и неоднородности свойств в массиве; мощность зоны изменяется в зависимости от геоморфологических условий, максимальная (до 25 м) отмечается на пологих хорошо дренируемых склонах.

II-а - обломочная зона (глыбовая подзона) сложена глыбами и отдельными блоками слабо выветрелых пород темно-коричневого цвета, сохраняющих структурно-текстурные особенности субстрата. Глыбы и блоки разобщены открытыми трещинами с песчано-глинистым заполнителем, составляющим 10-20 %. Раскрытие трещин достигает 20 см. Размер отдельностей превышает 1 м и зависит от генезиса, состава пород и степени тектонической нарушенности. Глыбы и блоки частично пропитаны гидроксидами железа. Прочность породы в центральной части отдельностей соответствует прочности материнских пород. Мощность зоны - 1- 10 м.

I трещинная зона. Мощность ее изменяется в зависимости от рельефа; с приближением кровли зоны к дневной поверхности она достигает 30-40 м. Столь глубокое проникновение процесса выветривания связано с тем, что метаморфические породы имеют блочное строение и слоистое сложение с крутым падением плоскостей напластования.

В подзоне I-б выветривание проникает вдоль плоскостей напластования и трещин на глубину 0,5-5 см, при этом структурно-текстурные особенности субстрата сохраняются. Раскрытие отдельных трещин не превышает нескольких сантиметров. Основная масса пород не изменена.

В нижней подзоне - I-а трещины развиты спорадически, поверхность их покрыта гидроксидами железа; цвет, состав, структурно-текстурные особенности субстрата не изменены.

При полевых определениях прочности моноклинально залегающих пород, крутопадающих в сторону нижнего бьефа плотины Котмале, получены следующие оценки: угол внутреннего трения изменяется от 12 до 16 , сцепление от 0 до 1,2 МПа. В целом для пород трещинной зоны характерны неоднородность и анизотропность свойств в массиве. При подготовке котлованов и выемок породы разрабатываются взрывным способом. Правильное установление границы этой зоны дало возможность решить такие важные вопросы, как определение глубины съема выветрелых пород; установление глубины противофильтрационной завесы; обоснование длины анкеров при укреплении откосов, берегов и других защитных мероприятий.

TWK 4.3. Температурно-влажностный класс коры выветривания ("красные земли") развит в пределах инженерно-геологического района IV-А, расположенного в северо-западной части острова, в пределах молодой мезо-кайнозойской платформы. Ее чехол

мощностью до 200 м сложен миоценовыми известняками. Количество атмосферных осадков менее 1000 мм/год, температура воздуха 28-33° С.

В пределах низменной равнины с абс.отм. до 30 м прослеживаются нижне-верхнечетвертичные поверхности выравнивания, имеющие характерную форму меридионально вытянутых валов длиной 3-5 км и шириной до 2 км, возвышающихся на 30 м над окружающей поверхностью. В вертикальном их разрезе выделяются (сверху вниз):

V зона гравийных отложений, представленных угловатым кирпично-коричневым железистым гравием, крупнозернистым песком и обломками кремня. Обломки сцементированы железистым материалом; на поверхности нередко образуется нодулярная (конкреционная) железистая кираса невыдержанной мощности - "слои Ратнапуры". Слои залегают в виде пятен на миоценовых известняках, реже на пенепленизированном кристаллическом фундаменте.

IV дисперсная зона сложена глинистыми кварцевыми песками, мелкозернистыми, окатанными и суглинками с характерным кирпично-красным цветом, обусловленным присутствием гематита; средняя мощность зоны 20 м, максимальная - 35 м (район Аруакали).

Изложенный материал показывает, что даже в пределах сравнительно небольшого острова, сложенного докембрийскими однотипными породами, можно встретить довольно разнообразное строение кор выветривания. Выделение температурно-влажностных классов кор выветривания на базе глубокого анализа истории геологического развития и оценки современных климатических условий позволяет установить закономерности их пространственного распространения и облегчает задачи изучения и прогноз инженерно-геологических условий, требуемые при проектировании различных инженерных сооружений.

СОСТАВЛЕНИЕ ДЕТАЛЬНЫХ КАРТ МОЩНОСТИ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ И ОЦЕНКА ЕЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Основной целью составления карты коры выветривания является установление закономерностей пространственной изменчивости мощности в пределах небольших по площади территорий. В процессе изучения разрезов кор выветривания в первую очередь определяют их морфологический тип (площадные, линейные, линейно-контактные), возраст, степень, сохранность, характер перекрывающих пород, положение кор в рельефе и отношение к гидрогеологическим уровням. Затем приступают к составлению инженерно-геологической карты коры выветривания или ее отдельных зон.

В общем случае крупномасштабная карта (м-б 1:2000, 1:1000) коры выветривания строится на геологической основе. На ней должны быть отображены элементы древнего и современного рельефа, микроэлементы рельефа, образовавшиеся в результате размыва локальных и линейных кор, линии разрывных нарушений и зоны повышенной трещиноватости, падение слоев в осадочных и метаморфических толщах, состав и мощность (в изопахитах) коры выветривания и перекрывающих пород. Необходимо также отразить проявление неотектонических движений - новейших поднятий, направление молодых разломов и т.п. Петрология субстрата дается в схематизированном виде; слагающие породы объединяются в группы не только согласно принятым в петрографии принципам, но и в зависимости от степени их устойчивости к гипергенным процессам.

Чтобы избежать перегруженности карты информацией, можно составлять серию карт: мощности коры выветривания, мощности дисперсной зоны, изопахит кровли коры выветривания, мощности перекрывающих пород.

Совместный анализ комплекса карт позволяет установить общие закономерности, которым подчиняется формирование и развитие кор выветривания, выявить компоненты геологических условий, определяющих их пространственное распространение, мощность и строение. Этот вопрос имеет как научное, так и большое практическое значение, прежде всего в гидротехническом и горном строительстве, при проектировании карьеров глубокого заложения, так как мощность, состав и свойства пород коры выветривания в значительной степени влияют на выбор конфигурации и углов заложения бортов карьеров, откосов строительных котлованов. Знание этих параметров необходимо при определении мощности зоны съема пород в основании и примыкании сооружений.

Ниже приведены примеры карт и анализа пространственной изменчивости мощности древних кор выветривания Южного Урала и тропической коры выветривания Северного Вьетнама.

Геологические закономерности формирования древних кор выветривания

Исследования проводились в период детальных геологических разведок на месторождениях с использованием всей геологической документации. Изучены шесть участков месторождений, пять из которых (Осеннее, Весеннее, Летнее, "50 лет Октября", Приорское) с медноколчеданным оруденением и одно (Теренсайское) пьезокварцевого сырья, расположенные в Домбаровском районе Оренбургской области на сравнительно небольшом расстоянии один от другого (20-50 км) и имеют близкое геологическое строение.

В пределах всех рассматриваемых месторождений распространены преимущественно базальтоиды (диабазы, базальтовые и диабазовые порфириты), сформировавшиеся в результате тре-

щинных излияний в области глубоководного рифта (S-D). Вулканизм, тип которого менялся во времени от трещинных излияний к извержениям центрального типа, привел к образованию на месторождениях Осеннее и Летнее толщи вулканогенных пород - туфов основного и среднего состава. Завершающим этапом развития вулканизма явилось формирование раннекаменноугольных интрузий в зонах глубинных разломов. В пределах месторождений отмечаются крупные и мелкие интрузивные тела, пронизывающие всю толщу базальтоидов. Контролируются они, как правило, линиями разломов и оперяющими трещинами.

Начиная с раннего карбона территория Южного Урала переживает сложную тектоническую историю. Будучи областью сжатия - растяжения она испытывала попеременные поднятия и опускания. В связи с обновлением древних и возникновением

Таблица 16

Геологические условия месторождений Южного Урала, определяющие мощность древней коры выветривания

Месторождение	Тектонический режим в период корообразования	Неотектонический режим. Суммарное воздымание олигоценовой поверхности (B), м	Факторы, вызвавшие раздробленность, рассланцованность пород	Средняя мощность коры выветривания площадной (в числителе) и линейной (в знаменателе), м
Терен-сайское	Преимущественно положительные тектонические движения, способствовавшие формированию относительно мощных зон дезинтеграции	$300 > B > 250$	Орогенез	15 / –
Летнее		$250 > B > 200$	То же	15 / 55–65
Осеннее		Блоки месторождения испытывали поднятия различной интенсивности; на приподнятом блоке глинистая зона размыта $B \approx 200$	Наличие крупного взброса-сдвига; внедрение силообразного субвулканического образования липарит-диацитовых порфиров	25 / 48–74
Весеннее	Относительно стабильный тектонический режим, способствовал формированию мощной коры выветривания	Относительное погружение, способствовало сохранению глинистой зоны от размыва $200 > B > 150$	Наличие разломов, многочисленных разновозрастных интрузий	38 / 43–70

* Все породы претерпели региональный зеленокаменный метаморфизм, обусловивший образование амфибола, эпидота, кварца.

Метаморфизм, обусловивший изменение состава исходных пород*	Материнские горные породы			Мощность коры выветривания на различных породах: общая (в числителе) и глинистой зоны (в знаменателе), м
	Условия образования	Группа по кислотности	Название	
Прогрессивный: образование как весьма неустойчивых (биотит, серицит), так и устойчивых (кварц, альбит) минералов	Эффузивные	Основные	Диабаз, порфиритоид базальтового состава, габбро-диабаз	15 / 0–1
			Диабаз массивной текстуры	15 / 4
			Диабаз, диабазовый порфирит шаровой текстуры	19–22 / 4
Гидротермально-метасоматический: образование хлорита, серицита, кварца, карбонатов	Субвулканические	Кислые	Липарито-дацитовый порфир	24 / 10
	Интрузивные	Щелочно-средние	Сиенит-диорит	30 / 3
	"	Основные	Габбро-габбро-диабаз	29 / 5
	Эффузивные	"	Диабаз, диабазовый порфирит	16–30 / 2–3
	Интрузивные	Кислые	Гранит	42–46
	"	Кислые – средние	Гранодиорит	30–39 / 25
	"	Основные	Габбро-диабаз	15–30
	Эффузивные	"	Диабаз, базальтовый порфирит	10–28 / 15
	Метаморфические		Амфиболит, роговики	24–46 / 32–47
			Кварц-хлорит-серицитовые породы	– / 34–45

новых разломов территория Южного Урала приобрела блоковое строение. К концу орогенного периода, приходящегося на ранний триас, Южный Урал являлся горноскладчатой областью. Затем наступил платформенный этап развития.

В условиях жаркого влажного климата интенсивно развивался процесс выветривания, который в совокупности с тектоническими факторами сыграл основную роль в уничтожении герцинского и раннемезозойского горного рельефа и способствовал превращению последнего в пенеплен. Расчеты В.А.Романова показали, что зоны устойчивых воздыманий в течение мезо-кайнозойского этапа были приподняты и разрушены на глубину более 3 км. Эти данные согласуются с суммарными объемами меловых и нижнепалеогеновых образований Западно-Сибирской низменности, сформировавшихся за счет обломочного материала, поступавшего с Урала. Неотектонический период (олигоцен - позднечетвертичное время) характеризуется продолжением воздымания территории, составившим 150-300 м. Интенсивность поднятий на различных участках Южного Урала была неодинаковой (табл.16), что привело к образованию локальных структур. Рассматриваемые месторождения приурочены к структурам третьего и четвертого порядков, которые в свою очередь осложнены структурами еще более высоких порядков.

Все магматические породы испытали метаморфизм различного рода: гидротермальный, с которым связано рудообразование, контактовый - при внедрении крупных интрузивных тел, региональный. В результате породы амфиболизированы, скарнированы или метасоматически изменены. Таким образом, в пределах рассматриваемых месторождений развиты: эффузивы основного состава, представленные диабазами, диабазовыми и базальтовыми порфиритами; туфы среднего и кислого состава, интрузивные породы различного состава - гранодиориты, диориты, габбро; метаморфические породы - метасоматиты. Все они начиная с раннетриасового времени подвергались выветриванию.

Изучение пространственных закономерностей, которым подчиняется распределение мощностей древней коры выветривания, проводилось путем построения карт изопахит (по результатам детальной разведки) (рис.23). Анализ таких карт показал, что мощность коры выветривания в пределах каждого месторождения колеблется в широких пределах от 3 до 90 м. В вертикальном разрезе коры четко выделяются дисперсная (IV-А) и обломочная (II) зоны, соотношение которых меняется.

Пространственное распределение мощностей коры выветривания в значительной мере зависит от исходного состава пород. Так как на всех месторождениях больше всего распространены базальтоиды, то роль различных показателей геологических условий, определяющих мощность коры выветривания, целесообразно рассмотреть на примере этих пород.

По мощности коры выветривания, развивающейся на базальтоидах, месторождения разделяются на две группы. К первой от-

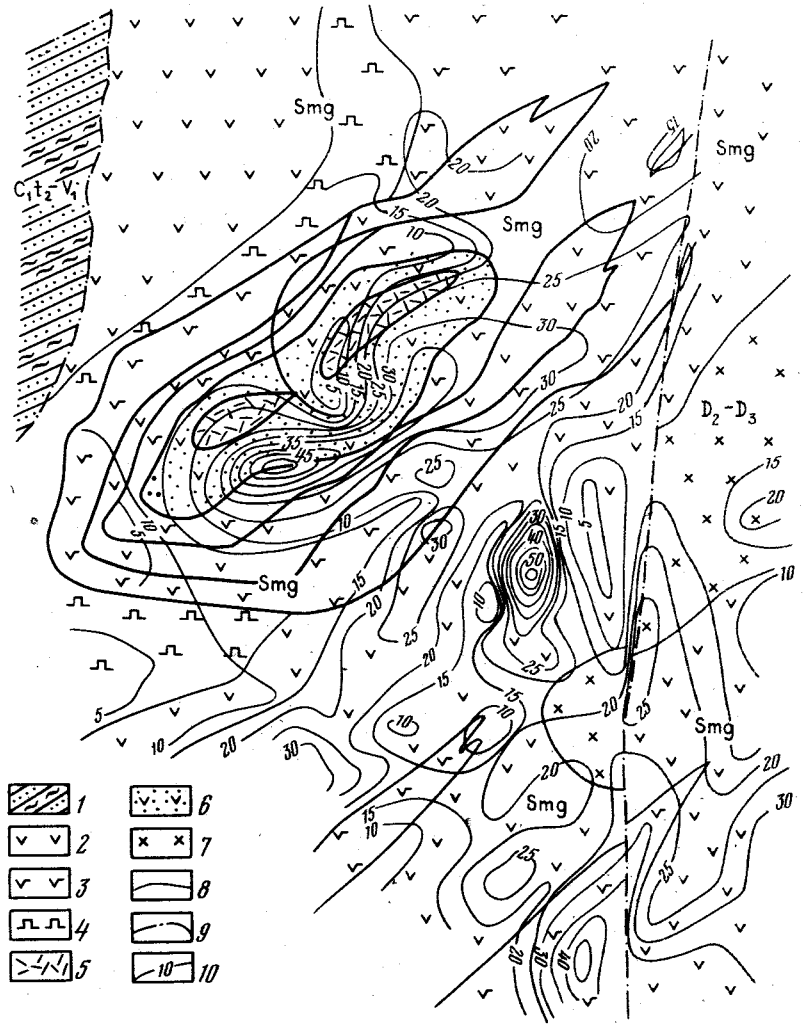


Рис. 23. Карта мощности коры выветривания месторождения Приорское (Южный Урал):

1 – песчаники, аргиллиты, алевролиты; *2* – диабазы, микродиабазы; *3* – спилиты, тонколейстовые диабазы; *4* – андезиты, андезитовые порфириты; *5* – стекловатая, литофизовая кислая лава (перлиты); *6* – витрокластические и литовитрокластические туфы, туфолавы; *7* – диориты; *8* – геологические границы; *9* – тектонические нарушения; *10* – изопахиты (в м)

носятся месторождения, на которых мощность коры выветривания составляет 3-15 м (Теренсайское, Осеннее, Летнее). Ко второй (Весеннее, "50 лет Октября", Приорское) - месторождения с корой выветривания мощностью 11-27 м, сформировавшейся на базальтоидах. Изучение геологической истории района показало, что первая группа месторождений находилась в области устойчивых поднятий в течение всего платформенного этапа развития. В неотектонический этап энергичное воздымание продолжалось и в общем составило 200-300 м. Вследствие этого формировавшаяся в мезо-кайнозойское время кора выветривания постоянно сносилась. В результате в настоящее время мощность коры выветривания здесь невелика, и представлена она преимущественно обломочной (II) и маломощной дисперсной зоной (IV-А).

Месторождения второй группы расположены на границах крупных наложенных впадин: Орской ("50 лет Октября" и Приорское) и Домбаровской (Весеннее). Тектонический режим обладал здесь относительной устойчивостью, что способствовало формированию более полного профиля коры выветривания с мощной глинистой подзоной и маломощной обломочной (II). Достаточно активное воздымание территории Орской впадины в неотектонический этап, по сравнению с Домбаровской, обусловило интенсивное разрушение коры выветривания на месторождениях "50 лет Октября" и Приорское по сравнению с месторождением Весеннее.

Изучение процесса выветривания показало, что в условиях жаркого влажного климата выветривание идет по линии химических изменений пород, которые опережают физическое разрушение. Следствием этого является наличие мощных глинистых подзон в латеритовых корах выветривания и незначительные мощности или полное отсутствие обломочной зоны. Учитывая, что жаркий влажный климат мезо-кайнозойского периода в олигоцен-четвертичное время сменился умеренно континентальным, можно, опираясь на анализ отношений мощностей зон кор выветривания, предположить, что на месторождениях Теренсайское, Летнее, Осеннее мезозойская кора выветривания была разрушена, а имеющаяся сейчас является олигоценовой. На месторождениях Весеннее, "50 лет Октября" и Приорское сохранилась мезозойская кора выветривания.

Таким образом, тектонический режим в период корообразования и позже - основное условие, определяющее сохранность древних кор выветривания. Древние коры выветривания в пределах рассматриваемых месторождений относятся к площадным остаточного типа, и процесс корообразования охватывает период с мезозоя по позднечетвертичное время.

Основываясь на соотношении мощностей дисперсной и обломочной зон, можно выделить коры выветривания мезозойского и олигоценового возраста.

Помимо площадной коры выветривания в пределах месторождений развита линейная, приуроченная к линиям крупных тектонических разломов и особенно к местам их пересечения. Процесс выветривания в зонах тектонических нарушений проникает на значительную глубину в зависимости от степени раздробленности пород. Развитию линейных кор выветривания способствуют неотектонические подвижки по линиям разломов, так как они приводят к катаклазированию пород. Катаклаз, проявляясь в деформации кристаллических решеток минералов, образовании двойников скольжения, изменении формы и размера зерен, растрескивании и дроблении, вызывает ослабление структурных связей и возрастание проницаемости пород, что резко снижает их сопротивляемость воздействию агентов выветривания. Независимо от состава пород мощность линейных кор выветривания достигает 43-74 м, т.е. увеличивается по сравнению с фоном в 3-5 раз (см. рис. 20).

Раздробленность пород отмечается не только вдоль линий тектонических нарушений, но и в сводовых частях складок (месторождения Осеннее, Приорское). Являясь зонами максимального растяжения, эти части отличаются повышенной открытой трещиноватостью. В результате мощность коры выветривания в сводовых частях складок больше в 2-3 раза, чем на крыльях. На месторождении Приорском при общей средней мощности коры выветривания 16 м в сводовых частях складки она достигает 31-53 м, а на месторождении Осеннем (при средней мощности 26-30 м) - 59-69 м.

Как уже отмечалось, толща базальтоидов пронизана дайками различного состава. Их внедрение происходило в несколько этапов, причем каждому предшествовало перетирание и рассланцевание вмещающих пород, что в дальнейшем сказалось на интенсивности выветривания и привело к образованию вокруг даек зон локального увеличения мощности коры выветривания в в 1,5 - 2 раза по сравнению с фоном. При этом наибольшее увеличение мощности коры выветривания отмечается в местах группового расположения даек, контролируемых тектоническими разломами. В последнем случае трещиноватость и раздробленность пород особенно велики, и здесь развиты наиболее ослабленные (проницаемые) участки массива.

Исследования показали, что мощность древних кор выветривания в значительной степени зависит от условий формирования, минерального состава и структурно-текстурных особенностей исходных пород. Этот факт отмечен на всех месторождениях.

По условиям формирования породы рассматриваемых месторождений разделяются на четыре подгруппы: вулканиты, представленные туфами андезитобазальтового состава; эффузивы (продукты подводных лавовых излияний) - диабазы, диабазовые и базальтовые порфириты, спилиты; интрузивы, слагающие крупные тела, - сиенит-диориты, гранодиориты, граниты - и дайки, преимущественно габбро-диабазового состава; метасоматиты, образовавшиеся в результате контактового метамор-

физма и гидротермально-метасоматических преобразований эффузивов основного состава.

Известно, что в процессе выветривания (приспособления к окружающей среде) наиболее сильно изменяются те породы, условия образования которых существенно отличаются от поверхностных. Так, метаморфизованные породы (метасоматиты) и интрузивы, образовавшиеся на больших глубинах в условиях высоких температур и давлений, изменяются в процессе выветривания больше, чем лавы, излившиеся под водой или на поверхность суши. По степени уменьшения мощности коры выветривания породы могут быть расположены в следующей последовательности: метаморфизованные - интрузивные - эффузивные-вулканогенные.

Помимо условий формирования материнских пород на мощность кор выветривания влияет их минеральный состав. В группе магматических пород мощность коры выветривания возрастает по мере увеличения кислотности исходных пород. Эта закономерность четко фиксируется для крупных интрузивных тел. Породы в порядке возрастания мощности возникающей на них коры располагаются следующим образом: диорит - сиенит-диорит-гранодиорит - гранит. Мощности кор выветривания в ряду этих пород соответственно равны 30, 35, 39, 50 м. Эта закономерность объясняется увеличением содержания в кислых породах неустойчивых к выветриванию породообразующих минералов: калиевого полевого шпата, альбита, биотита, роговой обманки.

На мощность коры выветривания влияют также различия в минеральном составе пород, относящихся к одной группе по кислотности. Данные по месторождениям Осеннее и Весеннее свидетельствуют о том, что мощность коры выветривания диабазов меньше мощности коры выветривания диабазовых порфиритов, но больше мощности коры выветривания спилитов.

Мощность коры выветривания, сформировавшейся на породах одного и того же петрографического типа, изменяется в зависимости от их структурно-текстурных особенностей. Зависимость мощности коры выветривания от структуры и текстуры исходных пород удалось проследить при анализе данных о корах выветривания эффузивов основного состава на месторождениях Летнее и Осеннее (табл. 17).

Диабазы и диабазовые порфириты, излившиеся в глубоководной зоне и связанные со структурами рифта и островных дуг, характеризуются соответственно шаровой и массивной текстурой. Диабазы и диабазовые порфириты шаровой текстуры сложены подушечными отдельностями размером около 1,5 м (крупношаровые), 1 м (среднешаровые) и 0,7 м (мелкошаровые), погруженными в межподушечный цемент хлорит-эпидот-амфиболового состава. Подушечное строение диабазовых порфиритов подчеркивается распределением вкрапленников, более многочисленных в центре отдельностей и более редких в краевых частях, и структурой основной массы. Количество вкрапленников пропорционально размеру отдельностей. Крупношаровые диабазовые порфириты имеют среднезернистую структуру в центральной части и мелкозернистую в краевой (около 10 см). Количество вкрапленников в них составляет 35-40 %. Среднезернистые диабазовые порфириты имеют мелкозернистую структуру и меньшее количество вкрапленников (20-25 %).

Таблица 17
Мощность коры выветривания (в м) по месторождениям

Материнские породы	Текстура	Структура	Летнее		Осеннее	
			Общая	Глинистой подзоны	Общая	Глинистой подзоны
Диабазы	Массивная	Афанитовая	15	4	–	–
	Крупношаровая	Среднезернистая	22	4	25	1
	То же	Среднезернистая миндалевидная	–	–	28	11
Диабазовые порфириты	Крупношаровая	Среднезернистая	–	–	30	3
	Среднешаровая	Мелкозернистая	19	4	19	5

В ряде случаев диабазы отличаются наличием округлых, мелких (диаметром менее 3 мм) миндалин, количество которых увеличивается в направлении к краевым частям подушек. Миндалины являются как бы дефектом структуры, так как сложены неустойчивыми к выветриванию минералами - хлоритом, эпидотом, карбонатами. Их замещение вторичными идет быстро и создает ослабленные зоны в краевых частях подушек, способствуя более интенсивному выветриванию пород.

Приведенные данные показывают, что: 1) мощность коры выветривания на диабазах с массивной текстурой меньше, чем на диабазах подушечного строения; 2) мощность коры выветривания на подушечных миндалекаменных диабазах больше, чем на подушечных массивах, причем резко возрастает мощность глинистой зоны коры; 3) на диабазах крупноподушечных мощность коры выветривания больше, чем на среднеподушечных; 4) при одинаковой крупноподушечной текстуре мощность коры выветривания на диабазах меньше, чем на диабазовых порфиритах. Эти закономерности тесно связаны со структурно-текстурными особенностями пород.

Влияние метаморфизма пород на мощность развитой на них коры выветривания обусловлено изменениями минерального состава. Основная часть рассмотренных месторождений являются медноколчеданными. Образование рудных тел связано с гид-

ротермально-метасоматическими процессами. Последние обусловили околорудные изменения пород с частичным или полным замещением их первичного состава. В результате около рудных тел развиты амфиболизированные диабазы, амфиболиты и кварц-хлорит-серицитовые породы. Внедрение интрузивных тел и сопровождающий его контактовый метаморфизм привели к возникновению биотит-кварц-альбитовых и кордиерит- антофиллитовых роговиков, перераспределению рудной вкрапленности и вторичной перекристаллизации руд. Все эти тела менее устойчивые в зоне гипергенеза. Поэтому здесь сформировалась более мощная кора выветривания.

Прогрессивный метаморфизм, проявившийся на месторождении Теренсайском, вызвал образование более высокотемпературных ассоциаций - альбит-эпидот-амфиболитовых и сланцевых фаций, и тем самым послужил причиной возникновения значительной мощности выветрелых пород.

Существенное влияние на мощность коры выветривания оказало наличие медных руд, их распределение и характер залегания. Наблюдения показали, что присутствие рудной вкрапленности обусловливает увеличение мощности коры выветривания: окисление пирита, сопровождающееся образованием серной кислоты, сильнейшего агента выветривания, способствует активному разрушению пород.

При наличии пологозалегающих рудных тел, выходящих на поверхность, создаются благоприятные условия для формирования линейных кор выветривания с "железными шляпами" на поверхности (месторождение Летнее). Причин их образования несколько. Основными являются: наличие медных руд (пирита), гидротермально измененных пород около руд, трещиноватой зоны (являющейся магмоподводящим каналом), способствующей усиленной инфильтрации около руд воды и серной кислоты; условия залегания рудных тел, определяющие скорость фильтрации. На месторождении Летнее линейная кора выветривания по рудному телу распространена до глубины 74 м.

Таким образом, основным компонентом геологических условий, определившим сохранность древних кор выветривания на Южном Урале, следует считать тектонический режим района в период корообразования. Пространственная изменчивость мощности коры выветривания определяется тектонической раздробленностью и наличием ослабленных зон (в сводовых частях складок и местах внедрения даек), условиями формирования, минеральным составом, структурно-текстурными особенностями и характером метаморфизма материнских пород и руд. Знание основных закономерностей формирования древней коры выветривания может быть использовано для прогноза ее мощности и строения при инженерно-геологическом обосновании условий разработки полезного ископаемого, оценке инженерно-геологических условий строительства сооружений.

Пространственная изменчивость мощности коры выветривания (на примере Северного Вьетнама)

Пространственная изменчивость мощности коры выветривания рассматривается по результатам изучения ее на территории гидроузла Хоабинь.

В геологическом строении территории гидроузла участвуют породы перми, триаса и четвертичные образования. Пермские отложения (толща Хоабинь Phb) представлена эффузивами основного состава (базальтовыми и диабазовыми порфиритами, спилитами, лавобрекчиями) с прослоями известняков. По структурным особенностям, степени раскристаллизации и составу выделяются базальтовые порфириты пироксеновые, оливин-пироксеновые, стекловатые и меланократовые. Известняки светло и темно-серые, тонкослоистые, нередко доломитизированные и окремненные, образуют массив Чань-Ньянь. Триасовые отложения представлены фаунистически охарактеризованными пестроцветными туфоалевролитами, туфопесчаниками и конгломератами (толща Каной), которые слагают юго-восточную часть Слоновьей гряды. Породы моноклинально падают на юго-восток под углом 50-60°. Тектоническое строение территории отличается исключительной сложностью. Породы разбиты на блоки большим числом разломов. По характеру нарушенности пород выделяются зоны дробления, брекчирования, рассланцевания и повышенной трещиноватости. Ширина первых трех типов зон колеблется от 3 до 30 м. Зона дробления характеризуется наличием одной или нескольких трещин-сместителей, вдоль которых порода сильно раздроблена и нередко перетерта до дресвы и глинки трения. Размер обломков 1-10 см. На стенках трещин видны зеркала скольжения со штриховкой. Зоны брекчирования в значительной степени залечены кварц-кальцит-доломитовым гидротермальным материалом; местами наблюдается вторичное дробление пород за счет подновления тектонических нарушений. Зоны рассланцевания представлены серией частых крутопадающих тонких (до 1 мм) трещин, разбивающих породы на плитки и пластинки, нередко сцементированные минеральным заполнителем. Зоны повышенной трещиноватости представлены серией трещин, породы между которыми слабо раздроблены.

Основываясь на данных об истории геологического развития Северного Вьетнама, можно предположить, что интенсивные процессы выветривания и денудации в условиях преобладающих положительных движений территории способствовали полному нивелированию пермско-триасовых складчатых сооружений в течение юры, мела и палеогена. Неотектонические движения в четвертичное время (амплитуда которых составила около 200 м) и экзогенные геологические процессы привели к образованию современного рельефа. Исходя из этих соображений возраст коры выветривания ориентировочно может быть датирован как четвертичный.

Несмотря на сравнительно небольшой период корообразования, породы затронуты выветриванием на значительную глубину. Мощность выветрелых пород колеблется от 2,5 до 100 м. По характеру залегания могут быть выделены коры выветривания площадные, линейные и линейно-контактные.

Пространственная изменчивость мощности коры выветривания определяется: условиями формирования, составом и структурно-текстурными особенностями пород, их раздробленностью в зонах тектонических нарушений, ландшафтом местности, от которого зависят инфильтрация поверхностных вод и условия поверхностного сноса материала. Одним из основных факторов, определяющих мощность выветрелых пород, является исходный состав материнских пород. Средние значения мощности коры выветривания составляют для эффузивов 5-9 м, для туфогенно-осадочных пород - 60 м, для известняков - 3-15 м (табл. 18).

Кора выветривания эффузивов толщи Хоабинь имеет небольшую мощность, что обусловлено рядом причин. Крутые склоны и низкая сопротивляемость выветрелых пород сдвигу способствуют энергичному поверхностному сносу терригенного материала, поэтому мощность коры выветривания, так же как и делювия, мала, а элювий зачастую отсутствует. Можно считать, что ско-

Таблица 18

Мощность (в м) и строение кор выветривания пород Северного Вьетнама (район Хоабинь)

Зона (подзона) коры выветривания	Толща Хоабинь			Толща Каной
	Лавобрекчия	Базальтовые порфириты	Спилиты	Туфогенно-осадочная толща
Дисперсная (латериты)	1	2,2	0,7	11,9
	0–4	0–8	0–4	0–45
Литомарж	2,2	1,2	2,5	31,5
	0–6	0–3	0–14	0–53
Обломочная щебнистая	1,7	1,7	1,5	10,9
	0–6	0–7	0–3	0–38
глыбовая	1	3,6	2,7	8
	0–5	0–9	0–10	0–32
Зоны тектонических нарушений	13–33	8–25	21–49	До 150

Примечание. В числителе – средние значения мощности коры выветривания, в знаменателе – интервал значений.

рость денудации примерно равна скорости выветривания эффузивов. Среди эффузивов наибольшая мощность коры выветривания (до 9 м) характерна для спилитов; для базальтовых порфиритов она составляет 4-5 м и для лавобрекчий - 1-8 м. Различия мощностей обусловлены структурно-текстурными особенностями пород. Так, спилиты, являющиеся продуктом подводных излияний, имеют подушечное строение. Шаровые отдельности размером 0,3-2 м с концентрическим расположением в краевых частях миндалевидных подушек погружены в заполнитель. В процессе выветривания в первую очередь подвергается разрушению цемент, превращающийся в лимонит - глиноподобное образование коричневато-желтого, темно-бурого цвета. Миндалины, которые являются как бы "дефектами" структуры, ослабляют краевые части шаровых отдельностей и способствуют меньшей устойчивости пород к воздействию агентов выветривания. Более устойчивы лавобрекчии и базальтовые порфириты, обладающие массивной текстурой. Сильная раздробленность пород в зонах тектонического дробления благоприятствует проникновению агентов выветривания и способствует увеличению мощности коры выветривания на базальтовых порфиритах, лавобрекчиях и спилитах соответственно до 25, 33 и 48 м. Наибольшие мощности коры выветривания эффузивов отмечаются в точках пересечения зон тектонического дробления. В зонах брекчирования и повышенной трещиноватости не выявлено существенного увеличения мощности выветрелых пород. Как правило, такой процесс, как катаклазирование пород, развитый в зонах брекчирования, обычно обусловливает меньшую устойчивость пород по отношению к выветриванию. В данном случае катаклазирование не сказалось на увеличении мощности коры выветривания. Это связано, очевидно, с последующим окварцеванием пород в зонах бракчирования, которое способствовало омоноличиванию массива, и уменьшению их проницаемости. Локальное увеличение мощности коры выветривания эффузивов до 15 м отмечается около даек, внедрение которых, как правило, сопровождалось дополнительным растрескиванием пород, а также на контактах различных пород при крутопадающем их залегании. Так на контакте базальтовых порфиритов и туфогенно-осадочной толщи (Слоновья гряда) мощность коры выветривания увеличивается до 150 м. Здесь сформировался линейно-контактный тип коры выветривания.

Существенное влияние на изменение мощности коры выветривания оказывает метаморфизм пород. Хлоритизация и серицитизация пород, возникающие при региональном и гидротермальном метаморфизме, способствуют увеличению мощности коры выветривания; окварцевание и окремнение - уменьшению.

Наиболее мощная кора выветривания (25-100 м) сформировалась на породах туфогенно-осадочной толщи Каноя, вертикальный разрез которой характеризуется большой неоднородностью состава и свойств пород. Это обусловлено пестрым минеральным составом и крутопадающим залеганием материнского

субстрата. Характерным для разреза коры выветривания является наличие мощных зон литомаржа и дисперсной (суммарная мощность до 43 м).

Образованию мощной каолиновой коры выветривания на триасовых породах способствует обилие гидрослюд, содержание которых в прослоях аргиллитов достигает 70%. В туфоалевролитах и туфопесчаниках интенсивность выветривания определяется наличием глинисто-железистого и железисто-карбонатного цемента, неустойчивого в зоне гипергенеза. Более глубокому проникновению агентов выветривания способствует крутопадающее залегание плоскостей напластования, по которым в зоне разуплотнения раскрываются литогенетические трещины.

Изменение химического и минерального состава, структурно-текстурных характеристик карбонатных пород при выветривании зависит от содержания карбонатов и присутствия в породах других компонентов, прежде всего терригенных. Количество кальцита в известняках на участке Чань-Ньянь достигает 90-95%. Породы частично мраморизованы, окварцованы и окремнены, отмечено рудное вещество (до 10%). Основной процесс-компонент выветривания - выщелачивание карбонатов. Поскольку количество примесей в известняках невелико, то зоны литомаржа и дисперсная (латеритов), формирующиеся за счет химических преобразований первичных минералов и миграции оксидов железа, отсутствуют. Вскрытые скважинами глины на известняках являются продуктами выветривания эффузивов, некогда перекрывавших карбонатные породы. Подтверждением этого вывода следует считать характер структурно-текстурных особенностей глинистого элювия (реликтовые структура и текстура) и минеральный состав включений щебня.

Вертикальный разрез коры выветривания представлен главным образом обломочной зоной (II), глыбовой и щебнистой подзонами (II-а и II-б). Глыбовая сложена темно-серыми, местами светло-коричневыми известняками, тонкослоистыми, тонкозернистыми, ожелезненными, средней крепости, сильно трещиноватыми; поверхности трещин покрыты гидроксидами железа, крупные трещины выполнены глиной. Мощность подзоны II-а - 10-15 м. Щебнистая подзона представлена щебнем мелко- и среднезернистого известняка; на выветрелой ожелезненной поверхности щебня наблюдаются слои тревертина желтого цвета. Мощность подзоны II-б составляет 0,1-0,5 м. Известняки выветриваются медленнее по сравнению с другими породами. Это обусловлено рядом причин, в частности окварцеванием и окремнением, которые увеличивают устойчивость пород к воздействию агентов выветривания.

Густая тропическая растительность, с одной стороны, неблагоприятный фактор, препятствующий развитию процесса выветривания. Она покрывает известняковые останцы и уменьшает количество солнечной энергии, получаемой породами, но, с другой стороны, - снижает скорость поверхностного стока и

способствует инфильтрации атмосферных вод в горные породы, не говоря уже о том, что является источником большого количества органического вещества и углекислоты. Выщелачивание по трещинам приводит к формированию и увеличению кавернозности пород. Наличие рудного минерала в известняках и органического вещества в почвах способствует ожелезнению и оглению поверхностей отдельности известняков.

ПОСТРОЕНИЕ УСРЕДНЕННЫХ ГРАФИКОВ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Для оценки характера изменения физико-механических свойств пород коры выветривания строят графики изменения показателей с глубиной. Однако, как показывает опыт, судить об изменении свойств по одному графику, характеризующему некоторое сечение разреза коры выветривания, нельзя, так как данные будут недостоверны. Даже очень детальное исследование одного сечения разреза коры выветривания может дать нехарактерную картину. Для объективной оценки характера изменчивости необходимо иметь несколько сечений разреза элювия, несколько реализаций функции изменения показателей свойств. Это требование отражает положение о том, что значения показателя физико-механических свойств пород в любой точке коры выветривания являются случайной величиной, а совокупность значений этого показателя, представленная в виде графика зависимости показателя от глубины, также представляет собой случайную последовательность (одну реализацию случайной функции). По аналогии со статистикой случайных величин для получения надежных данных об изменении показателя свойств с глубиной нужно иметь несколько таких случайных последовательностей, т.е. располагать данными об изменчивости пород в нескольких вертикальных сечениях коры выветривания. Высказанное соображение подтверждается сравнением результатов оценки изменчивости свойств по частным значениям показателей с данными об изменчивости, опирающимися на средние значения показателя (рис. 24). Поскольку мощность отдельных зон выветривания может варьировать в широких пределах, построение графиков изменения физико-механических свойств должно производиться с учетом взвешивания данных по средней мощности зон. Это достигается следующим образом.

По имеющимся нескольким разрезам кор выветривания определяют средние значения мощностей отдельных зон и составляют усредненный разрез. На этот разрез точки отбора образцов по отдельным скважинам наносят в соответствующих пропорциях к средним мощностям зон.

Взвешивание по мощности поясним на примере.

Пусть средняя мощность дисперсной зоны равна 0,8 м; по скважине 7 мощность этой же зоны составляет 1 м, а образец

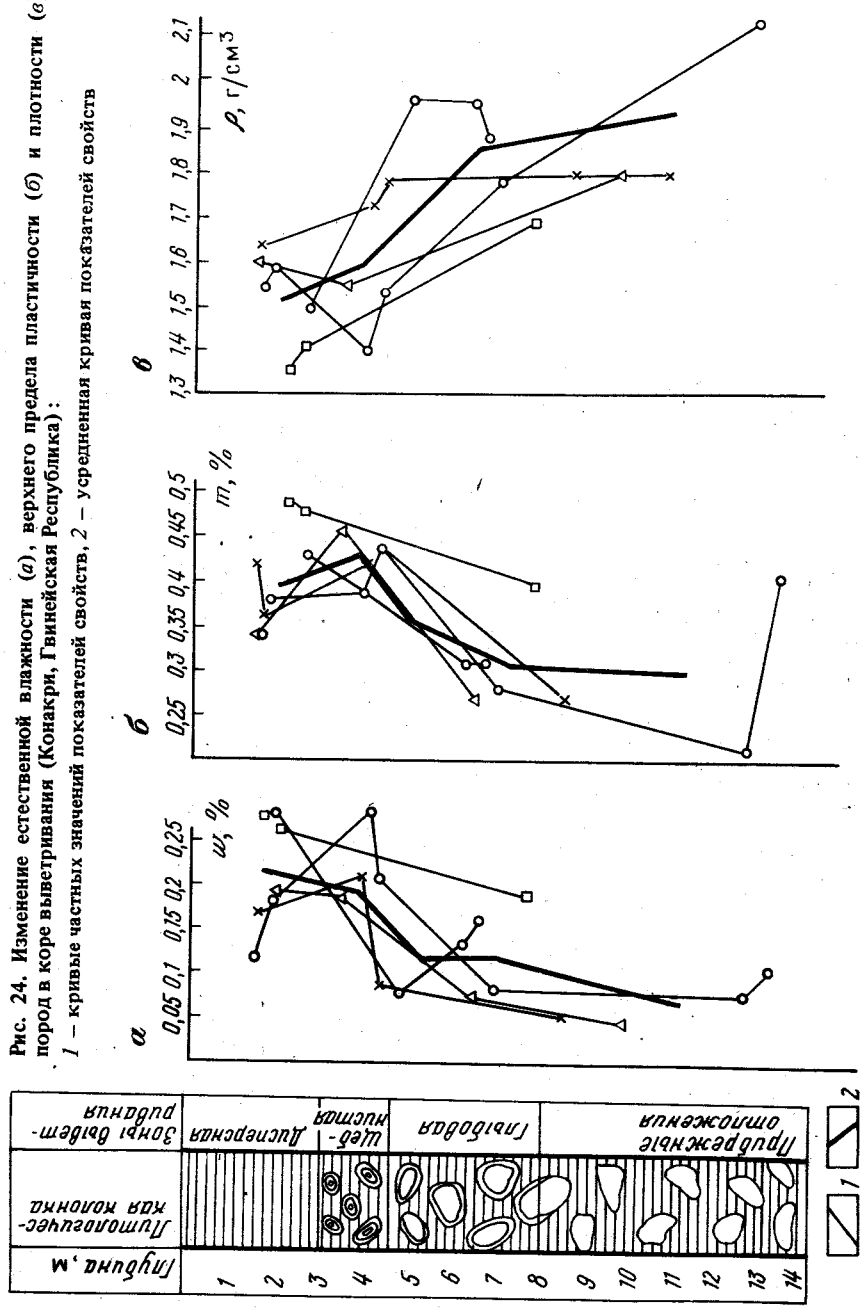


Рис. 24. Изменение естественной влажности (*а*), верхнего предела пластичности (*б*) и плотности (*в*) пород в коре выветривания (Конакри, Гвинейская Республика):
1 – кривые частных значений показателей свойств, 2 – усредненная кривая показателей свойств

из нее в скважине отобран с глубины 0,75 м. Тогда на усредненном разрезе показатели свойств этого образца надо наносить на глубине 0,6 м, исходя из следующего соотношения $0,8/1=x/0,75$, $x=0,8\cdot0,75=0,6$ м. При таком построении все точки отбора попадут в соответствующие зоны, и мы сможем получить несколько кривых изменения тех или иных показателей свойств пород, приведенных к одной мощности. Взвешиваемые по мощности и приведенные к одной длине кривые изменения показателей физико-механических свойств пород используют для построения усредненной кривой изменения показателей свойств пород. Для этого подбирают определенный интервал глубин, который будет укладываться в каждой зоне целое число раз; всю кору выветривания делят на такие интервалы, и затем для каждого из интервалов определяют среднее значение показателя. Соединив средние значения показателя, получают усредненную кривую его изменчивости.

При обработке средних данных различных показателей тенденция в изменении свойств может быть выражена четко, а иногда затушевывается. Для определения наличия тенденции в изменчивости можно применить некоторые математические методы.

ПРОВЕРКА НАЛИЧИЯ ТРЕНДА В ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫВЕТРЕЛЫХ ПОРОД

Нередко вопрос о наличии тренда* в изменении свойств пород, слагающих кору выветривания, решается довольно просто. Построение графиков изменения тех или других свойств выветрелых пород с глубиной позволяет установить закономерности в их изменении. Иногда же тенденция в изменении свойств на графике затушевана. Для установления наличия тренда в таком случае можно применить некоторые математические методы: критерии числа "скачков", числа смены знаков, критерий Спирмена, основанные на проверке гипотезы о случайном расположении элементов последовательности, представленных числами или условными рангами. Математическое доказательство этих критериев приведено в руководствах по теории вероятности и математической статистике В.Ю.Урбаха (1969), Н.В.Смирнова и И.В.Дунина-Барковского (1965), Р.Миллера и Дж.Кана (1965).

Наиболее простым критерием является критерий числа "скачков". Сущность критерия заключаетсся в следующем.

Любая последовательность может быть преобразована в элементы дихотомической последовательности путем замены значения показателей знаком "+" или "-" в зависимости от его

* Тренд - любая закономерность в упорядоченной последовательности чисел или элементов (Р.Миллер, Дж.Кан).

отношения к среднему значению (больше или меньше). В результате получают последовательность, состоящую из двух типов элементов, которые неразличимы внутри одного типа. Пример такой последовательности:++--+++--+.

Подобная последовательность характеризуется общим числом элементов N, числом элементов каждого из двух типов +, - и числом скачков u. Под скачком подразумевается последовательность, образованная одним или более одинаковыми элементами, предшествующая элементу другого типа или следующая за ним.

$P(u)$ - вероятность того, что в последовательности из N элементов содержится u скачков. Вероятность $P(u)$ рассчитывается при u - четном по формуле:

$$P(u) = \frac{(n_1-1)!\,(n_2-1)!\,n_1!\,n_2!}{(\frac{u}{2}+1)!\,(\frac{u}{2}-1)!\,(n_1-\frac{u}{2})!\,(n_2-\frac{u}{2})!\,N!}, \quad (12)$$

Если u - нечетное число

$$P(u) = \frac{(n_1-1)!\,(n_2-1)!\,n_1!\,n_2!}{(\frac{u-1}{2})!\,(\frac{u-3}{2})!\,N!} \cdot \left[\frac{1}{(n_1-\frac{u+1}{2})!\,(n_2-\frac{u-1}{2})!} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{(n_1-\frac{u-1}{2})!\,(n_2-\frac{u+1}{2})!} \right]. \quad (13)$$

Если в результате полученное значение вероятности $P(u)$ велико, то это означает, что в данной последовательности число способов получения данного количества скачков зависит от общего количества элементов. Если число скачков мало для исследуемой последовательности, то гипотезу о случайном расположении следует отвергнуть, признав наличие тренда.

Вычисление значения вероятности по формулам (12) и (13) становится трудоемким при большом количестве элементов вследствие наличия множителей, представленных факториалами. Поэтому при n_1, n_2>10 можно пользоваться приближенными формулами расчета, учитывая, что функция $P(u)$ приближается к нормальному распределению, если число членов в последовательности стремится к бесконечности. Математическое ожидание $E(u)$ и дисперсия числа скачков $D(u)$ подсчитываются по приближенным формулам:

$$E(u) = \frac{2n_1n_2}{n_1+n_2} + 1; \quad (14)$$

$$D(u) = \frac{2n_1n_2(2n_1n_2-n_1-n_2)}{(n_1+n_2)^2(n_1+n_2-1)}. \quad (15)$$

Определяется значение функции $\Psi(P)$, обратной интегралу вероятности по формуле

$$\Psi(P) = \frac{u-E(u)}{\sqrt{D(u)}}. \quad (16)$$

По таблице функции $\Psi(P)$, называемой также таблицей нормального распределения, определяем значение вероятности $P(u)$.

Рассмотрим применение критерия числа скачков на примере месторождения Весеннее. Имеется случайная последовательность значений объемной массы пород, слагающих кору выветривания гранодиоритов (табл. 19).

Численные значения показателя объемной массы преобразуем в элементы дихотомической последовательности, приписав каждому показателю знак "+" или "-" в зависимости от его отношения к среднему значению (2,98 г/см^3). Число элементов в последовательности N=18, элементов обозначенных "+" n_1=13, знаком "-" n_2=6, число скачков u=4.

Подсчитываем математическое ожидание $E(u)$, дисперсию числа скачков $D(u)$ и значение функции $\Psi(P)$ по формулам (14), (15), (16):

$$E(u) = \frac{2\cdot13\cdot6}{13+6} + 1 = 9{,}2;$$

$$D(u) = \frac{2\cdot13\cdot6\,(2\cdot10\cdot6-13-6)}{(13+6)^2\cdot(13+6-1)} = 3{,}3;$$

$$\Psi(P) = \frac{4-9{,}2}{3{,}3} = -2{,}8.$$

По таблице нормального распределения определяем значение $P(u)$=0,01. Полученное значение очень мало и свидетельствует

Таблица 19

Показатели свойств и образцов из коры выветривания гранодиоритов

Номер образца	Глубина, м	Плотность, г/см^3	Наличие элементов	Номер образца	Глубина, м	Плотность, г/см^3	Наличие элементов
1	3,5	1,81	+	10	13,8	1,96	+
2	5,5	1,83	+	11	18,5	1,96	+
3	6,3	1,77	+	12	20,5	1,75	+
4	7,5	2,02	+	13	21,2	1,75	+
5	8,5	1,98	+	14	22,6	2,48	–
6	9,5	2,33	–	15	22,8	2,12	–
7	10,2	1,93	+	16	23,8	2,55	–
8	11,3	2,03	+	17	25,5	2,66	–
9	12,2	1,98	+	18	26	2,45	–

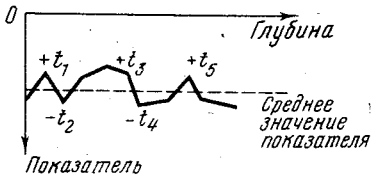


Рис. 25. Установление тренда в изменении показателей свойств выветрелых пород критерием знаков

о наличии закономерности (тренда) в изменчивости объемной массы.

Если проверка гипотезы, выполненная с помощью критерия числа "скачков", не позволяет уверенно ответить на вопрос о характере изменчивости свойств в коре выветривания, то можно использовать другой более чувствительный критерий, например критерий знаков, основанный на числе точек смены знака и на соотношении этого числа и числа элементов в последовательности. Предположим, что имеется кривая изменения какого-либо показателя свойства по глубине (рис. 25). Она записывается в виде последовательности, состоящей из n_1"+" и n_2"-" элементов относительного среднего значения. Точки, в которых градиент показателя меняет знак, являются точками смены знаков. Если число членов последовательности N стремится к бесконечности, то распределение числа смены знаков приближается к нормальному. Распределение числа точек смены знаков в последовательности из N элементов можно выразить через нормальное распределение. При этом рассчитывают математическое ожидание $E(t)$, дисперсию $D(t)$ числа точек смены знаков и значение функции $\Psi(P)$ вероятности того, что характер расположения элементов в последовательности случайный.

Параметры распределения определяются по формулам:

$$E(t) = \frac{2N-4}{3}; \quad (17) \qquad D(t) = \frac{16N-29}{90}; \quad (18)$$

$$\Psi(P) = \frac{t-E(t)}{\sqrt{D(t)}}. \quad (19)$$

По таблице нормального распределения определяем значение вероятности $P(t)$. Величина последней дает основание решить, каков характер распределения элементов последовательности: если значение вероятности велико, значит данное расположение элементов в последовательности случайное, если значение вероятности мало, то имеется тренд.

Рассмотрим применение этого критерия на примере изменения плотности в коре выветривания гранодиоритов (см. табл. 20). В рассматриваемой последовательности, состоящей из 18 элементов, число точек смены знаков t=3. Проводим расчеты математического ожидания $E(t)$ дисперсии $D(t)$ числа смены знаков и функции $\Psi(P)$ по формулам (17), (18), (19):

$$E(t) = \frac{2\cdot 18-4}{3} = 8; \quad D(t) = \frac{16\cdot 18-29}{90} = 2{,}9;$$

$$\Psi(P) = \frac{3-8}{2{,}9} = 2{,}5.$$

Значение вероятности, взятое по таблице нормального распределения, столь мало, что не позволяет признать расположение элементов в последовательности случайным, т.е. в изменении плотности выветрелых гранодиоритов по глубине имеется тренд.

Для установления линейного тренда в изменчивости физико-механических свойств пород в коре выветривания можно применить коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Применение этого критерия основано на том, что значению исследуемого показателя свойств пород приписываются соответствующие ранги от 1 до N (где N - объем совокупности). Полученную совокупность рангов сравнивают с рядом натуральных чисел. Если исследуемая совокупность обнаруживает постоянную тенденцию к увеличению, то разность между совокупностью и рядом натуральных чисел будет равна нулю. Отступление последовательности рангов от натурального ряда чисел приводит к появлению значений d отличных от нуля. Следовательно, совокупность значений d может служить мерой корреляции. Так как Σd всегда будет равна нулю, то мерой корреляции может быть Σd^2. При этом очевидно, что чем больше разность между нашей совокупностью и натуральным рядом чисел, тем слабее выражена связь и меньше коэффициент корреляции. Формула для подсчета ранговой корреляции, приводимая без доказательства, имеет вид

$$\rho_s = 1 - \frac{6\Sigma d^2}{N(N^2-1)},$$

где Σd^2 - сумма квадратов разностей d между числами натурального ряда и рангами; N - число членов в исследуемой совокупности.

Ранговый коэффициент корреляции может принимать значение от -1 до +1. При $\rho_s \approx 0$ тренд отсутствует, при $\rho \to +1$ или -1 имеется сильно выраженная тенденция к увеличению или уменьшению величин показателей.

Рассмотрим применение критерия на примере анализа.

Изменения показателя плотности пород в коре выветривания диабазов (Весеннее) по глубине показано в табл. 20. Значение коэффициента ранговой корреляции ρ_s=-0,04 свидетельствует об отсутствии тренда.

Завершая обсуждение критериев проверки наличия тренда показателей физико-механических свойств пород, следует сделать следующие оговорки:

применение статистических критериев проверки наличия тренда нужно только тогда, когда визуально тенденция в

Таблица 20

Схема расчета коэффициента ранговой корреляции Спирмена

Глубина, м	Плотность пород, г/ см³	Натуральный ряд чисел	Ранг	Разность d	d^2
1,6	1,59	1	5	−4	16
2,9	1,71	2	8	−6	36
4	1,58	3	4	−1	1
5,7	1,61	4	6	−2	4
6,8	1,48	5	3	+2	4
8,5	1,4	6	2	+4	16
10	1,24	7	1	+6	36
11,5	1,8	8	9	−1	1
14,6	1,67	9	7	+2	4

Примечание. $\Sigma d^2 = 118$.

изменчивости показателей свойств выветрелых пород по глубине не обнаруживается;

определение наличия тренда в изменчивости физико-механических свойств лучше проводить по средним значениям показателей, так как частные реализации могут быть случайными;

критерий скачков, если последовательность имеет небольшую длину (Р.Миллер, Дж.Кан), дает лишь косвенные указания на наличие или отсутствие тренда;

критерий ранговой корреляции Спирмена пригоден только для проверки предположения о наличии линейного тренда.

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИЧИН ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ПОРОДАХ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

При изучении изменчивости физико-механических свойств выветрелых пород важным является не только выявление характера изменчивости, но и причин, обусловливающих эту изменчивость.

Установление основных причин изменчивости имеет и научное, и практическое значение, так как позволяет прогнозировать изменение изучаемого показателя свойств с глубиной и в необходимых случаях разрабатывать соответствующие мероприятия по мелиорации выветрелых пород.

Как было показано, показатели физико-механических свойств зависят от ряда факторов. Задача заключается в выделении основного фактора. Для выделения основного фактора, оказывающего решающее влияние на изменчивость физико-механических свойств, может быть использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Таблица 21

Данные для вычисления коэффициента ранговой корреляции

Номер образца	Глубина отбора, м	Число пластичности, %	Содержание карбонатов $CaCO_3$, %	Емкость поглощения катионов, мг-экв	Количество водорастворимых солей, %
1	2	3	4	5	6
1/7	0,2	22,4	0,68	24,89	0,13
2/7	0,5	24,6	0,45	23,95	0,30
3/7	1,4	16,2	9,98	18,58	0,25
4/7	1,6	19,7	6,81	21,51	0,75
7/7	3,5	20,5	7,94	22,31	0,90
8/7	4,5	13,5	10,44	16,4	1,40

Продолжение табл. 21

Ранг							
J_p	$CaCO_3$	v	s	d_{J_p}	d_v	d_s	d_{CaCO_3}
7	8	9	10	11	12	13	14
5	2	6	1	+3	−1	+4	−4
6	1	5	3	+5	+1	+3	−4
2	5	2	2	−3	0	0	+3
3	3	3	4	0	0	−1	0
4	4	4	5	0	0	−1	0
1	6	1	6	−5	0	−5	+5

Примечание. $N=6$. $\Sigma d_{J_p}^2 = 68$; $\Sigma d_v^2 = 2$; $\Sigma d_s^2 = 52$; $\Sigma d_{CaCO_3}^2 = 66$.

Покажем его использование на следующем примере. Из скважины, пройденной в коре выветривания майкопских глин Абхазии, из всех зон были отобраны образцы и проведены определения числа пластичности, карбонатности, содержания растворимых солей, емкости поглощения (табл. 21). Рассмотрим влияние на пластичность глин каждого из показателей в отдельности. Для этого запишем значения всех показателей в

виде рангов (графы 7-10). Вычислив разности между рангами числа пластичности и каждым из трех показателей (карбонатности, емкости поглощения и количеством воднорастворимых солей), запишем полученные значения в графах 11-13. Далее по формуле $\rho_s = 1 - \frac{6\Sigma d^2}{N(N^2-1)}$ вычисляем значения коэффициентов ранговой корреляции между числом пластичности и исследуемыми показателями:

$$\rho_{(J_p,CaCO_3)} = 1 - \frac{6 \cdot 68}{216} = -0{,}84;$$

$$\rho_{(J_p,v)} = 1 - \frac{6 \cdot 2}{216} = +0{,}94;$$

$$\rho_{(J_p,s)} = 1 - \frac{6 \cdot 52}{216} = +0{,}44.$$

Полученные значения коэффициентов ранговой корреляции свидельствуют о том, что наибольшее влияние на изменение числа пластичности в коре выветривания глин майкопской серии Абхазии оказывают изменения величин емкости поглощения и карбонатности пород. Чем больше емкость поглощения, тем больше значения числа пластичности; чем больше карбонатность пород, тем меньше пластичность глин. Изменение количества воднорастворимых солей в данном случае влияния на пластические свойства глин не оказывает.

Сопоставляя ранги карбонатности и емкости поглощения, получаем значение коэффициента ранговой корреляции ρ=-0,83. Оно свидетельствует о тесной связи между этими показателями. Таким образом, повышение карбонатности в коре выветривания сопровождается снижением емкости поглощения.

Приведенный пример указывает на перспективность применения корреляционного анализа для геологической интерпретации данных изменчивости свойств выветрелых пород.

РАСЧЛЕНЕНИЕ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ЗОНЫ ПО КОМПЛЕКСУ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВОЙСТВ ПОРОД

Отдельные зоны в корах выветривания не имеют резких границ и переходят одна в другую постепенно. Поэтому их визуальное разделение сложно и, как правило, имеет субъективный характер. Объективное расчленение кор выветривания на зоны может быть осуществлено путем геологического совместного анализа и анализа набора показателей физико-механических свойств пород с помощью того или иного математического критерия. Использование математического анализа для разделения коры выветривания на зоны в данном случае обосновано и с геологических позиций, так как при этом

обеспечивается выделение слоев, имеющих существенные различия с точки зрения их инженерно-геологических свойств.

Ниже рассматриваются некоторые методы расчленения коры выветривания на зоны по комплексу показателей физико-механических свойств: метод дискриминатора z_0, критерий $V_к$ Родионова, метод взвешивания координат точки разграничения Г.К.Бондарика.

Идея метода дискриминантной функции заключается в замене набора исходных показателей некоторым комплексным показателем $z=f(R_1, R_2, R_3, \ldots, R_n)$, представляющим собой комбинацию исходных признаков и содержащим максимально возможное количество информации.

По этому комплексному показателю производят разграничение коры выветривания на зоны. Неразличимые по отдельным признакам, совокупности оказываются существенно различными, когда они обобщены на базе коэффициента z_0 - дискриминантной функции. Анализ линейной дискриминантной функции в геологии впервые использовал А.В.Вистелиус (1950) для характеристики минерального состава тяжелой фракции песков. Впоследствии дискриминантные функции применяли в геологии С.В.Гольдин и В.А.Кутолин (1964), Р.Миллер и Д.Кан (1965), М.Е.Демина и О.М.Калинин (1968), Г.К.Бондарик (1968). Дискриминантный анализ требует применения ЭВМ, так как, хотя вычисления и не сложные, но чрезвычайно трудоемкие.

О.М.Калинин и Б.З.Докторов предложили для разграничения совокупностей по набору показателей использовать дискриминатор z_0. Этот метод используется в тех случаях, когда имеется возможность по каким-либо признакам установить положение границы, а метод позволяет проверить правильность их разграничения.

Дискриминатор имеет вид

$$z_0 = \sum_{i=1}^{m} \frac{\bar{R}_{1i} - \bar{R}_{2i}}{s_i^2} R_i, \text{ с порогом}$$

$$L = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m} \frac{(\bar{R}_{1i})^2 - (\bar{R}_{2i})^2}{s_i^2},$$

где m - число показателей свойств; $\bar{R}_{1i}$ - среднее значение i-го показателя для первой выборки; $\bar{R}_{2i}$ - то же, для второй выборки: R_i - частное значение i-го показателя: s_i^2 - сводная дисперсия i-го показателя по двум выборкам.

Сводную дисперсию подсчитывают по формуле

$$s_i^2 = \frac{1}{n_1+n_2-2}\left[\sum_{j=1}^{n_1}(R_{1ij} - \bar{R}_{1i})^2 + \sum_{j=1}^{n_2}(R_{2ij} - \bar{R}_{2i})^2\right],$$

где R_{1ij} и R_{2ij} - значения i-го показателя в первой и второй выборках (зонах коры); $\bar{R}_{1i}$ и $\bar{R}_{2i}$ - средние значения i-го показателя в разделяемых по совокупности признаков зонах выветривания; n_1 и n_2 - объемы первой и второй выборок.

При разделении совокупностей по дискриминатору z_0 расчет ведут в следующем порядке.

1. Вычисляют сводные дисперсии для показателей свойств, входящие в сравниваемые совокупности (s_1^2, s_2^2, ..., s_n^2).

2. Определяют значения $\frac{\bar{R}_{1i} - \bar{R}_{2i}}{s_i^2}$ для всех R_1, ...,R_m.

3. Полученные значения умножают на соответствующие исходные значения каждого показателя

$$R_i \frac{\bar{R}_{1i} - \bar{R}_{2i}}{s_i^2}.$$

4. Подсчитывают значения дискриминатора z_0, суммируя величины $R_i \frac{\bar{R}_{1i} - \bar{R}_{2i}}{s_i^2}$, полученные для комплекса исходных показателей, относящихся к одной глубине разреза коры выветривания.

5. Строят точечные диаграммы распределения дискриминатора, на которых показывают порог - границу между двумя зонами выветривания.

В качестве примера, иллюстрирующего применение метода дискриминатора для расчленения кор выветривания на зоны по нескольким показателям физико-механических свойств, приведен расчет дискриминатора для коры выветривания, сформировавшейся на алевролитах балкарского комплекса в районе Зеленчукской ГЭС. В пределах описываемой коры выделяются три зоны: трещинная (I), обломочная (II-III) и дисперсная (IV). Первая из них выделяется довольно четко. Граница между III и IV зонами выражена нечетко и визуально проведена довольно условно. Исходные данные, которые характеризуют III и IV зоны, выделенные на основании визуальной оценки, приведены в табл. 22.

Порядок расчета сводной дисперсии показан в табл. 23.

Подсчитав значение сводной дисперсии, получаем значения $(\bar{R}_{IVi} - \bar{R}_{IIIi})/s_i^2$ для естественной влажности (+2,6), плотности (-30), коэффициента пористости (+65), числа пластичности (+1,76). Умножаем полученные величины на соответствующие исходные значения каждого показателя

$$R_i \frac{\bar{R}_{IVi} - \bar{R}_{IIIi}}{s_i^2}$$

и записываем полученные произведения в табл. 23 (графы 1-4). Суммируя величины

$R_i \frac{\bar{R}_{IVi} - \bar{R}_{IIIi}}{s_i^2}$ по исходным показателям, получаем значение показателя z_0 (табл. 24).

Анализ полученных значений z_0 показывает, что по величине дискриминатора рассматриваемый разрез выветрелых пород четко разделяется на два слоя. Это также иллюстрируется точечной диаграммой распределения дискриминатора (рис. 26).

Для уточнения положения границы между зонами приведем расчет порога:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m} \frac{(\bar{R}_{IVi})^2 - (\bar{R}_{IIIi})^2}{s_i^2} = 63{,}7.$$

Значение порога L указывает, что граница между II и III зонами проходит между 7 и 8 м.

Д.А.Родионов разработал метод оценки однородности многомерных геологических совокупностей с помощью критерия V_k. Сущность метода заключается в том, что для суждения об однородности многомерной выборки подсчитывают значения критерия V_k, последовательно увеличивая объем выборки. Критерий

Таблица 22

Показатели физико-механических свойств пород в коре выветривания алевролитов балкарского комплекса района Зеленчукской ГЭС

Зона выветривания	Глубина опробования, м	Естественная влажность, доли единицы	Плотность, г/см^3	Коэффициент пористости	Число пластичности
IV	0,75	0,218	1,53	0,78	0,156
	1,35	0,231	1,58	0,73	0,163
	2,25	0,244	1,55	0,76	0,191
	2,7	0,228	1,53	0,78	0,184
	3,5	0,26	1,46	0,86	0,181
	4,2	0,213	1,62	0,68	0,176
	5,4	0,205	1,66	0,64	0,159
	7,1	0,205	1,68	0,63	0,138
	8,1	0,15	1,68	0,46	0,135
III	9	0,163	1,83	0,50	0,126
	9,5	0,161	1,89	0,45	0,126
	11	0,154	1,89	0,45	0,131

Таблица 23

Расчет сводной дисперсии и порога

Показатель свойств	Зона IV				Зона III				s_i^2	$\frac{\bar{R}_{IVi}-\bar{R}_{IIIi}}{s_i^2}$	$\frac{(\bar{R}_{IVi}-\bar{R}_{IIIi})^2}{s_i^2}$	L
	R_{IVi}	$\bar{R}_{IVi}$	$R_{IVi}-\bar{R}_{IVi}$	$(R_{IVi}-\bar{R}_{IVi})^2$	R_{IIIi}	$\bar{R}_{IIIi}$	$(R_{IIIi}-\bar{R}_{IIIi})$	$(R_{IIIi}-\bar{R}_{IIIi})^2$				
Естественная влажность	21,8	22,6	−0,8	0,64	15	15,6	−0,6	0,36	2,6	2,6	99	
	23,1		+0,5	0,25	16,3		+0,7	0,49				
	24,4		+1,8	3,24	16,1		+0,5	0,25				
	22,8		+0,2	0,04	15,4		−0,2	0,04				
	26		+3,4	11,56								
	21,3		−1,3	1,69								
	20,5		−2	4								
	20,5		−2,1	4,41								
	$n_{IV}=8$			Σ=25,83	$n_{III}=4$			Σ=0,78				
Плотность	1,53	1,58	−0,05	0	1,68	1,82	−0,14	0,02	0,008	−30	−102	
	1,58		0	0	1,83		+0,01	0				
	1,55		−0,03	0	1,89		+0,07	0,01				
	1,53		−0,05	0	1,89		+0,07	0,01				63,7
	1,46		−0,12	0,02								
	1,62		+0,04	0								
	1,66		+0,08	0,01								
	1,68		+0,01	0,01								
	$n_{IV}=8$			Σ=0,04	$n_{III}=4$			Σ=0,04				
Коэффициент пористости	0,78	0,73	+0,05	0	0,46	0,47	−0,01	0	0,004	65	78	
	0,73		0	0	0,50		+0,03	0				
	0,76		+0,03	0	0,45		−0,02	0				
	0,78		+0,05	0	0,45		−0,02	0				
	0,86		+0,13	0,02								
	0,68		−0,05	0								
	0,64		−0,09	0,01								
	0,3		−0,10	0,01								
	$n_{IV}=8$			Σ=0,04	$n_{III}=4$			Σ=0				
Число пластичности	15,6	16,9	−1,3	2,69	13,5	13	+0,5	0,25	2,23	1,76	52,3	
	16,3		−0,6	0,36	12,6		−0,4	0,16				
	19,1		+2,2	4,84	12,6		−0,4	0,16				
	18,4		+1,5	2,25	13,1		+0,1	0,01				
	18,1		+1,2	1,44								
	17,6		+0,7	0,49								
	15,9		−1	1								
	13,8		−3,1	9,61								
	$n_{IV}=8$			Σ=21,68	$n_{III}=4$			Σ=0,58				

Таблица 24

Расчет значений дискриминатора z_0

Показатель свойств	Зона IV							Зона III				
	0,75 м	1,35 м	2,25 м	2,7 м	3,5 м	4,2 м	5,4 м	7,1 м	8,1 м	9 м	9,5 м	11 м
Естественная влажность	56,8	60	63,2	59,4	67,4	55,3	53, 3	53,2	38,8	42,3	41,7	40
Плотность	−46	−47,2	−46,5	−45,9	−43,8	−48,5	−49,8	−51	−51	−54,8	−56,5	−56,5
Коэффициент пористости	51,3	47,3	59,3	51,2	55,8	44,2	41,6	40,9	30	32,5	29,3	29,3
Число пластичности	24,7	18,7	33,6	32,4	31,9	31	28	24,5	23,7	22,1	22,1	23
z_0	89,5	78,8	109,6	97,1	111,3	82	73,1	67,5	41,5	42,1	36.6	25,8

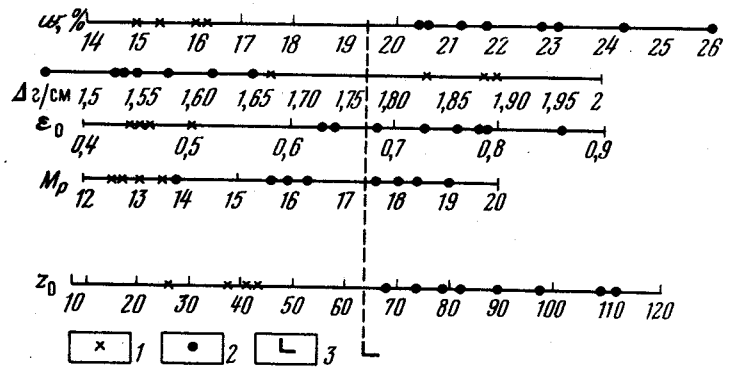


Рис. 26. Точечная диаграмма распределения показателей свойств в коре выветривания алевролитов в районе Зеленчукской ГЭС и диаграмма распределения дискриминатора:

1 – II зона; *2* – III зона; *3* – порог

рассчитывают по формуле

$$V_k = \frac{n-1}{nk(n-1)} \sum_{i=1}^{m} \frac{\left[(n-k)\sum_{t=1}^{k} R_{ti} - k\sum_{t-k+1}^{n} R_{ti}\right]^2}{\sum_{t=1}^{n} R_{ti}^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{t=1}^{n} R_{ti}\right)^2}, \qquad (20)$$

где n - число членов во всей совокупности 1, 2, 3, ..., k, $k+1$, ..., n; k - порядковый номер члена совокупности, по которому проходит предполагаемая граница однородных частей выборки; m - число показателей состава и свойств в многомерной выборке; R_{ti} - значение признака.

После подсчета значений V_k проверяют гипотезу H об однородности выборочной совокупности. Если все значения V_k удовлетворяют условию $V_k \leq \chi^2$ при заданном уровне значимости q и m - степени свободы, то считается, что экспериментальные данные не противоречат гипотезе H_0 и многомерная выборка является однородной, т.е. внутри нее нельзя провести границы. Если же хотя бы одно из значений V_k окажется больше χ^2, то выборку следует разделить на две по $V_{k\max}$ и продолжить проверку гипотезы об однородности (H_0) для каждой из выделенных частей совокупности. Последовательную проверку продолжают до тех пор, пока все выделенные части совокупности не окажутся однородными. Использование критерия V_0 при расчленении кор выветривания на зоны позволяет проверить существенность границ.

При использовании критерия V_k, так же как и при использовании дискриминатора, следует установить значимость признаков, по которым нужно вести расчет и, по возможности, сократить их число. При этом, естественно, следует исключить все признаки, которые не несут дополнительной информации или являются производными.

Приведем пример использования критерия V_k для расчленения на зоны коры выветривания алевролитов балкарского комплекса района Зеленчукской ГЭС. Показатели физико-механических свойств выветрелых пород приведены в табл. 25.

В рассматриваемом примере объем многомерной выборки n=12, число показателей свойств m=4. Задаемся уровнем значимости q=0,01 и по специальной таблице находим для m 1-3 степени свободы χ^2=11,3. Подсчитываем значения критерия V_k для различных интервалов глубин испытаний.

Вычисления удобно начать с подсчета выражения $\Sigma R_{ti}^2 - \frac{1}{n}(\Sigma R_{ti})^2$, входящего в знаменатель формулы (20). Это выражение представляет собой разность суммы квадратов значений показателя какого-либо свойства пород и квадрата сумм значений этих же показателей, деленного на число членов в последовательности. Вычисленные значения для различных показателей свойств записываются в графы 11-14 табл. 25.

Далее принимая, что граница между слоями проходит по K=1, вычисляем выражение для показателя влажности:

$$\frac{\left[(n-k)\sum_{1}^{k} R_W - \sum_{k+1}^{n} R_W\right]^2}{\sum_{1}^{n} R_W^2 - \frac{1}{n}(\sum R_W)^2} = \frac{\left[(12-1)\cdot 21,8 - 1\cdot 221,5\right]^2}{164,4} = 2,16.$$

Подобным образом производим расчет для остальных показателей свойств (плотности скелета, коэффициента пористости, числа пластичности) и суммируя их записываем результаты в графу 15. После этого подсчитываем значение V_k по формуле (20):

$$V_k = \frac{12-1}{12\cdot 1\cdot (12-1)}\cdot 25,4 = 2,3.$$

Аналогичные вычисления производим для k = 2, 3, ..., 10 и полученные значения V_2, V_3, ..., V_{10} записываем в графу 16. Сравнение значений V_k с величиной критерия χ^2 показывает, что в девяти случаях V_k оказывается больше допустимого значения. Следовательно, гипотеза об однородности многомерной выборки отвергается и проверяемую выборочную совокупность нужно разбить по крайней мере на две части. Проведем границу

Таблица 25

Подсчет значений критерия для совокупности $K=1-11$

Глубина, м	Влажность		Плотность		Коэффициент пористости		Число пластичности	
	R_w	R_w^2	R_Δ	R_Δ^2	R_ϵ	R_ϵ^2	$R_{мр}$	$R_{мр}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,75	21,8	475,2	1,53	2,34	0,78	0,61	15,5	243,4
1,35	23,1	533,6	1,58	2,5	0,73	0,53	16,3	265,7
2,25	24,4	595,4	1,55	2,4	0,76	0,58	19,1	364,8
2,7	22,8	519,8	1,53	2,34	0,78	0,61	18,4	338,6
3,5	26	676	1,46	2,13	0,86	0,74	18,1	327,6
4,2	21,3	453,7	1,62	2,62	0,67	0,45	17,6	309,8
5,4	20,6	424,4	1,66	2,76	0,64	0,41	15,9	252,8
7,1	20,5	420,2	1,68	2,82	0,63	0,4	13,8	190,4
8,1	15	225	1,68	2,82	0,46	0,21	13,5	182,2
9	16,3	265,7	1,83	3,35	0,50	0,25	12,6	158,8
10	15,4	237,2	1,89	3,57	0,45	0,2	13,1	171,6
11	16,1	259,2	1,89	3,57	0,45	0,2	12,6	158,8
$n=12$	243,3	5085,4	–	19,1	32,2	7,71	5,19	186,6
$(\Sigma R_i)^2$	59050	–	396	–	59,44	–	34600	–
$\Sigma R_i^2 - \frac{1}{n} \times (\Sigma R_i)^2$	164,4	–	0,22	–	0,22	–	50,3	–

по $V_{k\max}$=44,75 между 7 и 8 м глубины. Далее продолжаем проверку гипотезы об однородности выделенных частей совокупности: первой части совокупности, характеризующей интервал глубин 1-7 м ($V_{k\text{III}}$), и второй части совокупности, отвечающей интервалу глубин 7-11 м ($V_{k\text{II}}$). Для первой части выборки имеем следующие данные: n=8, k=1-7, m=4; для второй части - n=4, k=1-3, m=4. Значения критериев $V_{k\text{III}}$ и $V_{k\text{II}}$ для

K	$\frac{[(n-k)\sum_1^k R_W - k\sum_{k+1}^n R_W]^2}{\sum_{t=1}^n R_W^2 - \frac{1}{n}(\Sigma R_W)^2}$	$\frac{[(n-k)\sum_1^k R_\Delta - k\sum_{k+1}^n R_\Delta]^2}{\sum_{t=1}^n R_\Delta^2 - \frac{1}{n}(\Sigma R_\Delta)^2}$	$\frac{[(n-k)\sum_1^k R_\epsilon - k\sum_{k+1}^n R_\epsilon]^2}{\sum_{t=1}^n R_\epsilon^2 - \frac{1}{n}(\Sigma R_\epsilon)^2}$	$\frac{[(n-k)\sum_1^k R_{мр} - k\sum_{k+1}^n R_{мр}]^2}{\sum_{t=1}^n R_{мр}^2 - \frac{1}{n}(\Sigma R_{мр})^2}$	$\frac{\sum_{t=1}^n [(n-k)\sum_1^k R_{ti} - k\sum_{k+1}^n R_{ti}]^2}{\sum_{t=1}^n R_{ti}^2 - \frac{1}{n}(\Sigma R_{ti})^2}$	V_k
10	11	12	13	14	15	16
1	2,16	10,40	12,4	0,002	25,4	2,3
2	138	28	33,1	1,75	175,65	8
3	62	41	76	54	233	10,1
4	160	147,7	204	151	762,7	18,4
5	240	44	454	258	996	26
6	277	265	307	403	1252	31,9
7	287	328	241	439	1295	34
8	197	6580	1560	310	8647	44,75
9	205	300	175	187	867	29,4
10	92,5	144	96,5	83,6	416	9,1
11	15,3	33,8	24,2	13,7	87	7,3
2964,5						
–						
–						

первой и второй частей выборки приведены ниже:

k	1	2	3	4	5	6	7
$V_{k\text{III}}$	1,25	1,3	0,6	3,72	9,5	11,1	6,1
$V_{k\text{II}}$	4,35	6,8	6,7	-	-	-	-

Полученные значения V_k не превышают значения χ^2=11,3, следовательно гипотеза об однородности проверяемых много-

мерных выборках второго порядка должна быть принята. Дальше должна следовать оценка значимости выделенных границ, но так как у нас выделилась только одна граница, то эта процедура исключается.

Таким образом, граница между II и III зонами коры выветривания алевролитов балкарского комплекса проходит на глубине между 7 и 8 м. Полученные данные полностью совпадают с данными, полученными при расчленении этого же разреза с помощью дискриминатора z_0.

Следует отметить, что применение критерия V_k при расчленении многомерных совокупностей не требует сложных расчетов, но является трудоемким и требует применения ЭВМ в тех случаях, когда число признаков, входящих в многомерную совокупность велико, а объем выборки - большой.

Г.К.Бондарик [4] предложил более простой способ расчленения многомерных совокупностей, который может быть применен для расчленения кор выветривания на зоны. Сущность метода заключается в том, что на основании данных об изменении в исследуемом направлении разных признаков, входящих в совокупность, выделяют границу между совокупностями отдельно по каждому признаку (показателю свойств пород). Затем проверяют значимость выделенных границ с помощью соответствующего критерия. После чего, применяя процедуру взвешивания, находят среднее взвешенное значение границы по коэффициенту изменчивости разности средних значений показателя для разграниченных частей выборки.

Расчленение разреза при помощи этого метода сводится к следующим операциям:

1) проводят анализ данных измерения показателей состава и свойств пород и исключают незначимые показатели и показатели, являющиеся производными от основных;

2) составляют графики изменения в исследуемом направлении, принятых для анализа показателей состава и свойств породы, устанавливают ориентировочные границы по отдельным показателям;

3) для различных показателей определяют оценки средних значений и их дисперсии для выделенных зон выветривания;

4) проверяют для каждого показателя существенность или несущественность различия средних значений для соседних зон по критерию

$$\Delta\bar{R}-\bar{R}_{i+1,k} - \bar{R}_{i,k} \leq 2\sigma_{\bar{R}_{i+1,k}-\bar{R}_{i,k}},$$

$$\sigma_{\bar{R}_{i+1,k}-\bar{R}_{i,k}} = \sqrt{\frac{\sigma^2_{i+1,k}}{n_{i+1}} + \frac{\sigma^2_{i,k}}{n_{i,k}}},$$

где n_{i+1} и n - объемы выборок показателя R_k в $(i+1)$ и i-м слое соответственно;

5) подсчитывают коэффициент изменчивости разности средних значений показателя

$$V_{\Delta R_k} = \frac{\sigma_{\bar{R}_{i+1,k}-\bar{R}_{i,k}}}{\Delta\bar{R}_k};$$

6) рассчитывают среднее взвешенное значение точки, отвечающей границе между зонами выветривания по формуле

$$h_{i+1,k} = \frac{\sum_{k=1}^{m-1} h_k \cdot V_{\Delta\bar{R}_k}}{\sum_{k=1}^{m-1} V_{\Delta\bar{R}_k}}. \qquad (21)$$

Покажем применение способа на примере. С этой целью используем данные по коре выветривания алевролитов балкарского комплекса, по которым рассчитывались границы с помощью критерия z_0 и V_k. По графикам изменения естественной влажности, объемной массы скелета, коэффициента пористости и

Таблица 26

Оценки средних значений и стандартные отклонения показателей свойств II и III зон

Зона выветривания	Оценка статистик	Показатель свойств			
		W_0	γ	ϵ_0	J_p
III	$\bar{R}_{III}$	22,6	1,59	0,73	17,3
	σ_{III}	±19,2	±0,07	±0,08	±1,3
II	$\bar{R}_{II}$	15,6	1,87	0,47	13,1
	σ_{II}	±0,63	±0,0035	±0,0024	±0,51

Таблица 27

Расчет коэффициента изменчивости

Показатель свойств	$\Delta\bar{R}_{III,II}$	$\sigma_{\Delta R}$	Проверка значимости границ по отдельным показателям	$V_{\Delta R}$
Влажность	7	0,77	$7 > 2 \cdot 0{,}77$ Граница значимая	0,11
Плотность	0,28	0,03	$0{,}28 > 2 \cdot 0{,}03$ То же	0,1
Пористость	0,26	0,03	$0{,}26 > 2 \cdot 0{,}03$ "	0,11
Число пластичности	4,2	0,5	$4{,}1 > 2 \cdot 0{,}5$ "	0,12

числа пластичности, визуально границы могут быть проведены соответственно на глубинах 7,5-8,5 м; 7,5-6,5 м.

Основные статистики показателей свойств приведены в табл. 26, 27.

Проверяем существенность различия оценок средних значений показателей по критерию $\Delta\bar{R}_{II,III}=\bar{R}_{III}-\bar{R}_{II}>2\sigma_{\Delta R}$,

где $\sigma_{\Delta R}=\sqrt{\frac{\sigma^2_{III,R}}{n_{III,R}}+\frac{\sigma^2_{II,R}}{n_{II,R}}}$.

Используя выражение (21), подсчитываем среднюю взвешенную глубину, по которой проходит граница между III и II зонами выветривания:

$h_{III,II}$ = 7,48 м.

Полученные результаты по рассмотренным трем методам дали очень близкие значения. Поэтому, учитывая сложность критерия, для практики расчленения кор выветривания, можно рекомендовать метод взвешивания координат точки разграничения Г.К. Бондарика как более простой.

Расчленение элювия методом "корреляции накопленных сумм" *

Для расчленения элювиальных грунтов на инженерно-геологические элементы можно использовать наглядный графический метод "корреляции накопленных сумм" значений показателей свойств грунта. Суть его заключается в построении по данной линии сканирования (разрезу или профилю) графиков связи накопленных сумм значений показателей; по одной оси нарастающим итогом откладываются значения одного из показателей свойств грунта (допустим, плотности), по другой - другого (например, показателей пластичности или сжимаемости). Масштабы по осям при построении графиков зависят от диапазона изменения свойств и количества определений по глубине или в плане по данной линии сканирования.

Если свойства грунта не меняются или их изменение на данном интервале разреза определяется одним и тем же набором факторов, то в пределах этого интервала график связи накопленных сумм теоретически должен представлять собой прямую линию. При этом используется свойство накопления систематической полезной информации о среде с относительным снижением уровня несистематических помех (ошибок определений, высокочастотных вариаций свойств и т.п.).

* Раздел написан Т.М.Костеровой.

Наличие точки перегиба на графике связи накопленных сумм свидетельствует об изменении радиуса корреляции свойств, т.е. об общем изменении характеристик грунта, его структуры и состояния. При рассматриваемой методике расчленения по-существу проверяется коррелированность между собой не самих параметров среды, а их приращений на различных расстояниях от точки отсчета (например от дневной поверхности).

При изменении свойств грунта, естественно, меняется и характер коррелированности приращений (или накопленных сумм) значений ее параметров, т.е. изменяется угол наклона графика. Точка перегиба в этом случае фиксирует положение границы изменения свойств и состояния грунта. В случае постепенного изменения среды угол наклона графика изменяется также постепенно - тогда положение границы определяет уже не точка, а "зона" перегиба.

Достоинством рассматриваемого метода является возможность разграничения грунта не только по его свойствам, но и по их взаимосвязи. Подобный прием позволяет довольно четко выделять в разрезе горизонты элювиальных грунтов с реликтовой новообразованной структурой. Графики корреляции накопленных сумм показателей свойств элювия плагиогранитов в районе Челябинска представлены на рис. 27. Точки перегиба графиков соответствуют границе, расположенной на глубине 10,5-12 м, отделяющей элювиальные грунты с реликтовой структурой (зона VI-а) от грунтов с новообразованной структурой (зона IV-б). Точность разграничения, проверенная построением графиков по различным свойствам, составляет 1-2 м.

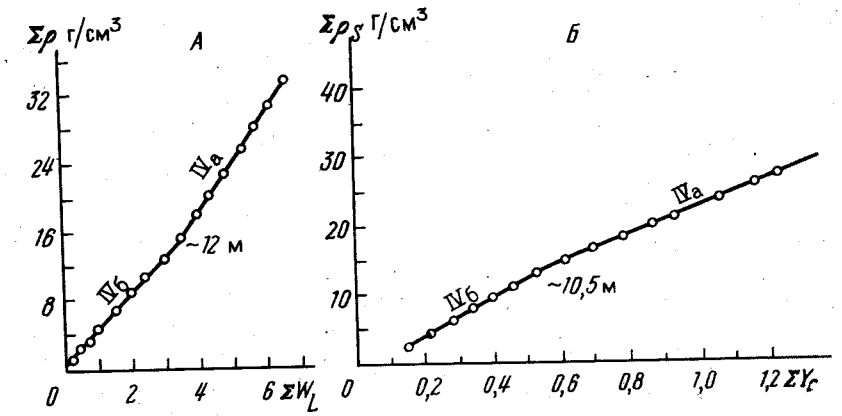


Рис. 27. Графики корреляции накопленных сумм значений предела текучести (*А*) и числа пластичности (*Б*) в горизонтах с "реликтовой" структурой (IVа) и с новообразованной структурой (IVб) элювия гранодиоритов (г. Челябинск)

ПОЛУЧЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЫВЕТРЕЛЫХ ПОРОД ПО ЗОНАМ

К вычислению обобщенных показателей следует приступать только после расчленения коры выветривания на зоны. Принятая в инженерной геологии статистическая обработка показателей физико-механических свойств для получения обобщенных показателей применима для выборок, состоящих из 15-20 членов и более. При изучении разреза выветрелых пород редко удается выполнить такое количество испытаний для каждой из зон. Поэтому возникает необходимость в получении статистических характеристик по небольшому количеству определений (табл. 28). С этой целью могут быть использованы приближенные методы оценки статистик для малых выборок:

среднее значение $x = \Sigma\, x_i/n$;

размах значений $R = x_{max} - x_{min}$;

среднее квадратическое отклонение $\sigma = R/\alpha_n$;

коэффициент изменчивости $V = \frac{\sigma}{x} \cdot 100\%$,

где x_i - частное значение показателя; n - число определений; x_{max} и x_{min} - соответственно максимальное и минимальное значения; α - табулированная величина, зависящая от n (приведена ниже).

n ..	2	3	4	5	6
α ..	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534
n ..	12	13	14	15	16
α ..	3,258	3,336	3,407	3,472	3,532
n ..	7	8	9	10	11
α ..	2,704	2,847	2,97	3,078	3,173
n ..	17	18	19	20	
α ..	3,588	3,64	3,689	3,735	

Таблица 28

Пример расчета статистических характеристик показателей плотности пород коры выветривания мергелей эоцена (Грузия)

Зона выветривания	Плотность пород в выработке, г/см^3,			Статистическая характеристика			
	818	668	448	n	$\bar{x}$	σ	V
IV	–	1,54	1,83	2	1,68	0,25	15,2
III	2,07	1,92	1,8	6	1,96	0,06	3,07
	1,98	2	2,01				
II	2,01	2,04	2,04	5	2,06	0,05	2,42
	–	2,13	2,07				
	2,08	2,02	2,21	7	2,13	0,08	3,77
I	2,08	2,2	2,23				
	2,12	–	–				

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТЕПЕНИ ВЫВЕТРЕЛОСТИ И СКОРОСТИ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Оценка степени изменения показателей свойств пород при выветривании имеет большое значение для решения ряда инженерно-геологических задач. Некоторыми специалистами в разные годы предлагались количественные методы оценки степени выветрелости пород (табл. 29).

Анализ формул (графа 3) показывает, что большинство специалистов пыталось выразить изменение свойств, сопоставляя их показатели для выветрелых и невыветрелых пород. Не отрицая возможности использования предложенных методов оценки выветрелости, следует отметить, что они имеют ограниченное применение, т.е. в них не учтено время изменения показателей (скорость выветривания) или же мощность породы, для которой определяется различие между значениями показателя (интенсивность выветривания).

Н.В. Коломенский, С.В. Дроздов и другие специалисты предложили определять скорость выветривания пород как приращение мощности коры выветривания, отнесенное ко времени наблюдения, или время образования некоторого слоя продуктов выветривания на сверхвскрытых породах. Предлагаемый ими метод дает возможность установить минимальную мощность защитных целиков при вскрытии котлованов или время, в течение которого можно оставлять породы в котловане открытыми.

Не менее важными для прогноза изменения физико-механических свойств пород во времени, а значит для прогноза устойчивости сооружения, откосов и т.д., являются данные о скорости изменения показателей свойств по времени, под которой следует понимать отношение разности между значениями какого-либо показателя свойств породы, измеренного в одной и той же точке массива, к промежутку времени между измерениями:

$$V_R = \frac{R_1 - R_o}{t_1 - t_o} = \frac{\Delta R}{\Delta t},$$

где R_1 и R_o - значения показателя, измеренного соответственно в моменты времени t_1 и t_o.

Можно предположить априори, и это подтверждается данными Б.И. Долматова (1967) и других исследователей, что скорость изменения показателя при выветривании породы не постоянна. График вида $V_R = f(T)$, где T - время протекания процесса выветривания, в первом приближении будет представлять собой кривую гиперболического вида, асимптотически приближающуюся к некоторой условно постоянной скорости $V_д$, являющейся скоростью денудации (рис. 28). Учитывая, что скорость изменения показателя непостоянна, Ю.Д. Матвеев (1968) предложил выражение для вычисления средней скорости изменения показа-

Таблица 29

Автор, год публикации формулы	Показатель	Формула оценки степени выветрелости
1	2	3
Розиваль, 1896	Показатель выветрелости V	$V = (H - h)/h$, где h – действительная твердость; H – теоретическая твердость ($100\,H = P_1 h_1 + P_2 h_2 + \ldots + P_n h_n$, где $P_1, P_2, \ldots, P_n$ – части объема породы, приходящиеся на отдельные минералы); $h_1, h_2, \ldots, h_n$ – средняя твердость пород
В.Е. Левицкий, 1967	Коэффициент выветрелости $K_в$	$K_в = \frac{\Sigma a_i n_i}{\Sigma n_i}$, где a_i – условный числовой коэффициент группы выветрелости; n_i – число зерен той или иной группы
А. Хэмрол, 1962	Показатель степени выветрелости пород i	$i = \frac{q_2 - q_1}{q_1}$, где q_1 – масса образца в сухом состоянии; q_2 – масса образца после водонасыщения при быстром поглощении (1,5–2 ч)
С.Д. Воронкевич, 1963	Показатель степени сохранности Вс	$Вс = \frac{\epsilon_f^A - \epsilon_c}{\epsilon_f^A - \epsilon_0}$, где ϵ_f^A – коэффициент пористости породы в состоянии предела текучести; ϵ_c – коэффициент пористости породы наблюдаемого участка зоны выветривания: ϵ_0 – коэффициент пористости породы в невыветрелом состоянии
П.Н. Панюков, 1962	Показатель стойкости (выветриваемости)	$n = R_1/R_н$, где R_1, $R_н$ – прочности пород соответственно начальная и через год после ее обнажения
Б.В. Швец, 1968	Показатель выветрелости $K_В$	$K_В = \frac{K_1 - K_2}{K_1}$, где $K_1 = q_1/q_2$ (q_1 – масса мелкозема менее 2 мм, q_2 – масса крупных частиц более 2 мм); K_2 – показатель истирания в барабане
Г.С. Золотарев, 1969	Коэффициент выветрелости Вс	$Вс = \frac{F_н - F_0}{F_н - F_A}$, где F – характерный показатель элювия (плотность, пористость, сопротивление одноосному сжатию, сцепление, содержание оксидов железа и т.д.); индексы н, о, A – соответствуют невыветрелым, оцениваемым и предельно выветрелым породам $0{,}9 < Вс < 1$ сильно выветрелые; $0{,}7 < Вс < 0{,}9$ выветрелые; $0{,}3 < Вс < 0{,}7$ средневыветрелые; $0 < Вс < 0{,}3$ слабо выветрелые породы
Ю.Д. Матвеев, 1970	Три стадии скорости развития процесса: интенсивная, замедленная, затухающая	1. Стадия интенсивного выветривания: $m = a\sqrt{t}$, где m – мощность зоны выветривания; t – время выветривания; a – коэффициент, численно равный мощности зоны выветривания, образовавшиеся за год. 2. Стадия замедленного выветривания $t_3 = m^2/a^2$
Л.А. Ярг, 1974	Показатель интенсивности выветривания K_R	$K_R = \frac{\bar{R}_{i,n} - \bar{R}_{i,n-1}}{\frac{h_n}{2} + \frac{h_{n-1}}{2}} = 2\Delta R$, где $\bar{R}$ – среднее значение показателя свойств пород для соответствующей зоны выветривания; h – мощность зоны выветривания K_R – изменяется от 0 до ∞
СНиП 1.02.07–87	Коэффициент выветрелости крупнообломочной фракции	Слабо выветрелые $\frac{0 - 0{,}5}{0 - 0{,}33}$ Выветрелые $\frac{0{,}5 - 0{,}75}{0{,}33 - 0{,}67}$
	$K_{u,w}$ (то же, что $K_В$, по Б.В. Швецу)	Сильно выветрелые $\frac{0{,}75 - 1}{0{,}67 - 1}$ Значения коэффициента (в числителе коэффициент для магматических и метаморфических пород, в знаменателе – для осадочных сцементированных пород)

Продолжение табл. 29

Автор, год публикации формулы	Показатель	Формула оценки степени выветрелости
1	2	3

теля за год. Это выражение имеет вид:

$$V_i^в = a/\sqrt{t},$$

где a - постоянная, численно равная средней скорости выветривания за первый год; t - время выветривания.

Исследование изменения показателей физико-механических свойств в коре выветривания пород, относящихся к разным

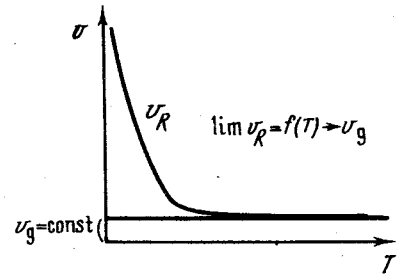


Рис. 28. Скорость изменения коэффициента пористости алевролитов ордовика (бассейн р. Ангары)

группам (осадочные, магматические, метаморфические) (рис. 29), потребовало разработки характеристики, используя которую можно было бы сопоставлять интенсивность одного и того же показателя свойств (например, временного сопротивления сжатию в разных породах). В качестве такого показателя автор предлагает показатель интенсивности выветривания, представляющий собой отношение приращения величины показателя какого-либо свойства к приращению мощности выветрелых пород.

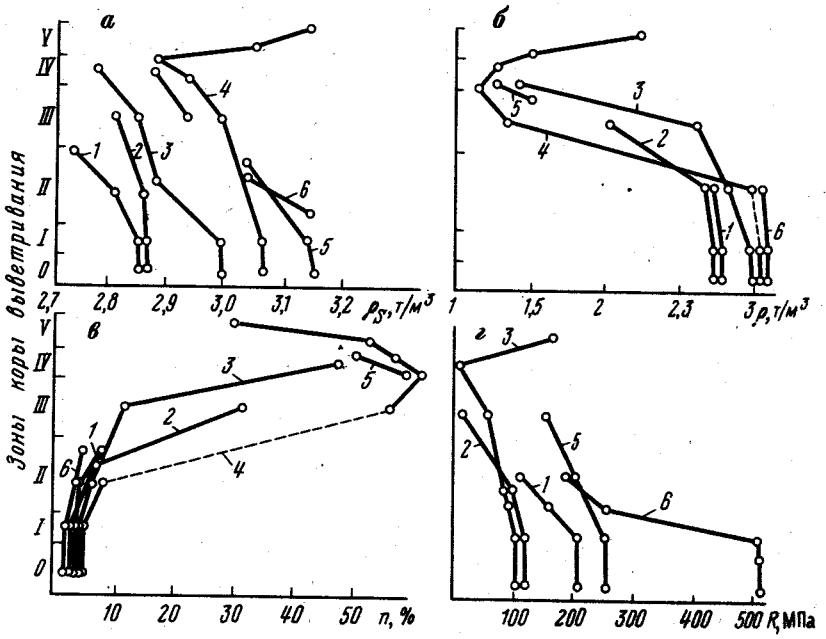
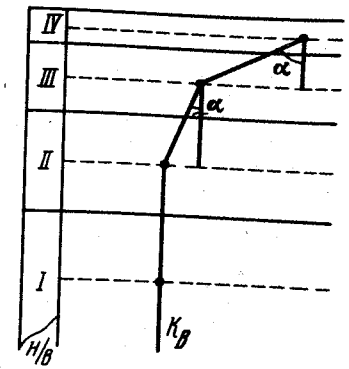


Рис. 29. Графики изменения плотности минеральных частиц (*а*), плотности (*б*), пористости (*в*) и сжимаемости (*г*) пород основного состава различного возраста:

1 – палеозой (Болгария); *2* – триас (СССР, Приморск); *3* – пермь (Вьетнам); *4* – мезозой (Гвинея); *5* – девон (СССР, Урал); *6* – неоген (Болгария)

Рис. 30. Показатель интенсивности выветривания горных пород по зонам коры выветривания



Показатель выражается формулой:

$$K_R = \frac{\bar{R}_{i,n} - \bar{R}_{i,n-1}}{h_n - h_{n-1}} = \frac{\Delta R}{\Delta h},$$

где R_i - среднее значение какого-либо i-го показателя физико-механических свойств пород для соответствующих зон коры выветривания; n - зоны выветривания.

Этот показатель численно равен тангенсу наклона графика $R=f(H)$ к оси ординат (рис.30). Показатель интенсивности выветривания может изменяться от 0 до ± ∞. Если значение показателя свойств породы в коре выветривания не изменяется, то $\Delta R = 0$ и соответственно $K_R = \operatorname{tg}\alpha = 0$. Чем больше разность между значениями показателей какого-либо свойства, тем больше значение показателя интенсивности. Предлагаемый показатель может иметь знак "+" или "–" в зависимости от увеличения или уменьшения значения показателя свойств. При увеличении значения показателя свойств (например, пористости) показатель интенсивности выветривания будет положительным; в случае уменьшения значения показателя свойств (плотности, прочности) показатель K_R будет отрицательным.

Анализ показателя интенсивности выветривания, рассчитанный для сопротивления сжатию эффузивных пород Болгарии позволил установить, что закономерность изменения показателя сопротивления сжатию связана с коэффициентом кислотности исходных пород. Интенсивность выветривания обратно пропорциональна коэффициенту кислотности. По интенсивности выветривания породы ранжируются в ряд: основного состава ($K_{R_{сж}}$ = 0,59-5,14)>среднего состава ($K_{R_{сж}}$ = 0,41-2,58)>кислого состава ($K_{R_{сж}}$ = 0,17-0,37)>щелочного состава ($K_{R_{сж}}$ =0,11). Такая закономерность связана с увеличением количества неустойчивых к выветриванию минералов.

Рассмотренный пример свидетельствует о перспективности использования данного показателя для сравнительного анализа изменения свойств пород в различных корах выветривания, выявления закономерностей изменения свойств выветрелых пород и установления причин их изменения.

Список литературы

1. *Акинфиев Н.Н.* Алгоритм расчета гетерогенных равновесий для микро-ЭВМ. - Геохимия, 1986, № 6.
2. *Бондарик Г.К.* Общая теория инженерной (физической) геологии. М., Недра, 1981.
3. *Бондарик Г.К.* Методика инженерно-геологических исследований., М., Недра, 1986.
4. *Бондарик Г.К., Комаров И.С., Ферронский В.И.* Полевые методы инженерно-геологических исследований. М., Недра, 1967.
5. *Вопросы* инженерно-геологического изучения процессов и кор выветривания/ Под ред. Г.С.Золотарева. М., Изд-во МГУ, 1981.
6. *Емельянов В.А.* Полевая радиометрия влажности и плотности почвогрунтов. М., Атомиздат, 1980.
7. *Золотарев Г.С.* Инженерная геодинамика. М., Изд-во МГУ, 1983.
8. *Кальбергенов Р.Г.* Методика определения физико-механических свойств крупнообломочных грунтов. Автореф. канд. дис. М., 1987.
9. *Кашик В.П., Карпов П.К.* Физико-химическая теория образования зональности в коре выветривания. Новосибирск, Наука, 1987.
10. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. Л., Недра, 1986.
11. *Методическое* пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород/Под ред. Е.М.Сергеева. М., Недра, 1984.
12. *Методы* геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии/С.Р.Крайнов, Ю.В.Шваров, Д.В.Гричук и др. М., Недра, 1988.
13. *Молоков Л.А.* Инженерно-геологические процессы. М., Недра, 1985.
14. *Миллер Р., Кан Дж.* Статистический анализ в геологических науках. М., Мир, 1965.
15. *Наумов Г.В., Рыженко Б.И., Хадаковский И.Л.* Справочник термодинамических величин. М., Атомиздат, 1971.
16. *Никитин В.Н.* Основы современной сейсмики. М., Изд-во МГУ, 1981.
17. *Применение* TWK при оценке устойчивости скальных массивов. - В сб.: Инженерная геология, 1982, № 2.
18. *Ранатунга Н.Г.* Изучение кор выветривания при инженерно-геологических исследованиях для гидротехнического строительства Шри-Ланки. Автореф. канд. дис. М., 1985.
19. *Розовский Л.Б.,Зелинский И.П.* Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Одесса, Изд-во ОГУ, 1980.
20. *Склоновые* процессы (фотограмметрический метод изучения склоновых процессов). М., Изд-во МГУ, 1987, вып. 2.
21. *Смирнов И.В., Дунин-Борковский И.В.* Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений. М., Наука, 1985.
22. *Справочник* по инженерной геологии/Под ред. М.В.Чуринова. М., Недра, 1981.
23. *Федоров В.И.* Методика оценки прочности и сжимаемости обломочно-глинистых грунтов. - В сб.: Основания, фундаменты, механика грунтов. 1984. № 3.
24. *Ферронский В.И., Грязнов Т.А.* Пенетрационный каротаж. М., Недра, 1980.
25. *Ярг Л.А., Молоков Л.А.* Инженерная геология Северного Вьетнама. М., Изд-во МГРИ, 1981.
26. *Ярг Л.А.* Изменение физико-механических свойств пород при выветривании. М., Недра, 1974.
27. *Ярг Л.А.* Инженерно-геологическое изучение процесса выветривания и кор выветривания. М., Недра, 1987.
28. *Ярг Л.А., Кувшинников В.М.* Механизм и прогноз формирования TWK кор выветривания карбонатных пород.- Инженерная геология, 1985, № 1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава 1.

Процесс выветривания и его продукт 5

Глава 2.

Инженерно-геологическое изучение кор выветривания 21

Глава 3.

Инженерно-геологическое исследование процесса выветривания в полевых условиях 50

Глава 4.

Изучение процесса выветривания в лабораторных условиях 60

Глава 5.

Обработка информации о коре выветривания и процессе выветривания 80

Список литературы 138

Ярг Л.А.

Я 71 Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания.- М.: Недра, 1991.- 139 с.: ил.,

ISBN 5-247-02371-4

Приведены основные понятия процесса выветривания и его продукта - коры выветривания. Рассмотрена взаимосвязь формирования кор выветривания с региональными, зональными, техногенными факторами, определяющими пространственную изменчивость кор. Описаны полевые и лабораторные методы изучения состава и свойств пород коры выветривания. Изложены методы инженерно-геологических исследований - режимные, повторной документации, натурного моделирования. Уделено внимание математическим методам обработки инженерно-геологической информации.

Для инженеров-геологов, изыскателей, строителей.

Я $\frac{1804090000\text{-}213}{043(01)\text{-}91}$ 258-91 ББК 26.3

ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

Ярг Людмила Александровна

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА И КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

Заведующий редакцией Е.И.Кит
Редактор издательства М.В.Рогачева
Обложка художника Б.К.Силаева
Художественный редактор О.Н.Зайцева
Технические редакторы Ю.В.Втехина, Н.С.Анашкина
Корректор Т.Н.Черная
Оператор А.В.Глазунова

ИБ № 8935

Подписано в печать с репродуцированного оригинал-макета 05.05.91. Формат 60 x 88 1/16. Бумага офсетная № 2. Гарнитура Пресс-роман. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 8,82. Усл. кр.-отт. 9,06. Уч.-изд. л. 9,42. Тираж 980 экз. Зак. № 1810 /2761-1. Цена 50 коп.
Набор выполнен на наборно-пишущей машине

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра".
125047 Москва, Тверская застава, 3.

Московская типография №9 НПО "Всесоюзная книжная палата "Госкомитета СССР по печати.
109033, Москва, Волочаевская ул., 40