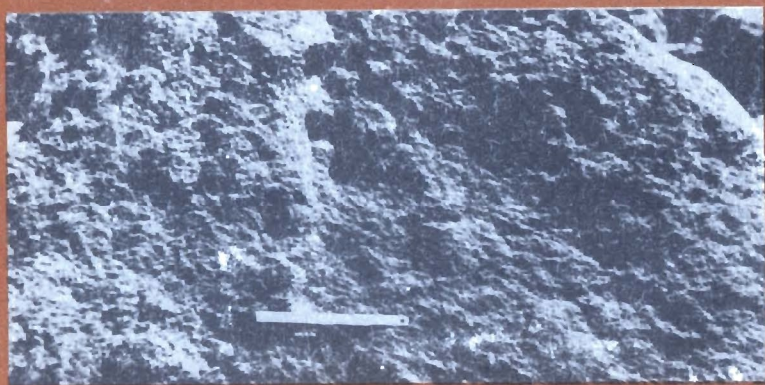
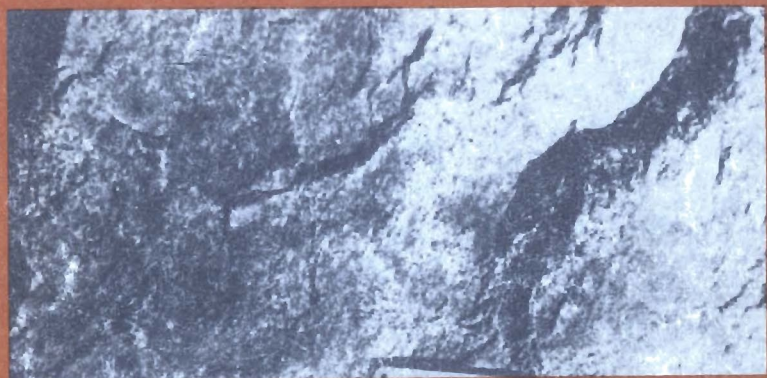


622.8
4-49

109

С. Н. Чернышев

ТРЕЩИНЫ ГОРНЫХ ПОРОД



Издательство «Наука»

185836

Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983.

Описаны геологические закономерности строения и развития сетей трещин в горных породах. Предложена теория формирования сетей трещин.

Практический интерес представляет методика исследования сетей трещин и оценки свойств скального массива.

Для специалистов в области инженерной и структурной геологии, проектировщиков и строителей, горных инженеров.

Табл. 49. Ил. 95. Библиогр. 217 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге на основе обобщения опубликованных данных и материалов собственных исследований автора дано полное описание трещин, разбивающих горные породы, их морфологии и происхождения. Методика изучения трещиноватости излагается с такой полнотой, чтобы книга могла служить руководством при планировании исследований, полевых работах и камеральной обработке материала. Вопросы использования результатов изучения трещиноватости освещены менее полно, но в такой мере, чтобы дать геологу представление о целях изучения трещиноватости в связи с исследованиями механических свойств массива при проектировании горных работ и строительства. Более подробное рассмотрение этих вопросов увело бы нас за рамки геологии в область технических наук. Однако и в кратком изложении прикладных вопросов приведен аппарат для решения простейших задач.

При подготовке монографии к изданию автор использовал обширную отечественную и зарубежную литературу. Однако привести в книге всю библиографию по затронутым вопросам оказалось невозможным. Поэтому работы, ранее вошедшие в монографические сводки, иногда упомянуты со ссылками на эти обобщения. В библиографическом списке приведены наиболее важные и интересные публикации, на которые имеются ссылки в тексте.

Книга состоит из 10 глав, объединенных в три части. В первой части приведено описание формы, размеров, ориентировки трещин. На основе статистического и геологического анализа фактического материала сделаны выводы о происхождении и истории развития сетей трещин. Во второй части рассмотрены методы изучения сетей трещин. В третьей — некоторые актуальные инженерные задачи, которые решаются на основе структурной модели сети трещин. Таким образом, в основных чертах плана предлагаемая читателю книга близка к монографии "Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород", опубликованной М.В. Рацем и автором настоящей книги в 1970 г.

Однако уже из оглавления видно существенное различие двух работ. Из 10 глав данной книги только 5 имеют прототипы в первой работе. Появилась третья, методическая, часть работы. Здесь впервые приводится гипотеза об унаследованном развитии сетей трещин, которая объединяет разрозненные представления о формировании отдельных генетических типов трещин, таких, как тектонические, контракционные, выветривания и другие; впервые приведено описание особенностей трещиноватости некоторых распространенных геологических формаций. Не отходя в основном от принятых классификаций и понятий, в данной работе автор дал им более обстоятельное формальное и фактографическое обоснование. Некоторые классификации и определения в данной работе уточнены. За

1904030000 211
4 042 (02)-83

217-83-11

185836



БИБЛИОТЕКА
БОЛЬШЕГО ФОНДА
Ленинградского государственного университета

© Издательство "Наука",
1983 г.

прошедшие годы в ходе интенсивных исследований в СССР и за рубежом получены новые результаты, оформлены методы решения важнейших практических задач инженерной геологии и горного дела, которые отражены в специальных монографиях. Деформируемость скального массива с трещинами рассмотрена К.В. Руппенейтом [1975], расчету движения воды по сетям трещин посвящены работы Е.С. Ромма [1966], К. Луи [Louis, 1968], С.Н. Чернышева [1979], влияние структуры и трещиноватости горных пород на устойчивость откосов составляет основное содержание работ К. Йона [John, 1969], Э.Г. Газиева [1977]. Устойчивость пород в кровле подземных выработок в зависимости от трещиноватости описана Е.М. Пашкиным [1981]. В современных условиях уже невозможно в одной книге, а тем более ее части описать все направления использования модели трещиноватости для решения прикладных задач. Поэтому в третьей части приводятся лишь некоторые задачи для иллюстрации возможности приложения структурной модели сети трещин в инженерной геологии, сейсмологии и структурной геологии.

В проведении исследований, составивших основу фактического материала книги, принимал большое участие М.И. Погребиский, которого автор с благодарностью постоянно вспоминал при работе над книгой. Автор благодарен М.В. Рацу за советы и рекомендации, полученные в процессе длительной совместной работы.

ВВЕДЕНИЕ

Трещины в горных породах составляют сложные пространственные сети. Строение сетей трещин определяет деформационные, прочностные, фильтрационные свойства массивов горных пород и слоистых толщ, закономерности размещения и технологию разработки месторождений многих полезных ископаемых. Основные задачи книги — показать закономерности строения сетей трещин, выявить последовательность и взаимосвязь геологических процессов их формирования, возможность использования структурных параметров сети трещин для решения ряда практических задач.

Разработанные ранее в геологии представления о первичных, тектонических, гипергенных и других трещинах объединены на основе теории унаследованного развития геологических структур гипотезой об унаследованном развитии трещин в горных породах. Эта гипотеза не противоречит современной теории трещин, развитой в механике, и значительному фактическому материалу, приведенному в книге. Она служит основой для прогноза процессов, возникающих в массиве при разработке для строительства или добычи полезных ископаемых.

Трещины возникают вместе с горной породой, существуют и изменяются в ней на протяжении всей ее истории. Трещины — неотъемлемая особенность любых горных пород. План сети трещин нередко закладывается раньше, чем магма или осадок превращаются в горную породу. В осадочных породах первыми элементами сети трещин, которые надолго, если не навсегда, определяют расположение всех трещин, являются поверхности раздела между слоями. Они закладываются на стадии седиментогенеза, а при диагенезе и катагенезе развиваются в трещины в физическом смысле слова. В магматических породах первые трещины рассекают еще подвижный, неполностью раскристаллизованный расплав. На это указывает ориентировка трещин относительно структур течения и заполнение их поздними дифференциатами магмы. В эффузивах первые трещины образуются в первых порциях твердеющей лавы на поверхности еще подвижного потока. Специфические трещины метаморфических пород — кливаж — возникают при перестройке структуры породы в процессе метаморфизма, т.е. одновременно с метаморфической горной породой.

Появляясь на ранних стадиях лито- или петрогенеза, трещины существуют в горной породе на протяжении всей истории ее существования. Следы их сохраняются даже в элювии, где иногда только рисунок сети трещин напоминает о родстве этого нового по составу и свойствам образования с материнской породой. Сеть трещин в элювии может обозначаться прочными, не поддающимися выветриванию минералами. Например, кварцевые жилы сохраняются в элювии гранитов, когда материнская порода превращена в песок, дресву или глину. Нередко можно наблюдать, как

на скале выделяются жилы кальцита или лимонита. Однако в элювии сохраняются и трещины другого типа. В тех же гранитах среди дресвы и песка прослеживаются трещины, вдоль которых выветривание давно превратило полевые шпаты в каолин. Кварцевые жилы укрепляют, армируют массив. Зоны каолинизации, напротив, ослабляют его.

Трещины на протяжении геологической истории видоизменяются вместе с горной породой. При резкой смене условий существования породы в ней возникают новые трещины. Изучение трещин помогает восстанавливать геологическую историю массива, главным образом смену напряжений и деформаций в массиве, поэтому на протяжении по крайней мере столетия трещины изучаются в тектонике и структурной геологии. Изучение нетектонических трещин всегда несколько отставало. Пока нет теории развития трещин в горных породах, которая была бы единой для тектонических и нетектонических трещин. Гипотеза об унаследованном развитии трещин на всех этапах существования массива, предложенная в этой книге, основана на общей теории унаследованного развития геологических структур, сформулированной А.В. Пейве и А.Л. Яншиным и восходящей к представлениям Н.С. Шатского и Е. Зюсса.

Велико практическое значение развития геологических представлений о трещинах горных пород. Трещины служат путями движения подземных вод, нефти и газа, заключенных в порах и других пустотах породы. С трещинами связаны рудные месторождения. Они определяют пригодность горных пород для использования в качестве материала для облицовочного или блочного камня. Положение, размеры, частота трещин определяют ход разрушения массива природными процессами выветривания, карстообразования, тектонических деформаций, гравитационных обрушений. Характер разрушения массива при его разработке определяется трещинами. Поэтому управлять процессом разрушения при горных разработках или строительстве можно, только зная основные параметры сетей трещин. В настоящее время активно развиваются методы расчета прочности, деформируемости, водопроницаемости массива горных пород с трещинами. В связи с этим построение структурной (геометрической) модели сети трещин является насущной современной задачей. Не меньшее значение имеет прогноз пространственного изменения трещиноватости в массиве. Эти сложные задачи могут быть решены только при изучении геологических закономерностей формирования сетей трещин в массивах горных пород.

Сложность задачи построения модели трещиноватости придает случайный характер изменения параметров трещин в пространстве, вследствие чего прогноз трещиноватости по необходимости осуществляется в статистической форме. В книге собран фактический материал, позволивший эмпирически определить основные геометрические особенности сетей трещин в различных магматических и осадочных горных породах и в пределах различных тектонических структур Сибирской и Русской платформ, геосинклинальных зон Кавказа и Иранского нагорья, эпи платформенных орогенических областей Тянь-Шаня и Монголии, а также других районов. К анализу привлечен обширный литературный материал, характеризующий трещиноватость горных пород.

Интерес к трещинам возник вместе с интересом к камню как строи-

тельному материалу и источнику полезных ископаемых. Ломка камня в каменоломнях, деление его на блоки производилась по системам трещин. В соответствии с расположением трещин выполнялось крепление выработок. На территории Алжира в доисторическом руднике обнаружено деревянное анкерное крепление. Отверстия выдолблены поперек трещин; забитые в них деревянные анкеры разбухали от подземных вод и прочно связывали блоки породы, отчлененные трещинами.

Исследователи XIX в. А. Добрэ, А. Гроддек, А. Ласо [Иностранцев, 1905] составили первые классификации трещин, обобщающие результаты наблюдений. Ласо разделил все трещины на эндокинетические или контракционные и экзокинетические или дислокации. Это деление, имеющее глубокие генетические причины, принято И.В. и Д.И. Мушкетовыми, М. А. Усовым, Г.Д. Ажгиреем, Ю.А. Косыгиным и другими. Мы вернемся к нему в дальнейшем.

В первой трети XX в. исследования трещиноватости значительно расширились. Для анализа генезиса трещиноватости применены моделирование (Г. Клоос, Ф.Ю. Левинсон-Лессинг) и детальные полевые исследования с последующей обработкой результатов измерений в форме круговых диаграмм трещиноватости (О. Зейтц, В. Шмидт, И. Штини). Таким образом, были сделаны первые шаги в применении механики и статистики для изучения трещиноватости горных пород. В эти же годы были построены новые классификации трещиноватости, из которых наибольшее значение имеет классификация трещин в гранитных батолитах Г. Клооса [Cloos, 1921].

В 30-50-е годы многие исследователи создавали работы по трещиноватости горных пород, в которых накоплен огромный фактический материал для характеристики различных генетических типов трещин и трещиноватости различных горных пород (А.А. Белицкий, Я.Н. Белевцев, Г.В. Тохтуев, В.Н. Данилович, Г.А. Иванов, И.В. Кириллова, Л.И. Лукин, И.П. Кушнарев, А.С. Новикова, Е.Н. Пермьяков, В.Ф. Чернышев, А.В. Пэк). В эти годы образование трещин в горных породах было объяснено в рамках теории формирования тектонических разрывов с помощью теории деформации и разрушения, развитой в механике (В.В. Белоусов, М.В. Гзовский, Б.Н. Достовалов и др.). Дальнейшее развитие в работах Л. Мюллера, Б.П. Беликова, Е.М. Смехова, А.В. Пэка, И.В. Кирилловой, А.В. Королева, Н.И. Кригера, А.В. Михайлова, Л.И. Нейштадт получили методы исследования трещиноватости. Шестидесятые годы в исследовании трещиноватости отмечены обращения к теории математической статистики для интерпретации громадного полевого материала (Р. Адлер, В.А. Букринский, М.Д. Белонин, А.Б. Вистелиус, Л.Д. Кноринг, М.В. Рац), а также использованием теории трещин Гриффитса для объяснения процессов трещинообразования в горных породах (Н.В. Павлова, М.В. Рац).

Впервые значение исследований трещиноватости для инженерной геологии подчеркнул Ф.П. Саваренский [1937], посвятивший рассматриваемому нами вопросу специальный раздел учебника. Ф.П. Саваренский писал: "Трещиноватость пород в оценке инженерно-геологических условий имеет громадное значение как в отношении устойчивости, так и водопроницаемости" [1937, с. 26]. Изучению трещиноватости при гидрогеологических исследованиях большое внимание уделял и А.М. Овчинников

[1938]. За рубежом значение исследования трещиноватости оценили позднее благодаря работам И. Штини и особенно Л. Мюллера [Müller, 1963]. В 30-х годах за рубежом хотя и признавалось влияние трещиноватости на свойства массива, однако исключалась практическая целесообразность ее широкого изучения.

В те же предвоенные годы, когда вышел в свет учебник Ф.П. Саваренского, свою постановку задачи изучения трещиноватости при инженерно-геологических исследованиях дал Н.Н. Маслов, который ввел в инженерную геологию понятие сети трещин [1941, с. 325] и писал о необходимости детального изучения ряда ее параметров, для чего "незаменимым средством является проходка шурфов, шахт, штолен и т.д." (с. 276). Параметры сети, которые рекомендует исследовать Н.Н. Маслов, в значительной степени совпадают с тем, что мы измеряем сейчас (направление трещин, частота трещин одного направления, "материальная ширина (зияние)" трещины, протяженность); их рекомендуется изучать путем массовых измерений с последующей обработкой путем построения различных графиков типа программ.

Позже сходный перечень параметров мы находим у Н.Я. Денисова [1962] и М.В. Раца [1963]. Однако методика исследования трещиноватости оставалась неразработанной. Вопрос об использовании названных параметров трещиноватости для количественной оценки свойств массивов был только поставлен. Методология исследования трещиноватости разработана Л.С. Соколовым [1947], Н.И. Кригером [1951], Л.И. Нейштадт [1957], М.В. Рацем [1962]. В этих работах в основных чертах была создана инженерно-геологическая классификация трещиноватости по генетическому признаку, заложены принципы проведения полевых работ и камеральной обработки. В рамках этих работ прошла дискуссия о количестве и составе необходимых для инженерной геологии и гидрогеологии параметров трещиноватости. Сейчас, по прошествии двадцати лет, можно сказать, что широко принята точка зрения, высказанная тогда М.В. Рацем [1962, с. 5]: "Коэффициент трещинной пустотности (как и любой иной один показатель) недостаточен для оценки ни водопроницаемости, ни устойчивости массива, ни для расчета блочности пород. Расчет этих важнейших характеристик скальных массивов требует знания целого ряда показателей".

Наряду с названным направлением в изучении трещиноватости, которое отличается непосредственным исследованием трещин на обнажении, с 20-х годов развивалось другое направление. Авторы его ставили себе целью косвенной оценки трещиноватости по нагнетанию воды в скважины, поглощению промывочной жидкости, выходу керна и т.п. Основу этому направлению положил М. Люжон. В нашей стране активно и оригинально его развивали Л.Д. Белый, Н.Н. Биндеман, Е.Е. Керкис, А.Г. Лыкошин и др. Впоследствии направление изучения трещиноватости по косвенным признакам расширилось за счет применения геофизических методов [Сейсмоакустические методы..., 1969]. Косвенное изучение трещиноватости явилось незаменимым средством для районирования скального массива. Для этой цели косвенными методами оценки трещиноватости неоднократно пользовался и автор. Однако для определения свойств трещиноватого массива косвенные методы не всегда пригодны, так как пере-

ходы от удельных водопоглощений или скоростей упругих волн к расчетным параметрам массива бывают по необходимости основаны на статистических зависимостях и не могут быть вполне надежны, что отмечалось еще Н.Н. Биндеманом и Н.Я. Денисовым [1947].

До сих пор речь шла об исследовании трещиноватости. Использование результатов ее измерения для оценки свойств массива заметно отстает по времени. Пожалуй, впервые идея перехода от параметров трещин к свойствам массива на основе законов механики была развита в работе Г.М. Ломизе [1951] применительно к задачам фильтрации. Позже тем же путем при решении задач деформации, прочности, а также фильтрации последовали Л. Мюллер [Müller, 1963], Е.С. Ромм [1958, 1966], И.И. Кондауров [1966], К. Луи [Louis, 1968], В. Витке [Witke, 1970], К.В. Руппенйт [1975]. К достоинствам этих работ необходимо отнести строгую постановку задач, точность и определенность решения, тем не менее идеи, высказанные в них, зачастую слабо внедрялись в практику изысканий. Основной и общей причиной, видимо, можно считать абстрактность принятых авторами моделей геологической среды, а также отсутствие соответствующих методик полевых исследований трещиноватости. Поэтому, несмотря на существование названных работ, параллельно в связи с потребностями практики в инженерной геологии развилось эмпирическое направление расчета по параметрам трещин параметров массива. Практически такой расчет впервые был осуществлен для связи "прочность - функция блочности" в работе Г.Л. Фисенко [1959]. Затем эмпирическое направление применительно к скальным массивам развито в работах Э.И. Ткачука [1966] и Е.М. Пашкина [1968], выполненных под руководством В.Д. Ломтадзе и Н.В. Коломенского.

Исследования физических и механических свойств горных пород далеко опережают исследование свойств скальных массивов. В этой области результаты уже сведены в прекрасные обобщающие работы, в которых даны не только общепринятые методы определения свойств скальных грунтов, но и конкретные показатели свойств для многих пород и минералов. Под руководством Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова и Г.Я. Новика составлен кадастр горных пород [Справочник..., 1975], реализующий горное направление в исследовании горных пород. В кадастре обобщены данные о физических свойствах и технологических параметрах горных пород, как объекта добычи и переработки.

Высокий уровень развития физики горных пород привел к созданию не только совершенных стационарных лабораторий по изучению физических и механических свойств горных пород, но и полевой передвижной лаборатории ПИГЛ-1 [Николаев, 1976]. Исследования свойств горных пород активно продолжают. Все это вместе взятое позволяет нам утверждать, что параметры горных пород, слагающих массив, могут быть определены с достаточной для практики точностью и надежностью. Более того, в ряде случаев их можно заимствовать из справочников. Значительно хуже обстоит дело с определением свойств горных пород, заполняющих трещины. Однако и здесь имеются методы определения [Могилевская, 1972] и справочные данные.

Изучение структуры рудных полей и месторождений неотделимо от изучения тектонических трещин. Трещиноватость вмещающих пород опреде-

ляет условия залегания рудных тел и их форму, служит важным поисковым признаком. В связи с задачами рудной геологии тектоническая трещиноватость специально рассмотрена в работах А.В. Королева [1935, 1962], Ф.И. Вольфсона [1954], В.М. Крейтера [1956], В.А. Невского [1979]. В этих и последующих работах охарактеризованы трещины отрыва и скалывания в связи со структурой и текстурой рассекаемых ими горных пород. Подробно описаны структуры пересечений разломов, участки веерообразного расщепления разломов типа "конского хвоста". С такими участками часто связаны рудные месторождения. Детально охарактеризованы трещины оперения разрывов, строение зон кольцевых и дуговидных разрывов, что имеет большое значение при изучении структур рудных месторождений. Опыт изучения тектонической трещиноватости рудных полей и месторождений суммирован В.А. Невским [1979].

Значительный вклад в общее описание трещин горных пород и формирование геологической теории их развития внесли специалисты по каменным строительным материалам [Kieslinger, 1958; Беликов, 1953]. В этих работах значительное внимание уделено гипергенным изменениям трещиноватости в связи с разгрузкой от природных напряжений и выветриванием.

Исследования трещиноватости коллекторов нефти и газа в большом объеме выполнены в СССР под руководством Е.М. Смехова [Методика..., 1969]. Этими исследованиями установлены особенности тектонической трещиноватости и микротрещиноватости осадочных горных пород глубоких горизонтов платформенных областей, выявлено сходство трещиноватости глубоких горизонтов и слоев, выведенных на поверхность.

Таким образом, геологическими исследованиями трещиноватости и исследованиями механических свойств горных пород созданы предпосылки для развития нового расчетного направления оценки свойств массива горных пород. Эти предпосылки в основном сводятся к следующему.

1. Существуют общепринятые методы оценки свойств скального грунта в образце и справочники с показателями свойств конкретных пород.

2. Предложены различные методы изучения трещиноватости, которые используются для качественной оценки сохранности массива и его районирования. Они почти не используются для оценки свойств массива. Свойства массива оцениваются прямыми полевыми определениями или косвенно геофизическими и гидрогеологическими методами.

3. В смежной с инженерной геологией гидромеханике предложены методы перехода от свойств дискретной или трещиноватой среды к свойствам условной сплошной среды, но они не используются в практике инженерно-геологических исследований из-за разрыва в методологии геологии и гидромеханики.

4. Выявлена необходимость использования математической статистики при изучении трещиноватости для инженерно-геологических целей, имеется общая методология использования статистики при изучении трещиноватости.

ЧАСТЬ I

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ ТРЕЩИН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Глава I

ТЕРМИНОЛОГИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

§ 1.1. Трещины, сеть трещин и другие понятия

Горные породы все без исключения разбиты трещинами. Пересекаясь, трещины образуют пространственные сети. Совокупность трещин горных пород принято называть трещиноватостью. "Трещиноватость пород в оценке инженерно-геологических условий имеет громадное значение. К сожалению, типизация трещин и методика их исследования еще мало разработаны", — писал Ф.П. Саваренский [1937]. За 45 лет в этом направлении сделано много. Появились десятки классификаций трещин и сетей трещин по форме, размерам, происхождению, по косвенным признакам степени трещиноватости. Количество классификаций непрерывно умножается. Почти в каждой работе, затрагивающей трещиноватость, появляются новые классификации [Жиленков, 1975; Красилова, 1979; Невский, 1979; Варга, 1980]. Такая тенденция свидетельствует об отсутствии логически обоснованных, общепринятых классификаций.

Видимо, настало время положить предел росту количества классификации трещиноватости. Поэтому автор стремится, насколько это возможно, избежать построения новых классификаций и введения новых терминов, уточнить и упорядочить имеющиеся представления.

Трещина по определению, давно принятому в структурной геологии, — это разрыв в горных породах, перемещение по которому либо совершенно отсутствует, либо имеет незначительную величину [Материалы по тектонической терминологии, 1964]. Однако такое определение для многих разделов современной геологии недостаточно. В инженерной, рудной, нефтяной геологии, гидрогеологии трещиной называется полость сложной формы, занятая газом, жидкостью или твердыми минеральными образованиями. Форма трещины отличается от формы других полостей в горных породах (пор, каверн, карстовых полостей и др.) резким обладанием протяженности во всех направлениях вдоль стенок над расстоянием между стенками. Эти определения не противоречат одно другому, но подчеркивают разные стороны объекта. Считая оба определения правомерными, Ю.А. Косыгин выделяет два аспекта в описании трещин и разломов. Во-первых, они могут рассматриваться как дизъюнктивные границы и, во-вторых, "как геологические тела, толщина которых невелика по сравнению с длиной и шириной и которые образовались вследствие различных процессов, связанных с данной границей (минерализация, метаморфизм, дробление, брекчирование, милонитизация, метасоматическое замещение и т.д.)" [1974, с. 117].

По поводу этого определения надо заметить, что без второй, генети-

ческой, части оно было бы неполным. Чисто морфологическое определение сближает понятие трещины и прослоя, слоя. С позиций гидрогеомеханики это, может быть, и неплохо, так как прослой в массиве служит такой же поверхностью ослабления, как трещина, а трещина с фильтрующим заполнителем гидравлически не отличается от прослоя переменной мощности. Однако геологический анализ не допускает таких упрощений.

В форме трещины отражена история ее образования и преобразования. В ходе геологической истории трещина может быть то поверхностью отрыва, то плоскостью скалывания или сдвига, то каналом фильтрации с растворимыми или размываемыми стенками, то местом накопления вещества, переносимого подземными водами. Трещина развивается унаследованно. Это весьма затрудняет генетическую классификацию трещин, цель которой — поставить в соответствие явление (трещину) и процесс, ее сформировавший (контракцию, или выветривание, или др.)¹. Поэтому генетическая классификация трещин чаще всего выражает лишь субъективный взгляд, отдающий предпочтение тому или иному процессу формирования трещины. Однако в генетических терминах и классификации суммирован громадный опыт исследования трещин, поэтому просто отказаться от них нельзя.

Геометрические параметры трещин могут быть точно измерены, поэтому классификации трещин по форме и размерам могут быть объективны в отличие от чисто генетических. Благодаря главной особенности формы трещин — резкому преобладанию протяженности вдоль стенок над расстоянием между стенками — в тектонике след трещины на поверхности обнажения часто моделируют прямой линией, а трещину плоскостью. В инженерной геологии такая модель трещины недостаточна. Трещину в большинстве наших задач удобно моделировать отрезками двух параллельных плоскостей, каждая из которых аппроксимирует одну извилистую стенку. Расстояние между этими плоскостями называется шириной трещины и обозначается в данной работе b . Протяженность части плоскости называется длиной трещины и обозначается l . Реальные извилистые стенки трещин соприкасаются в отдельных точках. Относительная площадь скальных контактов, т.е. доля площади контактов в общей площади стенки трещины, обозначается ξ . В ряде задач могут иметь значение извилистость и шероховатость реальной стенки трещины, т.е. характеристика ее колебания около аппроксимирующей плоскости.

Для решения инженерно-геологических задач, кроме формы трещины, необходимо знать ее положение в пространстве. Ориентировка трещины определяется азимутом падения стенки α и углом падения стенки β . Чтобы полностью определить положение трещины, недостаточно знать ее ориентировку относительно стран света. Необходимо знать, на каком расстоянии она расположена от какого-либо фиксированного объекта. Таковым может быть соседняя параллельная трещина, расстояние до которой обозначаем a . Расположение трещины относительно соседних трещин, элементов структуры массива или конструкции сооружения может быть фиксировано на зарисовке.

¹ Термины, явление и процесс трактуются по Л.Д. Белому [Бельж, Попов, 1975].

Множество примерно параллельных трещин, совместно развитых в малом объеме массива, называется **системой трещин**.

Сеть трещин — закономерно построенная совокупность трещин в заданном объеме массива горных пород. Она, как правило, включает трещины различного генезиса. В дополнение к геометрическим параметрам отдельных трещин сеть характеризуется определенным взаимным расположением трещин (углы между трещинами, расстояния между параллельными трещинами) и степенью совершенства расчленения массива на отдельные блоки сетью трещин. В зависимости от длины и частоты трещин блоки полностью отделены или между ними сохраняются остаточные связи через целики породы. Можно провести аналогию между сетью трещин и кристаллической решеткой. В зависимости от строения последней кристаллы имеют весьма совершенную, совершенную или несовершенную спайность. К сожалению, эти старые термины имеют обратный смысл. Кварц, наиболее прочно спаянный во всех направлениях, определяется как минерал с несовершенной спайностью, а легко делимая слюда — как минерал с весьма совершенной спайностью.

Заполнитель трещин — это рыхлый осадок или горная порода, образовавшиеся в трещине. Как всякая порода, он характеризуется минеральным составом, структурой, текстурой. Несмотря на малую ширину трещин, в некоторых из них встречается несколько слоев заполнителя различного зроста и происхождения. На наш взгляд, заполнитель следует рассматривать и классифицировать как горную породу, возникшую в специфических условиях внутреннего пространства трещин. В инженерной геологии в этом направлении сделано пока чрезвычайно мало.

Генетическим типом трещин называется множество трещин в массиве горных пород, связанных единством происхождения и последующего развития. Это единство выражается в общности морфологического облика, т.е. в сходстве шероховатости и извилистости стенок, характера окончаний трещин, заполнения их продуктами различных геологических процессов, выветривания стенок и т.п. Генетический тип объединяет обычно несколько систем.

Возраст трещин необходимо устанавливать как для геологического анализа, так и для построения геометрических моделей сетей трещин с целью решения конкретных инженерно-технических задач. Мы различаем геологический возраст и относительный возраст трещин. Геологический возраст трещин, как и возраст горных пород, может оцениваться по абсолютной хронологической шкале и относительной геохронологической шкале. Часто для указания геологического возраста трещин указывают события в истории массива, которым сопутствовало образование трещин. Например, называя трещины литогенетическими или трещинами разгрузки, мы тем самым в какой-то мере определяем возраст трещин через возраст пород или возраст рельефа кровли коренных. Термином "относительный возраст" пользуемся для разграничения по возрасту трещин совместно развитых в массиве горных пород. По относительному возрасту можно разделить на несколько генераций даже трещины одного геологического возраста и генетического типа. Относительный возраст трещин устанавливается по ряду формальных признаков вне зависимости от решения вопроса о геологическом возрасте.

Скальным грунтом называется горная порода с жесткими кристаллизационными или цементационными связями между зернами, вовлеченная в совместную работу с инженерным сооружением.

Скальным массивом называется сложное геологическое тело, состоящее из скальных грунтов. Из этого определения следует, что скальный массив замкнут внутри произвольной геологической границы первого типа¹. Внутри этой границы находятся различные грунты, которые работают совместно с сооружением, вне – породы, которые не работают с сооружением.

Массив горных пород – сложное геологическое тело, состоящее из различных горных пород, объединенных происхождением и последующим совместным развитием. Граница массива горных пород проводится по геолого-генетическим признакам. Например, по одну сторону границы находятся магматические, по другую – осадочные горные породы, или по одну сторону палеозойские метаморфизованные морские отложения, по другую – кайнозойские рыхлые континентальные отложения и т.п. Граница массива горных пород может быть комбинированной. Объем массива горных пород имеет тот же порядок величин, что и объем скального массива. Различия между ними в способе проведения геологической границы и составе. Массив горных пород необязательно состоит из горных пород с жесткими связями. Каждому массиву присущ определенный литолого-петрографический состав, форма залегания и трещиноватость горных пород. При инженерно-геологических исследованиях для массива горных пород, выделенного в статическом геологическом пространстве, дается характеристика напряженно-деформированного состояния, температуры, влажности.

Ближние или полностью соответствующие термины приняты в зарубежной литературе, где различают скальную горную породу (Gestein, rock-sample, roche) и скальный массив (Fels, rock, pierres). Наряду с этим имеются термины, соответствующие нашему массиву горных пород (Gebirge).

Сложившиеся классификации трещиноватости принадлежат двум основным направлениям. Во-первых, выделяются морфологические или геометрические классификации отдельных трещин и сетей трещин. Такие классификации имеют большое значение для оценки прочностных, фильтрационных и деформационных свойств массива. Другое направление классификаций – геолого-генетическое. Оно служит основой для экстраполяции и интерполяции данных по трещиноватости. Оба направления тесно переплетаются, так как генетические выводы делаются преимущественно на основе исследования формы трещин и сетей трещин. Однако для генетической классификации привлекаются и другие данные, например по составу породы в стенках трещины, по составу заполнителя. Рассмотрим раздельно морфологические и генетические классификации трещин.

Но прежде несколько слов о термине "трещиноватость". Как говорилось, он обозначает совокупность трещин [Белоусов, 1962; Косыгин, 1958; Рац и Чернышев, 1970]. Однако по своей конструкции слово "тре-

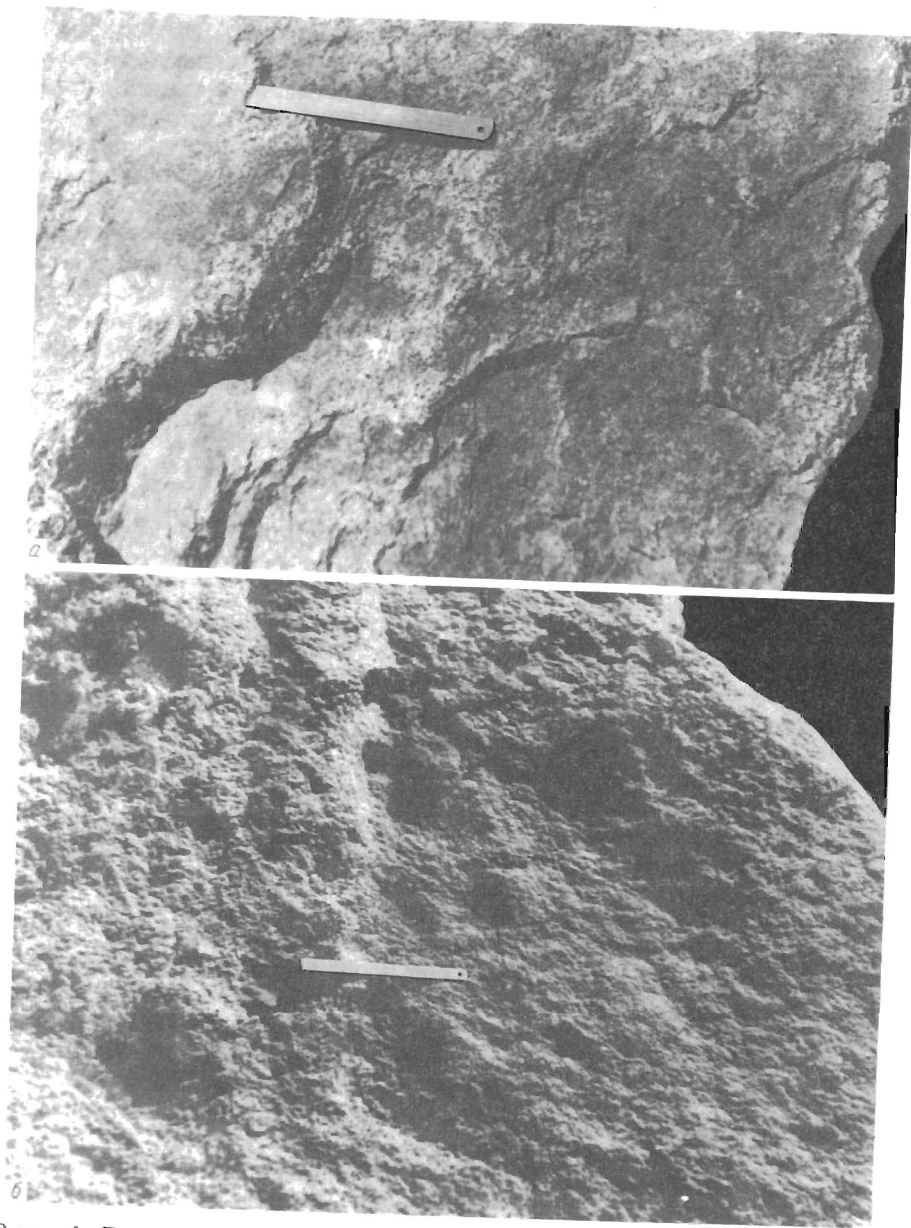
щдиноватость" обозначает с помощью суффикса -оват- слабое проявление некоего признака, а вовсе не совокупность предметов, тел. Этот суффикс, например, совершенно правильно употреблен в наименовании подземных вод, которые разделяются на пресные, солоноватые, соленые и рассолы. Аналогично по нормам языка верно разделять массивы горных пород на монолитные, трещиноватые, т.е. несколько нарушенные трещинами, и разборные, т.е. расчлененные на блоки. Совокупность трещин вполне определяется кратким и ясным словом "трещины". По поводу слова "трещиноватость" В.И. Даль в знаменитом толковом словаре русского языка пишет: "дурно сложенное слово". Следовало бы согласиться с ним и ограничить употребление этого неблагозвучного и неточного по нормам русского языка термина. Поэтому будем ниже широко использовать термины "трещина" и "сеть трещин". В последнем подчеркивается фиксированная структура совокупности трещин. Термины "трещиноватая порода" и "трещиноватость" сохраним для тех случаев, когда конкретную структуру сети трещин определить невозможно, исследуется только степень изменения свойств массива сетью трещин, степень трещиноватости.

§ 1.2. Структура трещин и сети трещин

Форма трещин. Трещины в массиве горных пород представляют собой разрывы сплошности, образующиеся при хрупком разрушении. В квазисплошной и квазиоднородной части массива трещины следуют вдоль плоскости, отражая постоянство пространственного положения осей напряжения и зеркальную симметрию полей напряжений на крыльях трещин. Флуктуации напряжений, вызванные неоднородностью горной породы или близостью границы слоя, приводят к отклонениям стенок реальной трещины от плоскости, создают особенности каждой отдельной трещины. По особенностям формы стенок принято различать трещины отрыва и скола (рис. 1). Трещины отрыва имеют неровную бугристую поверхность. Отдельные формы рельефа стенки трещины округлы. Размах рельефа, видимо, зависит от размера зерен в породе. В тонкозернистых породах – это миллиметры. В крупнозернистых – первые сантиметры. Трещины скола характеризуются меньшими отклонениями от плоскости симметрии, носящими закономерный ступенчатый характер. Плоские поверхности ступеней наклонены к плоскости симметрии трещины под углом 5–15°. Они отсекаются уступами, почти перпендикулярными плоскости ступеней. Установлено, что трещины отрыва возникают в плоскости действия главных нормальных напряжений, а трещины скола – по направлению максимальных касательных напряжений.

Однако трещины отрыва и скола не исчерпывают всего многообразия трещин в горных породах. Особой формой обладают трещины, пришедшие в процесс скольжения. По стенкам этих трещин вдоль направления скольжения вытянуты борозды и гряды, нередко отполированные до блеска (рис. 2). Роль этих трещин в формировании прочностных, фильтрационных и других свойств массива значительна и своеобразна. Они резко снижают прочность массива и в ту или иную сторону изменяют его водопроницаемость. Поэтому следует выделять их как отдельный морфологический тип. Трещины скольжения могут быть метаморфозой

¹ Геологическая граница, расположение которой не зависит от распределения веществ в пространстве и учитывает задачи исследования, называется произвольной геологической границей первого типа [Формы геологических тел, 1977].



Р и с. 1. Поверхности трещин скола (а) и отрыва (б) в среднезернистом граните, основания Колымской ГЭС. Длина линейки 20 см



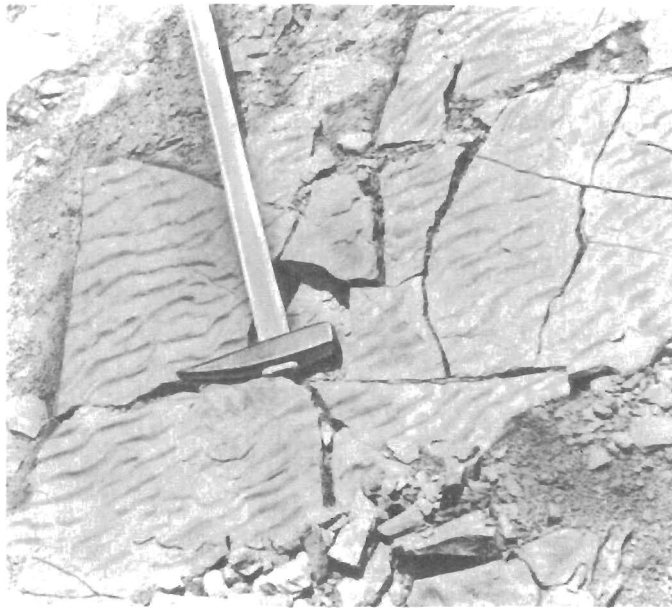
Р и с. 2. Зеркало скольжения в известняках мелового возраста в бассейне р. Сулка [Рац, Чернышев, 1970]

185836

как трещины скола, так и трещины отрыва. Имеется еще один морфологически и генетически обособленный тип поверхности ослабления в массиве горных пород. Это поверхности напластования (рис. 3), шероховатость которых вызвана неоднородностью зернового состава осадка, знаками ряби, гироглифами и т.п. Итак, по форме стенок выделяются четыре типа поверхностей ослабления: 1) поверхности напластования; 2) трещины отрыва, 3) скола и 4) сдвига.

Структура сети трещин значительно изменяется по массиву горных пород в зависимости от литолого-петрографического и тектонического факторов. Для малого объема массива, в котором сеть можно считать неизменной, структура сети трещин наиболее ясно выражается формой блока отдельности, отчленяемого трещинами. Типы отдельности выделяются эмпирически. Так, А.А. Иностранцев [1905] выделяет пять типов отдельности: 1) сфероидальную; 2) плитообразную; 3) столбчатую; 4) параллелепипедальную; 5) полиэдрическую. В справочнике "Формы геологических тел" [1977] сведены определения для 57 наименований отдельности. Одиннадцать форм отдельности приводит Л. Мюллер. Очевидно, что эмпирический подход не привел к какой-либо согласованной системе взглядов. Поэтому целесообразно сети, как и отдельные трещины, рассматривать в зависимости от формирующих их напряжений.

Условия образования трещин в наиболее общем виде выражаются тензором напряжений. В массиве горных пород реализуются все три возможных сочетания главных нормальных напряжений. Эти сочетания: 1) $\sigma_1 = \sigma_2 = \delta_3$, все три главных нормальных напряжения равны; 2) $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$



Р и с. 3. Первичная форма поверхности напластования (следы волновой ряби)

или $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, равны два из трех главных нормальных напряжений; 3) $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, все три главных нормальных напряжения различны. Три типа напряжения реализуются в трех типах сетей трещин при условии постоянства напряжений в пространстве и времени. Смену разрушающих напряжений в физической точке с течением времени необходимо рассматривать как четвертый тип напряженного состояния, который формирует своеобразную сеть трещин. Каждой из четырех сетей свойственна своя группа симметрии (табл. 1).

При первом сочетании напряжений шаровой тензор напряжений приводит к образованию трещин отрыва в форме концентрически вложенных сфер и радиально секущих плоскостей. Группа симметрии такой фигуры, как известно, включает центр симметрии, бесконечное количество осей симметрии бесконечного порядка, бесконечное количество плоскостей симметрии. Сеть трещин такого типа со статистическими отклонениями от идеальной формы реализуется в шаровых лавах, в зоне выветривания и при взрыве. Она и соответствующая ей отдельность получили название сфероидальной, шаровой, скорлуповатой и др. (рис. 4, а).

Второе сочетание главных нормальных напряжений, когда равны два из трех напряжений, образно можно представить как эллипсоид вращения только при одинаковом знаке всех трех напряжений, что не исчерпывает всех трех вариантов. В данном случае напряжения обладают центром симметрии, одной осью симметрии бесконечного порядка, бесконечным множеством осей поворота второго порядка, бесконечным множеством плоскостей симметрии, из которых одна перпендикулярна оси симметрии бесконечного порядка, а остальные пересекаются по этой оси.

Таблица 1
Геометрическая классификация сетей трещин

Наименование сети трещин	Графическое изображение	Основание для классификации	
		Напряженное состояние массива, создающее трещины	Создаваемая трещиноватостью анизотропия массива
Сфероидальная I		$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$	Изотропный
Полигональная, осесимметричная II		$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	Трансверсально-изотропный
Системная, равноугольная III		$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$	Анизотропный
Хаотическая, асимметричная IV		Смена различных напряженных состояний во времени	Изотропный

Перечисленные автоморфизмы составляют группу симметрии, которая фиксируется при разрушении породы и сохраняется в форме блоков и трещин после снятия напряжений. Поле напряжений рассматриваемого типа возникает и статистически реализуется в трещинах столбчатой отдельности эффузивов (рис. 4, б), трещинах усыхания осадочных слоев (рис. 4, в), в черепаховой структуре на соляных куполах. Трещины во всех этих широко известных случаях располагаются по образующей цилиндра, осью которого служит ось σ_1 . Такие сети возникают в условиях растяжения, когда равные между собой минимальные главные нормальные напряжения имеют отрицательный знак. В условиях сжатия образуются трещины скола, расположенные по образующей конуса, ось которого совпадает с осью σ_1 . Трещиноватость такого типа можно наблюдать в слоях аргиллитов, зажатых среди известняков и песчаников в складчатой структуре угленосных юрских отложений Иранского нагорья, в меловых отложениях Дагестана.

Третий тип напряженного состояния ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) при одинаковом

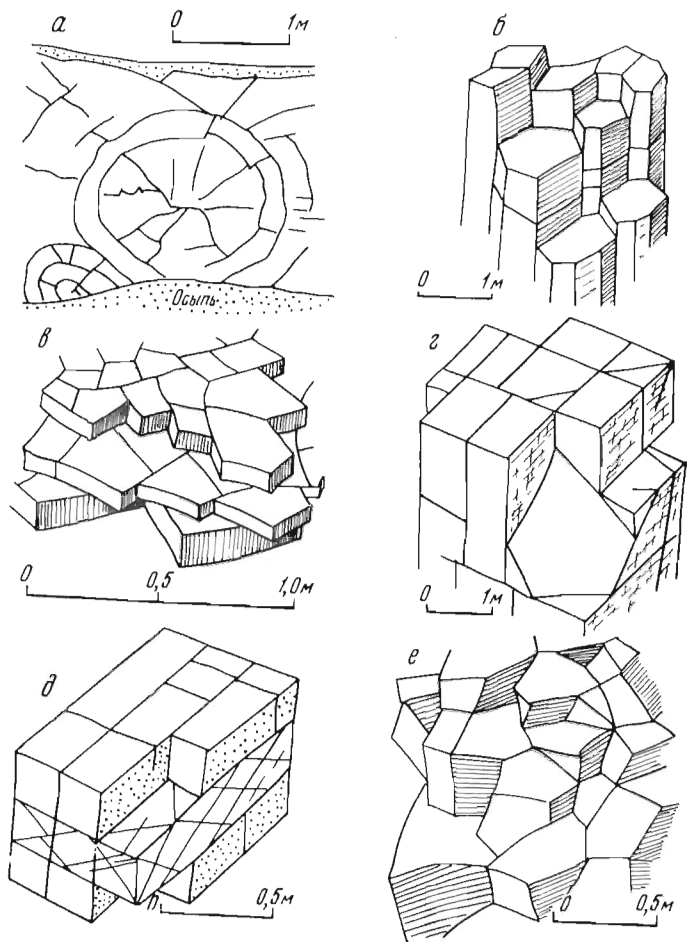


Рис. 4. Зарисовки сетей трещин

a – сфероидальная в андезитах [Иностранцев, 1905]; *б* – полигональная в базальтах, долина р. Орхона (МНР); *в* – полигональная в известняках, долина р. Протвы (Московская обл.); *г* – системная в гранитах у пос. Булгана (МНР); *д* – системная в песчанике и аргиллите на шахте Пабеда (Иран); *е* – хаотическая в долерите Толстомысовской интрузии на р. Ангаре

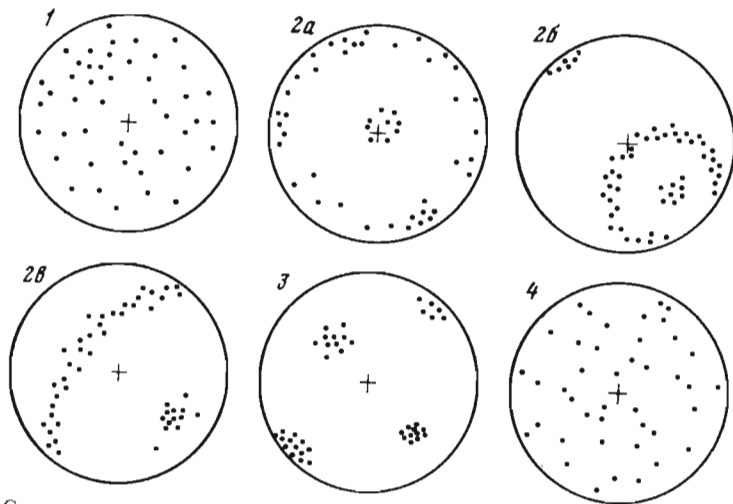
знаке всех трех главных нормальных напряжений образно можно представить себе, как трехосный эллипсоид. Разрушение породы напряжениями этого типа приводит к образованию систем трещин отрыва и скола, которые ограничивают блоки призматической формы. Блоки обладают следующей группой симметрии: центр симметрии, конечное количество осей симметрии конечного порядка, конечное количество плоскостей симметрии. Третий тип напряженного состояния характерен для полей напряжений на складках продольного сжатия, у разрывов, в зоне эрозивной разгрузки и др. В условиях неравенства $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ образуется наиболее распространенная в массивах горных пород системная сеть трещин (рис. 4, *г*, *д*).

При последовательном наложении генераций трещин без заживления образуются блоки четвертого типа – асимметричные, возникающие согласно принципу П. Кюри, по которому симметрия поля, преобразующего тело, накладывается на ранее возникшую симметрию тела. Получившаяся в результате форма тела сохраняет только те элементы своей симметрии, которые совпадают с наложенными на него элементами симметрии поля [Шафрановский, 1968]. Уже при нескольких наложениях полей напряжений общих элементов симметрии не остается. Блоки становятся асимметричными. Такой процесс реализуется в зонах дробления у разрывов, у контакта интрузивов (рис. 4, *е*), в зоне выветривания, т.е. в наиболее подвижных частях земной коры.

Выделенные на основании анализа соотношений главных нормальных напряжений четыре типа отдельности в известной мере совпадают с типами отдельности, выделенными ранее эмпирически [Рац, Чернышев, 1970]. Каждый тип имеет свою принципиально отличную группу симметрии и свой тип сетей трещин. Группы различаются следующим образом: I – присутствует бесконечное количество элементов симметрии бесконечного порядка, II – конечное количество элементов симметрии бесконечного порядка, III – конечное количество элементов симметрии конечного порядка, IV – элементы симметрии отсутствуют.

Сети трещин помимо автоморфизмов, допускаемых отдельными блоками (отражение, вращение), допускают еще операцию переноса вдоль определенных осей и с определенным шагом. Количество осей переноса зависит от группы симметрии блока. Для сфероидальной с неупорядоченным расположением блоков количество осей переноса бесконечно, а расположены они по всем направлениям. Шаг переноса равен среднему диаметру блока с концентрически скорлуповатой отдельностью. Совпадение структуры при переносе и наложении возможно только в статистическом смысле, как и все другие рассмотренные ранее автоморфизмы. Перенос мыслим только в пределах литологически однородного и структурно обособленного блока массива, в котором сохраняется статистически однородное поле напряжений. Такие геологические области имеются в трещиноватых массивах. В их пределах статистические функции распределения параметров трещиноватости неизменны и определены. Перенос, совмещенный с поворотом, возможен при переходе с одного объема массива на другой с родственной трещиноватостью, например, с одного крыла складки на другое. Этот случай можно рассматривать как криволинейную симметрию. Симметрия подобия наблюдается при тренде густоты и ширины трещин у разрывов и в зоне гипергенеза.

До сих пор мы говорили об исключительной зависимости формы сетей трещин от напряжений, оставляя в стороне состав массива. Горные породы, слагающие массив, влияют на симметрию сети трещин через тензор напряжений, который находится в равной зависимости от источника напряжений и состава массива, в котором они возникают. Положение осей главных нормальных напряжений корректируется текстурными особенностями горных пород. Шаг переноса определяется прочностью породы при равной интенсивности напряжений. Точность выполнения всех автоморфизмов (совпадение мыслится лишь в вероятностном смысле) целиком зави-



Р и с. 5. Схематическое изображение сетей трещин на круговых диаграммах трещиноватости
 1 — сфероидальная; 2, а, б, в — полигональная; 3 — системная; 4 — хаотическая

сит от неоднородности прочностных и деформационных свойств массива. Зависимость сети трещин от состава пород ярко проявляется в слоистой толще, состоящей из различных горных пород. Системы трещин различны, например, в песчаниках и аргиллитах в одной пачке (рис. 4, д).

Предлагаемый подход к морфологической классификации сетей трещин по группам симметрии был сжато изложен ранее [Чернышев, 1978]. Он получил развитие в статье [Варга, 1980], где, в частности, показано, что наиболее значимая для практики системная сеть трещин может иметь четыре типа симметрии (а возможно и больше) в зависимости от количества систем параллельных трещин и от густоты трещин в системах. Эти типы соответствуют известным тригональной, тетрагональной, гексагональной и кубической сингониям. Выделение их детализирует нашу схему, не противореча ей, так как все четыре сингонии обладают конечным числом элементов симметрии конечного порядка. Хаотическая сеть трещин, выделенная нами, является предельным случаем, возникающим при неоднократном наложении полей напряжений. Вероятно, нет разницы в том, принимать ли ее лишенной элементов симметрии [Чернышев, 1978] или наделять ее симметрией шара [Варга, 1980] при статистическом подходе к процедуре автоморфизмов. Отсутствие различий подчеркивается тождественностью вывода: в обоих случаях массив считается изотропным по свойствам. А.А. Варга из теории симметрии выводит возможность существования сетей трещин с ромбической, моноклинной и триклинной сингониями. На наш взгляд, такие сети действительно могут возникать при наложении полей напряжений. По А.А. Варге, сети с ромбической, моноклинной и триклинной сингонией возникают при сочетании полигональной и системной трещиноватости или системной и хаотической. Самостоятельное значение этим типам сетей придавать не следует, так как они не являются производными от постоянных полей напряжений.

Практически основные морфологические типы сетей трещин удобно различать на круговых диаграммах (рис. 5). На схеме нет различия между кругами 1 и 4. Схемы действительно тождественны, но трещиноватость сфероидальная и хаотическая существенно различны. В первой трещины криволинейны и замкнуты, во второй преимущественно прямолинейны. В первом случае сеть возникает при изотропном поле напряжений, неизменном во времени. Во втором случае изотропность напряжений достигается только в среднем на значительном отрезке времени.

Практическое инженерно-геологическое значение предложенной классификации автор видит в следующем. Она исчерпывает все сочетания трещин по ориентировке. При переходе к свойствам массива как сплошной среды каждая из названных сетей трещин, как правило, генерирует определенную анизотропию массива. Сфероидальной сети соответствует изотропная среда, полигональной — трансверсально-изотропная, системной — ортотропная или сложноанизотропная, хаотической — изотропная среда.

Каждому типу сети трещин соответствует своя модель массива для перехода от свойств дискретных блоков и трещин к свойствам массива как сплошной среды. Так, модель тензорной теории проницаемости создана для равноугольной системной сети трещин. Модель теории линейных элементов наиболее соответствует осесимметричной полигональной сети и равноугольной системной сети трещин. Расчет устойчивости откосов проводится для равноугольной и осесимметричной полигональной сетей трещин. Симметрия сетей трещин лежит в основе определения параметров складок и разрывов трещиноватости (см. гл. 9). Присутствие одной оси симметрии бесконечного порядка в сети трещин оперения разрыва позволяет выявить ориентировку разрыва и направление смещения крыльев. Построенная классификация позволяет отождествить расчетные модели и природные ситуации и тем самым выявить природные ситуации, для которых еще нет расчетных методов. Ею завершается генетический анализ статического геологического пространства. Она служит базой для расчетных моделей массива, используемых во второй части книги.

§ 1.3. Размеры трещин

Для практики геологических исследований недостаточно морфологических классификаций трещин и сетей трещин, в связи с большим диапазоном изменения параметров трещин важно количественно определить уровни трещин по длине и ширине.

Длина трещин, рассматриваемых в геологии, изменяется в широких пределах от 10^{-4} до 10^8 см. В этом диапазоне выделяется 4–5 классов (табл. 2). Большинство авторов границы классов проводятся на уровне 10^{-3} , 10 и 10^4 см. За средним классом Л. Мюллер, М.В. Рац и С.Н. Чернышев, В.Н. Жиленков оставляют название "трещины". Этому классу в соответствии с названием книги уделено дальше основное внимание. Микро-трещины и разрывы рассматриваются значительно менее подробно. Крупные тектонические разрывы и дефекты кристаллов не рассматриваются совершенно.

Дислокации и другие мельчайшие поверхности механического ослабления кристаллов типа спайности и отдельности [Юшкин, 1971] нельзя отнести к трещинам горных пород, рассматриваемым в книге. Во-первых,

Таблица 2

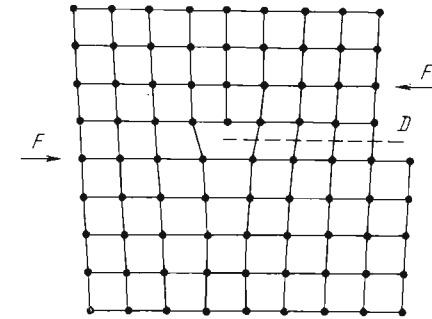
Уровни трещин и разрывов по абсолютной длине

Протяженность трещин, см	Уровни								
	по Л. Мюллеру [1971]	по М.В. Рацу и С.Н. Чернышеву [1970]	по В.Н. Жиленкову [1975]	по Н.С. Красиловой 1979,	Рекомендуемые				
10^8	Нарушения	Крупные тектонические разрывы	Разломы I и II порядка	Мегатрещины-разрывные нарушения	Крупные тектонические разрывы				
10^7									
10^6		Разрывы	Разломы III порядка		Разрывы				
10^5									
10^4	Трещины	Макротрещины или трещины	Крупные трещины	Макротрещины и мезотрещины	Длинные				
10^3						Крупные	Трещины		Средние
10^2										Мелкие			Короткие
10^1	Скрытые трещины	Микротрещины		Микротрещины	Микротрещины				
10^{-1}									
10^{-2}						Дефекты кристаллической решетки		Ультратрещины	
10^{-3}									
10^{-4}									

они распространены в отдельных кристаллических зернах, а не в породах, являющихся совокупностью зерен. Во-вторых, они обладают особенностями, принципиально отличающими их от трещин. Дислокациями (рис. 6) называют нарушения структуры кристалла, захватывающие в каждый момент лишь относительно небольшое количество атомов и способные перемещаться при определенных условиях с восстановлением прочности кристалла на траектории перемещения дислокации. Миграция дислокации происходит скольжением слоя решетки кристалла по соседнему. При этом дефект структуры решетки перемещается от одного узла решетки к другому. Если дислокация, возникающая у одной грани кристалла, пройдет через весь кристалл до его противоположной грани, то одна часть кристалла сместится по плоскости скольжения относительно другой на величину межузельного расстояния. На каждой из граней возникает "ступенька". При этом кристалл не изменит прочности. Деформация такого рода относится к пластическим деформациям. Миграция дислокации может происходить также переползанием ее из одной плоскости решетки в другую.

Дислокации возникают в процессе роста любого реального кристалла. Плотность их лежит обычно в пределах от 10^2 до 10^8 шт/см². Различные физические воздействия на кристалл (холодная прокатка, высокочастотная вибрация и др.) увеличивают плотность дислокаций, в которых концентрируется почти вся энергия, поглощаемая кристаллом. Хрупкое раз-

рушение кристаллов под действием напряжений происходит на локальных дефектах поверхности кристалла. Оно начинается со скопления дислокаций. Слияние их при росте напряжений является моментом образования микротрещины.



рушение кристаллов под действием напряжений происходит на локальных дефектах поверхности кристалла. Оно начинается со скопления дислокаций. Слияние их при росте напряжений является моментом образования микротрещины.

Слияние нескольких дислокаций приводит к образованию полости внутри кристалла, которая препятствует дальнейшему скольжению дислокаций в кристаллической решетке. С прекращением скольжения прекращается пластическая деформация кристаллов и начинается хрупкое разрушение. Таким образом, трещина уже при зарождении определяется как полость. Хрупкое разрушение кристаллов обычно происходит по поверхностям спайности. Они совпадают с направлением кристаллографических плоскостей решетки, поперек которых силы химического сцепления минимальны (правило Бравэ-Вульфа). Разрыв по плоскости спайности проходит не по всему сечению кристалла одновременно, а путем слияния зародышевых трещин в разных частях кристалла. При слиянии происходят перескоки с одной плоскости спайности на другую, параллельную, чем объясняется ступенчатый рельеф микротрещин в кристаллах.

Отдельность — еще одна форма потенциальных поверхностей ослабления в кристаллах. Так же как плоскости спайности, поверхности отдельности не являются трещинами, пока не произойдет слияние дислокаций. Положение плоскостей отдельности определяется не зонами ослабленных связей идеальной кристаллической решетки, как у спайности, а закономерностями ее искажений. Искажения могут быть вызваны присутствием двойниковых прослоек, закономерным распределением изоморфных примесей или субмикроскопических включений и др.

Для решения инженерных задач большое значение имеет соотношение длины трещины с размером области массива, на которую распространяется влияние сооружения. Условно выделяются три уровня: 1) $l < L/50$; 2) $L/50 < l < L$; 3) $l > L$. Поэтому практическое значение выделенных таксонов различно. Дислокации располагаются в зернах породы. Микротрещины — в зернах и небольших кристаллических агрегатах. Те и другие могут находиться в обломках несвязных грунтов, определять их морозостойкость и истираемость. В скальных грунтах микротрещины определяют кубиковую прочность и другие свойства грунта в объеме образца. Для инженерной геологии морфологическое изучение микротрещин имеет преимущественно научное значение. Трещины (макротрещины) длиннее образца, но короче основания большинства инженерных сооружений. Влияние их на сооружение оценивается путем статистического описания решетки трещин и показателей механических свойств, определенных полевыми методами.

Разрывы больше области воздействия сооружения на массив. Они,

как правило, немногочисленны и исследуются каждый в отдельности. Необходимо подчеркнуть, что разрывы могут быть не только тектоническими. К разрывам следует относить всякие нарушения сплошности массива протяженностью более 100 м, например, образованные при оползневом процессе. Крупные тектонические разрывы не только по длине, но и по ширине обычно превышают размеры сооружений. Они исследуются при инженерно-геологическом районировании. В расчетную модель основания, сооружения как отдельный элемент не включаются. В геологических материалах разрывы чаще всего представлены группой трещин, включающей зоны милонитизации и брекчирования. Поэтому объединение их в один классификационный ряд с трещинами условно. Однако на космо- и аэроснимках разрывы выглядят как трещины и, наоборот, при увеличении некоторые трещины выглядят как разрывы.

Ширина трещин, исследуемых в инженерной геологии, изменяется от микронов до первых метров. Разбиение этого диапазона на уровни не согласовано (табл. 3). По мнению автора, при разбиении на уровни необходимо руководствоваться задачами фильтрации как главными, для которых изучается ширина трещин. Как известно, скорость потока в трещине пропорциональна квадрату раскрытия и расход пропорционален кубу той же величины. Трещина шириной 1,0 см по водопрводящей способности заменяет тысячу сходных по другим параметрам трещин шириной 0,1 см. Поэтому изменение ширины трещин на порядок следует считать весьма существенным. Границы, совпадающие с единицами метрической шкалы, удобны. Названия уровням даны по возможности отличные от приведенных в табл. 2, чтобы можно было формировать такие, например, характеристики трещин: "короткие, но широкие трещины", "зияющие разрывы", "короткие и узкие трещины".

Необходимость в таких характеристиках очевидна, поскольку протяженность и раскрытие трещин в большинстве случаев слабо коррелированы [Чернышев, 1978].

Приведенные в табл. 3 границы, как и границы табл. 2, разделяют трещины, имеющие существенно различное практическое значение. К субкапиллярам (раскрытие менее 1 мк) отнесены трещины шириной порядка размеров пор в глинистых грунтах. В этих трещинах движение воды затруднено пленкой вязкой воды. Однако оно не исключено вовсе и в трещинах шире 0,2 мк подчиняется закону Буссинеска [Ромм, 1966]. По субкапиллярам возможна передача гидростатического давления. Закрытые трещины, залеченные в фильтрационном отношении вязкой водой, имеют расстояние между стенками около $1 \cdot 10^{-6}$ см.

К капиллярам мы относим трещины шириной порядка размеров пор в пылеватых грунтах. В таких трещинах свободно перемещается гравитационная вода. Однако в зоне аэрации она удерживается капиллярными силами, что существенно влияет на свойства массива, в частности на его прочность. Водопроницаемость массива с капиллярными трещинами ничтожна. Породы с такими трещинами при строительстве не цементируются. Притоки к штольням из пород с капиллярными трещинами не требуют организации водоотлива. Узкие трещины имеют раскрытие порядка размера пор в песке. Широкие — порядка размера пор в крупнообломочном грунте. Массив с трещинами подобной ширины водопроницаем, подлежит

Таблица 3

Уровни трещин и разрывов по абсолютной ширине

Ширина зоны дробления разрыва или ширина трещин в см.	Предложенные уровни				Рекомендуемые	
	Л.И. Нейштадт [1957]	Е.С. Ромм. [1966]	Ж. Ферран В. Тенос [Джегер, 1975]	В.Н. Жиленков [1975]		
10 ⁴	Очень крупные трещины	Макро-трещины	Макро-трещины	Крупные трещины	Зоны дробления разрывов	
10 ³						Щели (зияющие или заполненные)
10 ²						
10	Крупные трещины	Трещины	Трещины	Трещины	Широкие	
1						Средние трещины
10 ⁻¹							Мелкие трещины	Узкие
10 ⁻²	Тонкие трещины	Микро-трещины	Тонкие трещины	Мелкие трещины	Капилляры	
10 ⁻³						Микро-трещины
10 ⁻⁴							Микро-трещины	Микро-трещины
10 ⁻⁵	Микро-трещины	Микро-трещины	Микро-трещины			
10 ⁻⁶				Микро-трещины	Микро-трещины	Микро-трещины	Микро-трещины
10 ⁻⁶	Микро-трещины	Микро-трещины	Микро-трещины					Микро-трещины	Субкапилляры

цементации и может быть использован как источник водоснабжения. Многочисленность трещин позволяет моделировать массив сплошной водопроницаемой средой и применять к нему теорию фильтрации. Щели по размерам можно сопоставить с "порами" валунного или глыбового грунта. Они должны моделироваться каждая в отдельности как проницаемый пласт или свободное пространство.

§ 1.4. Степень трещиноватости массива

Степень трещиноватости массива оценивается по размеру блоков отдельности, пустотности массива и совершенству расчленения его на отдельные блоки. Первые две характеристики аналогичны зерновому (гранулометрическому) составу и пористости зернистых грунтов. Третья — своеобразна. Необходимость ее вызвана наличием мостиков или целичков (термин Р.Р. Тизделя) горной породы между блоками отдельности, роль которых исключительно велика в различных процессах.

Пустотность в верхних сотнях метров земной коры крайне редко превышает 10%, а чаще всего она менее 1% [Рац, Чернышев, 1970]. Такие же оценки приводит и Л. Мюллер: "В горной породе только в редких случаях пустотность превышает несколько процентов и обычно равна нескольким десятым процента" [1971, с. 95]. Л.И. Нейштадт значительно завысила пустотность, видимо, она использовала в своей работе преимущественно измерения на обнажениях [1957]. Исходя из опыта и стремясь

Таблица 4

Сопоставление классификаций трещиноватости по частоте трещин

Расстояние между трещинами, см	Трещиноватость							
	по А.В. Королеву [1951]	по В.В. Белоусову [1952]	по Н.И. Кригеру, Б.П. Преображенскому [1953]	по М.В. Рацу и С.Н. Чернышеву [1970]	по Л. Мюллеру [1971]	по Ч. Джегеру [1975]	по В.Н. Жиленкову [1975] и СНиП 11-16-76	по СНиП 11-44-78
300	I	Очень редкая	I	Очень редкая	Редкая	Очень редкая	Слабая	Слабая
200		Редкая				Редкая		
100		Средней частоты				Средняя		
60		Частая	II	Редкая	Средней частоты	Средняя		
50								
30	Очень частая	III	Густая	Частая	Сильная			
20	II					Средняя		
10	III	Тесная	Очень густая	Частая	Сильная			
5	IV					Очень частая		
3	V					Весьма сильная		
2		IV		Очень частая				
1				Очень частая				

к разбиению диапазона изменения величины на равные интервалы в логарифмическом масштабе, рекомендуем принять: малая пустотность менее 0,1%, средняя пустотность от 0,1 до 1,0%; большая пустотность от 1 до 10%, очень большая пустотность свыше 10%.

Второй после пустотности наиболее распространенной количественной характеристикой степени трещиноватости служит поперечник блоков. Известно два параметра для определения этой величины: 1) модуль трещиноватости M_T — количество трещин на 1 пог. м массива [Штини, по Мюллеру, 1971; Королев, 1951; Белоусов, 1952; Кригер, Преображенский, 1953; Методика..., 1969; СНиП II-16-76]; 2) a — расстояние между трещинами в системе по перпендикулярному к ним направлению [Мюллер, 1971; Рац, Чернышев, 1970; Джегер, 1975; Richter, Molek, Reuter, 1976]. В последнее время все чаще предпочтение отдается величине a . Расстояние между трещинами удобнее в статистической обработке и геометрических расчетах. Однако этот показатель применим только к системной сети трещин. Для хаотических сетей следует определять модуль трещиноватости, хотя модуль следует рассматривать только как грубую классификационную характеристику трещиноватости. В табл. 4, где сведены классификации различных авторов, количество трещин на 1 пог. м пересчитано в расстоянии между трещинами.

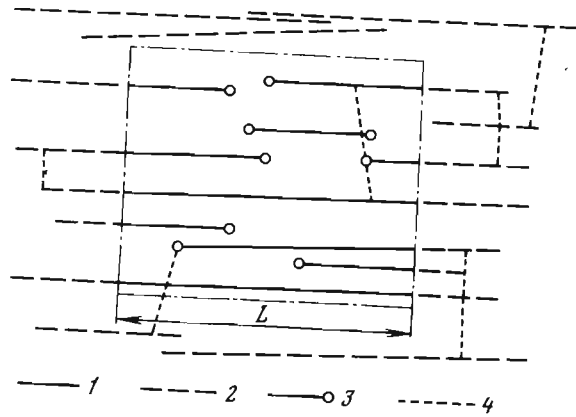
Классификации трещиноватости по частоте трещин, выполненные на протяжении более чем трех десятилетий, разнообразны. Даже две главы

СНиП содержат различные классификации. Преобладает разбиение на 4–5 уровней. С увеличением расстояния между трещинами у всех авторов увеличивается длина интервала классификации. Это соответствует левд-асимметричному логнормальному распределению расстояния между трещинами. Л. Мюллер [1971] проводит границы на уровнях 1, 10 и 100 см. Такая классификация проста, соответствует нашему принципу равенства классификационных интервалов в логарифмическом масштабе и может быть рекомендована для использования при инженерно-геологических и других исследованиях сетей трещин.

Прерывистость сети трещин [Рац, Чернышев, 1970], или степень расчлененности [Мюллер, 1971] массива на блоки, — наиболее сложное и еще не окончательно сложившееся понятие. В то же время значение показателя прерывистости для оценки прочности, водопроницаемости и других свойств массива трудно переоценить. Качественно различаются непрерывные (1), прерывистые (2) и разорванные (3) сети трещин. Им соответствуют массивы: разборные (1), т.е. полностью расчлененные на блоки; монолитные (3), которые не расчленены на блоки, а лишь имеют отдельные обособленные трещины, и среднетрещиноватые (2), в которых некоторые блоки отчленены, а другие связаны между собой целиками. Среднетрещиноватые массивы, занимающие промежуточное положение, наиболее распространены. В то же время большинство задач гидрогеомеханики решено для массивов с непрерывными сетями трещин.

Трудность выбора параметра для характеристики прерывистости сети трещин связана с тем, что прерывистость подвержена масштабному эффекту и меняется по направлениям. Действительно, любой разборный массив в зоне выветривания состоит из отдельных мелких, но монолитных блоков и, напротив, любой крупный монолитный массив, какие встречаются в центральных частях гранитных батолитов или молодых молассах, не безграничен, а имеет пределы, положенные тектоническими разрывами. Таким образом, относить сеть к непрерывной, прерывистой или разорванной можно только с указанием параметров сети трещин или размеров массива.

Количественные параметры для оценки прерывистости предложены Ф. Пахером [Мюллер, 1971], а также М.В. Рацем и С.Н. Чернышевым [1970] в виде функций от частоты и протяженности трещин. Ф. Пахер выражает ее как долю трещины в сечении массива, проведенном по плоскости трещины. Определить эту исходную для расчета величину без разборки массива невозможно, что отмечает и Л. Мюллер [1971]. Поэтому в западной литературе появляется предложение [K. Müller, 1974] определять расчлененность массива по измерениям в сечении, перпендикулярном трещине. Оно приближается к предложению, сделанному ранее нами. Видимо, в настоящее время наиболее соответствующей общим представлениям и реально определяемой следует считать оценку прерывистости в виде \bar{l}_1/\bar{a}_2 , где \bar{l}_1 — средняя длина трещин в системе 1, \bar{a}_2 — среднее расстояние между трещинами в системе 2 в направлении вдоль l_1 . Величина a достаточно точно может быть измерена в обнажениях и горных выработках. Величина l обычно не поддается непосредственному измерению, так как по протяженности многие трещины выходят за пределы обнажений, а тем более горных выработок. Для определения средней длины на обна-



Р и с. 7. Способ определения средней длины трещин на ограниченной площади обнажения

1 — видимая часть измеряемых трещин; 2 — те же трещины за пределами обнажения; 3 — видимые окончания трещин; 4 — трещины другой системы

жении можно воспользоваться зависимостью

$$\bar{l} = L((2N/n) - 1), \quad (1)$$

где \bar{l} — средняя длина трещин, L — длина площадки, на которой производятся измерения, N — общее количество трещин измеряемой системы в пределах площадки, n — количество окончаний трещин на площадке.

Например, на рис. 7 изображена зарисовка разреза с 16 горизонтальными трещинами. Площадь обнажения показана квадратом. Трещины за пределами квадрата невидимы. При условии статистической однородности совокупности трещин среднюю длину их можно определить, подсчитав количество трещин на той же площади обнажения, поэтому окончаний трещин заканчивается обычно за пределами обнажения, поэтому окончаний удастся насчитать меньше, чем трещин. В примере количество окончаний $n = 9$. Количество трещин на обнажении $N = 10$. Из расчета по этим данным средняя длина горизонтальной трещины $\bar{l} = 5,8$ м. Действительная средняя длина по всей совокупности 5,1 м.

Для количественной оценки совершенства системной сети трещин можно принять следующие критерии [Количко, 1976]. Непрерывной считать сеть, в которой из множества систем трещин имеется три примерно ортогональных системы, для которых выполняются неравенства $\bar{l}_1 > 2a_2$; $\bar{l}_1 > 2a_3$; $\bar{l}_2 > 2a_1$; $\bar{l}_2 > 2a_3$; $\bar{l}_3 > 2a_2$; $\bar{l}_3 > 2a_1$. Разорванной следует считать такую сеть, в которой ни одно из неравенств не выполняется. Сеть, для которой выполняется часть неравенств, называется прерывистой.

Степень трещиноватости косвенно определяется по удельному водопоглощению, скорости упругих волн и т.п. (см. гл. 7).

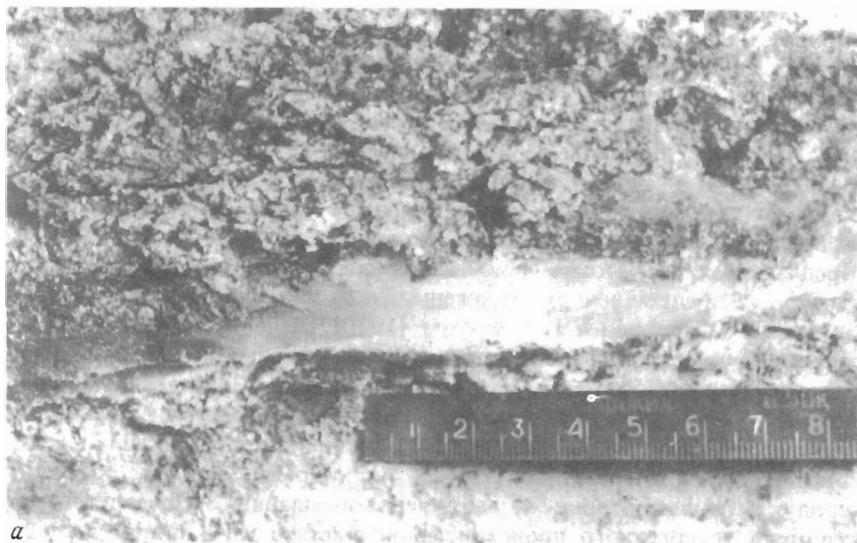
По степени заполнения трещин твердыми минеральными образованиями принято различать открытые, заполненные (рыхлым материалом) и залеченные (жильными образованиями) трещины. Последние в большинстве задач инженерной геологии не имеют значения и не подлежат изучению. Напротив, в рудной геологии они являются основным объектом исследования. В инженерной геологии исключительно практическое значение имеет изучение ледяных жил в трещинах (рис. 8, а). Они резко снижают прочность массива в момент протаивания.

Предлагаемая здесь классификация заполнителей (табл. 5) базируется на известных представлениях, отраженных в инженерно-геологической литературе. Г.Г. Скворцов и В.В. Фромм [1970] разделили трещины на заполненные продуктами разрушения вмещающих горных пород и заполненные продуктами отложения из растворов. В работе [Золотарев, Калинин, Минервин, 1970] заполнители классифицированы преимущественно по происхождению материала. Выделены: 1) тектонические брекчии; 2) минеральные образования, принесенные гидротермальными растворами; 3) продукты выветривания; 4) накопления вымывания. Здесь отсутствуют заполнители техногенного происхождения, а четвертый и третий таксоны в значительной степени перекрываются. Однако принцип предложен удачно. Он использован при составлении классификационной схемы (см. табл. 5). В основу ее положен общий принцип литологии, которая разделяет горные породы по способу осаднения на породы механического осаднения, химического осаднения и органогенного осаднения. Последняя категория в трещинах, видимо, почти не встречается, однако для полноты она включена в классификацию.

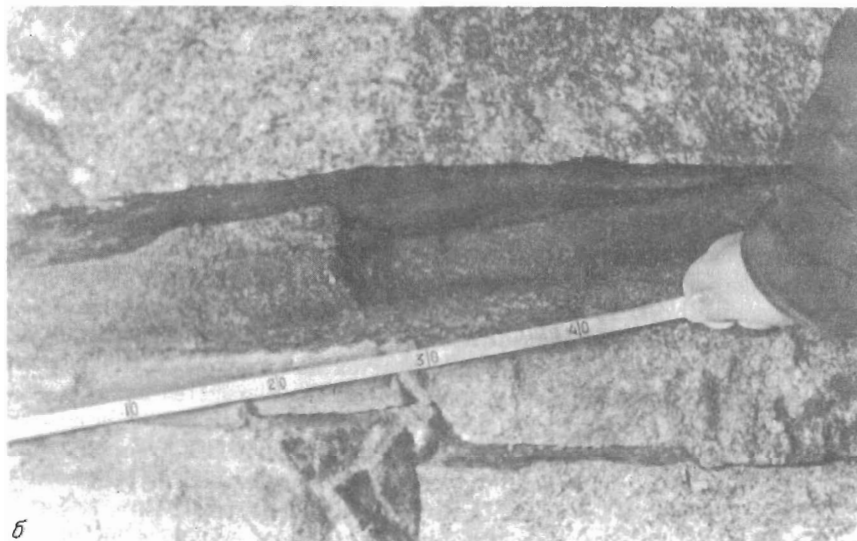
Заполнители органогенного происхождения резко отличаются по составу. Органическое вещество разлагается в трещинах с образованием кислот, активизирующих выветривание. Химические осадки в трещинах представлены кальцитом, жильным кварцем и аморфными разновидностями кремнезема, сульфидами, сульфатами и др. Химические осадки обычно плотно залечивают трещину. Она исключается из путей фильтрации, роль ее как механического ослабления массива сильно снижается ввиду возникающего сцепления между стенками. Однако это сцепление, обусловленное кальцитом, гипсом, лимонитом, не больше сцепления в породе. Поэтому разрушение массива чаще происходит унаследованно по залеченным химическими и физико-химическими осадками трещинам. Иногда химические и физико-химические осадки накапливаются только в виде пленки на поверхности трещины.

Заполнитель механического осаднения — это песчаные, пылеватые и глинистые частицы, которые накапливаются в трещинах, будучи привлечены туда водным потоком или оставаясь на месте своего образования. Заполнитель, не смещенный с места своего образования, значительно плотнее внесенного. Например, в гранитах встречаются в качестве заполнителя плотные крупные дресвяные пески, образованные при выветривании из катаклазированной породы. Катаклазу и выветриванию подвергаются

¹ Написан совместно с Г.Н. Авдеевым.



а



б

Р и с. 8. Заполнитель трещин в гранитах основания Колымской ГЭС на р. Колыме
Штольня 777, глубина 40 м; в трещине жильный лед (а), заполнитель — крупнозернистый песок (б)

в первую очередь линзовидные блоки породы, залегающие между сближенными трещинами. Вследствие этого в гранитах возникают линзы песков (рис. 8, б), ограниченные прочными гранитами. При суффозионном выносе песчаного заполнителя в массиве образуются зияющие трещины, раскрытие которых поддерживается отдельными прочными глыбами породы (рис. 9). Заполнители механического происхождения, образова-



Р и с. 9. Зияющие трещины в гранодиорите, образованные при суффозионном выносе выветрелого тектонита (МНР, строительная площадка ГОКа Эрденет), фото М.И. Погрёбского

Т а б л и ц а 5

Классификация заполнителей трещин по происхождению

Осаждение заполнителя в трещине	Наименование заполнителя по происхождению материала	Состав и свойства заполнителя трещин	
Химическое или физико-химическое	Магматический	Скальная горная порода, прочно залечивающая трещину	
	Гидротермальный и пневматолитовый	Скальная горная порода, залечивающая трещину	
	Гипергенный	Коллоидные образования, сужающие или залечивающие трещину	
Искусственный	Искусственный	Скальный и полускальный грунт, залечивающий трещину	
	Механическое	Тектонический	Милонит, тектоническая брекчия. Плотные, водонепроницаемые, малопрочные, слабо сжимаемые
		Гипергенный	Обломочная или глинистая горная порода рыхлого сложения. Водонепроницаемые малопрочные, сжимаемые
Искусственный	Искусственный	Скальный, полускальный или нескальный грунт, залечивающий трещину	
	Органогенное	Фитогенный	Корневая сеть растений, гниющие остатки растений. Проницаемая среда, способствует выветриванию
Зоогенный		Остатки организмов и продукты их гниения, вымытые в трещины. Ослабляет массив, способствует выветриванию	

ные при гипергенезе, отличаются низкой плотностью. Они не только менее плотны, чем милониты, но и менее плотны, чем поверхностные четвертичные отложения. Уплотнению механических осадков в трещинах препятствуют обломки крупных фракций и неровности стенок трещин. Заполнитель механического осаднения нередко образует скопления в отдельных сужениях трещин, оставляя свободными расширения трещин.

В заключение необходимо отметить, что с литологических позиций заполнитель трещин еще слабо исследован. Наиболее изучены чрезвычайно значительные практически рудные образования, которые, однако, мало распространены в земной коре. Заполнители иного состава и структуры изучены еще недостаточно и, как говорится, ждут своего исследователя, который подойдет к этому объекту с позиций литологии.

§ 1.6. Генетические классификации трещин¹

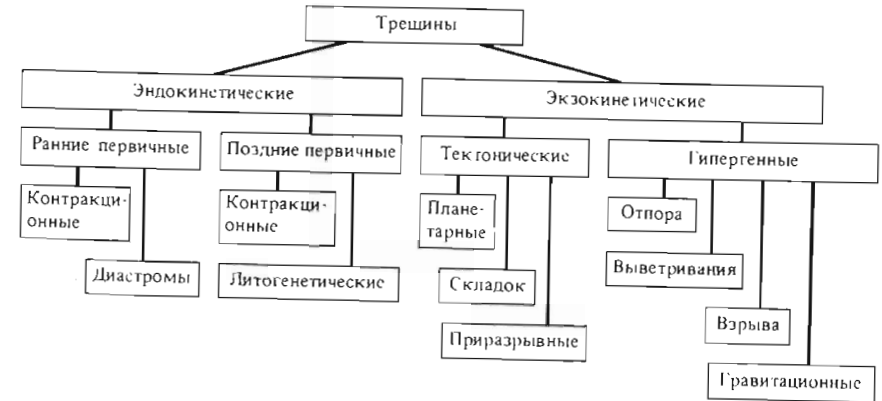
За десять лет, прошедших с тех пор, когда М.В. Рац писал: "составить удовлетворительную генетическую классификацию трещиноватости пока невозможно" [Рац, Чернышев, 1970], мало что изменилось. "Поэтому не случайно, что при изысканиях во многих конкретных случаях невозможно обоснованно разделить такие типы трещин, как литогенетические и тектонические, выветривания и разгрузки, литогенетические и выветривания, планетарные и соскладчатые и т.д." [Варга, 1980]. Ввиду сложности вопроса уже стал падать интерес к генетическим классификациям. На наш взгляд, от генетических классификаций отходить нельзя по крайней мере по следующим причинам: 1) в генетических терминах суммирован опыт изучения трещиноватости, накопленный несколькими поколениями геологов; 2) генетические классификации необходимы для прогноза трещиноватости при региональных исследованиях на основе изучения геолого-структурных условий; 3) для экстраполяции и интерполяции наблюдений трещиноватости между разведочными выработками при инженерно-геологических изысканиях и геологической разведке.

Сложность положения с генетическими классификациями, на наш взгляд, вызвана недооценкой роли унаследованности в развитии трещин. До сих пор генетические типы трещин рассматривались отдельно. При исследовании любого генетического типа — трещин выветривания, складок или других — выбирался объект, почти лишенный изменений трещиноватости, наложенных процессами, не имеющими отношения к формированию данного типа трещин. Если же такие наложенные изменения имели место, то, естественно, при исследовании они отфильтровывались как помеха. На практике при инженерно-геологической оценке массива такая фильтрация информации невозможна. Сейчас необходимо признать, что большинство трещин в массиве развивается унаследованно. Поэтому обычно трещина несет на себе черты, полученные при литогенезе, тектонической деформации массива, гипергенезе и, нередко, техногенезе. К какому же генетическому типу отнести такую трещину? На практике ее относят к тому типу, который, по мнению исследователя, проявлен наиболее четко. Тут и возникают разногласия.

¹ Написан совместно с Г.Н. Авдеевым.

Таблица 6

Генетическая классификация трещин



Анализируя генезис трещин в массиве горных пород, следует рассмотреть историю образования массива и выделить этапы образования (преобразования) трещин. Такими этапами почти для каждого массива являются: 1) первичное растрескивание при литогенезе; 2) тектонические деформации; 3) гипергенез; 4) техногенез. На каждом этапе унаследованно развиваются трещины, возникшие ранее (естественное исключение составляет первый этап), и могут образоваться, но не всегда образуются новые трещины. Рассматривая каждый этап отдельно, выделяем три вида трещин: 1) законсервированные трещины, сохранившиеся от предыдущего этапа в неизменном виде (чаще всего они залечены); 2) унаследованные старые трещины, преобразуемые на новом этапе; 3) новообразованные трещины. К новообразованным относятся трещины, которые не несут на себе каких-либо черт, свойственных трещинам предыдущих этапов геологической истории массива. В отдельных случаях к новообразованным могут быть условно отнесены и глубоко, до неузнаваемости, преобразованные трещины, возможно, существовавшие ранее. Ведь никакое новообразование трещин не обходится без слияния существовавших ранее микротрещин, следы которых полностью стираются. И горная порода при метаморфизме получает новое качество и новое название.

Все существовавшие генетические классификации разработаны только для новообразованных трещин. Поэтому при анализе трещиноватости конкретного массива необходимо прежде всего выделить новообразованные трещины каждой стадии растрескивания массива, а затем рассмотреть преобразования трещин на последующих стадиях. Пример такого анализа будет приведен в конце параграфа.

Сейчас обратимся к традиционной схеме генетической классификации трещин, имея в виду, что она относится только к новообразованным трещинам.

Анализ известных генетических классификаций трещиноватости [Иностранцев, 1905; Cloos, 1921; Müller, 1933; Пэк, 1939; Храмушев, 1941; Болк, 1946; Соколов, 1947, 1962; Sander, 1948; Пермьяков, 1949; Королев, 1951; Кригер, 1951; Белоусов, 1952; 1962; Лыкошин, 1953;

Т а б л и ц а 7
Формирование сети трещин

Этапы геологической истории массива	Трещины в массиве горных пород							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Современный, строительный	П- - -	П- - С	П-Г- -	П-Г-С	ПТ- -	ПТ-С	ПТГ- -	ПТГС
Гипергенез	П- -		П-Г		ПТ- -		ПТГ	
Тектогенез	П- -				ПТ			
Петрогенез	П							

П – контракционные (первичные) трещины, Т – тектонические трещины и трещины, измененные при тектогенезе, Г – гипергенные трещины и трещины, измененные при гипергенезе, С – современные трещины взрыва и трещины, измененные при строительстве

Михайлов, 1956; Нейштадт, 1957; Косыгин, 1958; Кушнарв, Лукин, 1960; Коломенский, 1952; Золотарев, 1962; Рац, 1962; Методика... 1969; Невский, 1979; Букринский, Михайлова, 1963; Скарятин, 1965; Белый, 1970; Павлова, 1970; Рац, Чернышев, 1970; Шульц, 1971; Маслов, Котов, 1971; Тамм, 1972; и др.] показал, что классификации большинства авторов строятся на фундаментальных геологических основаниях, которые, однако, нигде не названы. Эти основания: энергия, образующая трещины, время и место их образования. В соответствии с этим, в нашей обобщающей схеме (табл. 6) разделение проводится в первую очередь по происхождению и направлению потока энергии, образующей трещины. Выделяются эндокинетические трещины, возникающие за счет энергии, запасенной горной породой, и экзокинетические, образованные за счет внешнего энергетического воздействия на породу. Это фундаментальное разделение введено более ста лет тому назад Ласо и Гроддеком [Иностранцев, 1905]. На следующем уровне разделение производится по приуроченности трещинообразования к той или иной стадии развития горной породы. Здесь основанием для разделения служит своеобразно трансформированное геологическое время. По времени возникновения выделяются четыре типа трещин: 1) первичные трещины, возникающие в подвижном еще материале горной породы; 2) первичные трещины, возникающие в осадке или расплаве после остановки потока; 3) тектонические трещины, возникающие в породе после литификации (кристаллизации) под влиянием движения земной коры; 4) гипергенные трещины, возникающие в породе на последних стадиях развития после выхода ее на поверхность в зону выветривания, разгрузки и инженерной деятельности.

Каждый из этих четырех типов далее подразделяется по месту возникновения трещин. Место мы здесь понимаем в чисто геологическом смысле, определяя его как литолого-структурные условия образования трещин. Среди первичных трещин выделяются трещины глубинных гипабиссальных и эффузивных образований, а также трещины слоя осадочной или

Трещины в массиве горных пород

9	10	11	12	13	14	15
-Т- -	-Т-С	-ТГ- -	-ТГС	-Г- -	-Г-С	- - -С
-Т- -		-ТГ		- - Г		
-Т						

пирокластической породы. Среди тектонических выделяются трещины горизонтальной или полого наклоненной слоистой толщи (планетарные), трещины складок и приразрывные. Среди гипергенных выделяются трещины зоны разгрузки и зоны выветривания. Отдельно рассматриваются сплещифические трещины, локализованные в месте воздействия взрыва или удара.

Дальнейшее деление можно провести по конкретным формам геологических структур. Оно даст несколько десятков подтипов трещиноватости. Например, приразрывные трещины можно разделить на трещины раздвигов, надвигов, сдвигов, сбросов, а контракционные трещины гипабиссальных тел на трещины даек, силлов, лакколитов, лополитов, апофизов и т.д. Трещиноватость каждого из названных образований имеет свои особенности в соответствии с формой, пространственным положением и кинематикой образования разрывов или интрузивного тела. Наконец, выделение типов трещиноватости проводится по составу горной породы, разбиваемой трещинами. Ввиду многочисленности классов их практически невозможно привести в классификационной схеме. На этом уровне, например, выделяются трещины выветривания гранитов, базальтов, известняков, сланцев, мергелей, песчаников и т.д. В каждой горной породе трещины выветривания обладают определенными морфологическими особенностями. Они будут рассмотрены в последующих главах.

Для примера рассмотрим генетические типы трещин Большепорожского гранитного батолита на р. Колыме. Массив пережил первичное контракционное растрескивание, тектонические деформации при орогенезе, гипергенные и техногенные (при строительстве) деформации. На каждом этапе возникали новообразованные трещины. На всех этапах происходило унаследованное развитие трещин, возникших ранее. Схема формирования сети трещин Большепорожского батолита приведена в табл. 7. Верхняя строка таблицы представляет собой перечень генетических типов трещин, имеющих в массиве в настоящее время. В каждой строке слева показаны неизменные и унаследованно развивающиеся трещины, а справа - новообразованные трещины.

На современном этапе в массиве имеется 4 класса и 15 генетических типов трещин. Не все из них встречаются в строительных котлованах. Так, нам не прихо-

дилось видеть тектонические трещины, не измененные при гипергенезе, так как выветривание повсеместно проникло по зонам разрывов. Трещины типов 9 и 10 (табл. 7) могут быть встречены на глубине. Напротив, трещины типов 7 и 8 принадлежат к наиболее распространенным в силу унаследованного характера развития трещиноватости. Поскольку на техногенном этапе трещиноватость развивается так же унаследованно, как и ранее, типы 7 и 8 необходимо признать наиболее существенными с практической точки зрения. Каждый из выделенных типов обладает определенной характеристикой. Например, 1 – первичные трещины, не измененные тектоническими процессами, не измененные при гипергенезе и не измененные при строительстве, представляющие собой преимущественно короткие жилы, залеченные гидротермальными минералами; 2 – такие же трещины без следов выветривания, но раскрытые при взрыве или вследствие упругого отпора.

Цифровое обозначение генетического типа лаконично, но трудно воспринимается. Словесное определение содержательно, но длинно: для определения трещин первого типа потребовалось 14 слов. Генетический тип трещины удобно обозначать формулой, ставя столько букв, сколько этапов растрескивания отразилось на данной трещине, и отмечая прочерками этапы, на которых трещина не изменялась. Например, для второго генетического типа П – – С, для восьмого ПТГС, для четырнадцатого – – ГС. При необходимости в формулу может быть включена информация о степени изменения трещины на том или ином этапе. Для этого необходимо ранжировать трещины по степени изменения. Номер ранга можно поставить как цифровой индекс при букве, обозначающей этап. Можно показать в формуле и способ изменения. Например, для конкретной трещины краткая запись "ПТ₁ вГ₂ –" означает: первичная трещина, слабо измененная при тектонических деформациях, при гипергенезе существенно измененная выветриванием, не затронутая техногенным процессом. Такое обозначение генезиса трещин при массовой инженерно-геологической документации в горных выработках и строительных котлованах снимает противоречие между однозначностью традиционной записи (например, "тектоническая трещина" или "трещина бортового отпора") и неопределенностью диагностики. Запись освободит исследователя от необходимости вопреки очевидному унаследованную трещину, сформированную рядом процессов, связывать только с одним из них. Еще одно преимущество предлагаемого подхода в возможности хранения кодированной генетической информации в информационно-поисковых системах. Извлеченная для обработки, такая информация значительно полнее традиционной однозначной. Например, трещина –ТГ – отличается от гипергенной признаками, присущими тектоническим трещинам, а именно протяженностью, прямолинейностью, определенной ориентировкой, связанной с ориентировкой тектонических структур.

Глава 2

ОСНОВНЫЕ ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ТРЕЩИН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

§ 2.1. Геологические факторы, определяющие трещиноватость горных пород

Сеть трещин в массиве горных пород можно рассматривать как запись некоторых событий геологической истории. По трещинам можно восстановить напряжения, существовавшие в массиве. Состав заполнителя раскрывает историю магматических инъекций, гидротермальных и гипергенных преобразований массива. Штрихи на стенках трещин показывают направления тектонических движений. События геологической истории составляют цепь важнейших факторов, формирующих сеть трещин в горных породах.

Однако события геологической истории по-разному отражаются на

разных породах. Трещины в песчаниках и аргиллитах, переживших общие события геологической истории, закономерно различны. Таким образом, выделяются две группы факторов, определяющих структуру сети трещин: историко-геологическая и литолого-петрографическая. Соответственно двойко можно описывать сети трещин. И тот, и другой способ описания принят в инженерной геологии.

В работе Н.Н. Маслова [1941], видимо, впервые находим инженерно-геологическую характеристику различных изверженных горных пород. Различие трещиноватости глубинных и излившихся пород приводит, по Н.Н. Маслову, к существенным различиям их свойств. Так, интрузивные породы вне зависимости от состава обычно характеризуются слабой водопроницаемостью. Лишь в поверхностных зонах, где трещиноватость и выветрелость больше, увеличивается и водопроницаемость. Излившиеся породы гораздо более водопроницаемы. Особенно это касается базальтов. В некоторых случаях базальты бывают настолько пористыми, что вся поверхностная вода поглощается ими очень быстро. Это обстоятельство во многих случаях усиливается тем, что под базальтами лежит галечник. Кислые лавы (липариты, кварцевые трахиты, обсидиан и т.д.) отличаются гораздо меньшими и водопроницаемостью и водоносностью, так как они обычно содержат гораздо меньше крупных пор и пустот.

Впоследствии характеристика трещиноватости для инженерно-геологических целей по типам пород была развита В.А. Приклонским [1952]. Однако колоссальное количество литолого-петрографических разностей горных пород и повторяемость типов сетей трещин в различных горных породах приводят к отрицанию литологического принципа классификации трещиноватости.

Исторический или геолого-генетический принцип классификации трещиноватости, известный в геологии, для инженерно-геологических исследований применен Л.И. Нейштадт [1957] и М.В. Рацем [1962]. Автор в дальнейшем изложении следует этому принципу. Генетические типы сетей трещин выделяются в соответствии с этапами развития трещиноватости, совпадающими с главными событиями геологической истории массива.

Раздельно рассматриваются первичные, тектонические, гипергенные трещины. Основное удобство такого подхода в том, что выделяются немногие генетические типы трещин. Основанием для развития генетического направления служит большое сходство сетей трещин одного генезиса в различных породах. Так, тектонические трещины в слоистых толщах имеют весьма определенные черты, которые качественно повторяются в слоях песчаников, алевролитов, мергелей, известняков, доломитов и других горных пород. Различие в составе и структуре слоистой толщи приводит лишь к количественным, но не принципиальным изменениям в сети трещин. Более того, характерные особенности приразрывных тектонических трещин повторяются в осадочных, магматических и метаморфических породах. Поэтому задача изучения трещин по генетическим типам всегда актуальна. Основные генетические типы трещин описаны во многих работах. Результаты генетического изучения трещиноватости приведены в данной главе. Главный недостаток генетического подхода к изучению трещиноватости – затушевывание литологического фактора. Он носит принципиаль-

ный характер, так как без изучения литологического фактора невозможно выявить общие особенности генетических типов трещин.

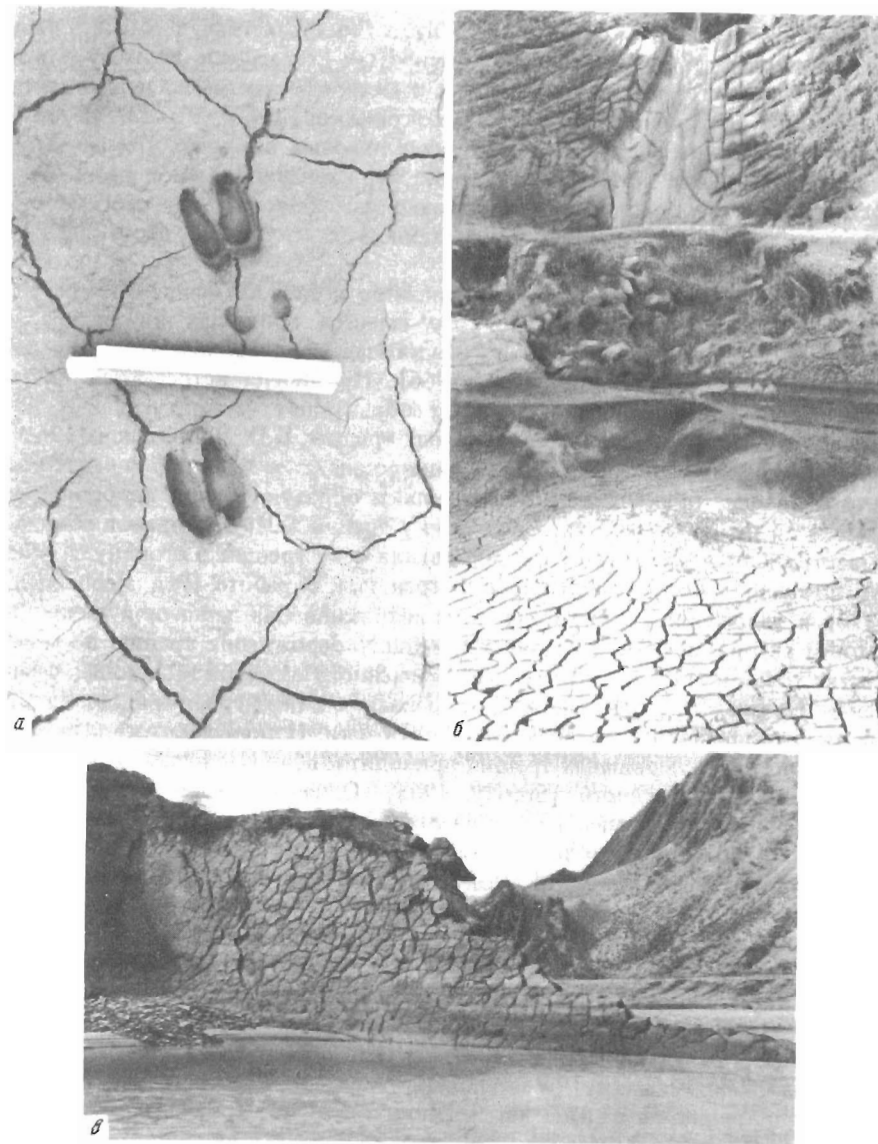
Соединить литологический и генетический подход к изучению трещиноватости можно на формационной основе, изучая генетические типы трещин по формациям (см гл. 4).

§ 2.2. Первичные трещины

К первичным относятся трещины, возникающие в кристаллизующемся расплаве и литифирующемся осадке за счет энергии, запасенной при внедрении, излиянии и осаждении. Поэтому характер первичной трещиноватости контролируется составом пород, первичной формой их залегания и темпом петрогенеза. Часто на характер первичной трещиноватости оказывает влияние напряженное состояние и динамическая обстановка в прилегающих массивах горных пород (подвижность рамы — по удачному выражению А.А. Полканова [1946]). В интрузивных породах трещины без исключения образуются при влиянии рамы. В простейшем и широко распространенном случае первичные трещины возникают в горизонтальном лавовом покрове или слое осадка. При отсутствии воздействий со стороны рамы напряжения в слое складываются силами стяжения и веса. Стяжение в изотропном материале дает шаровой тензор напряжений. Сила тяжести создает вертикальное сжимающее главное нормальное напряжение. В результате сложения полей напряжений эллипсоид напряжений приобретает форму эллипсоида вращения с короткой вертикальной осью и равными осями в горизонтальной плоскости. Горизонтальное сечение эллипсоида представляет собой круг. В таких условиях при наличии растяжения во всех направлениях с ростом контракционных напряжений в первую очередь возникают вертикальные трещины отрыва. По азимуту они ориентированы произвольным образом в силу равенства главных нормальных напряжений в горизонтальной плоскости. Структурная неоднородность в осадке или расплаве, флуктуации температурного поля нарушают равенство растягивающих напряжений в горизонтальной плоскости, по-своему в каждой точке пласта. Поэтому вертикальные трещины простираются по-разному, образуя сеть непараллельных между собой смыкающихся щелей (рис. 10). После образования вертикальных трещин напряжения в породе перестраиваются. Теперь минимальным становится главное нормальное напряжение, направленное вертикально.

В определенных условиях при защемлении блоков породы в вертикальных трещинах контракционные напряжения превышают гравитационные и в породе образуются горизонтальные трещины. Эти трещины параллельны между собой и составляют систему. Очевидно, что вероятность превышения вертикального давления контракционными напряжениями с глубиной убывает. Поэтому в лавовых покровах и гипабиссальных силах расстояние между горизонтальными трещинами увеличивается с глубиной. В осадочных породах горизонтальные трещины, как правило, совпадают с поверхностями раздела слоев. Расстояния между ними регулируются в процессе седиментации.

Ширина трещин и поперечник полигонов зависят от величины энергии, запасенной в осадке или расплаве. Чем больше, к примеру, вязкой воды



Р и с. 10. Первичные полигональные сети трещин в слоях песчано-глинистых осадочных отложений в Таджикистане (чаша вдхр. Нурекской ГЭС), фото М.И. Погребиского

а — прерывистая сеть трещин усыхания на поверхности остановившегося селевого потока в процессе растрескивания; *б* — непрерывная сеть трещин усыхания в глинистом осадке (для сравнения на заднем плане дана системная сеть тектонических трещин в слое известняков, поставленном вертикально); *в* — первичные трещины в слое песчаника мелового возраста

удерживают глинистые частицы в осадке, тем больше энергии выделится при дегидратации и тем больше будет пустотность массива. Такая же связь между температурой расплава и пустотностью. Естественно поэтому, что в пределах единой фации трещинная пустотность, обусловленная первичными трещинами, постоянна [Рац, 1963; Толоконников, 1966]. Расстояние между вертикальными трещинами в мощных лавовых покровах уменьшается с глубиной [Левинсон-Лессинг, 1940; Тер-Степанян, Аракелян, 1975]. Рассматриваемое поле напряжений позволяет объяснить эту особенность первичной решетки трещин возрастанием с глубиной вертикальных сжимающих напряжений.

Остановимся теперь на форме полигонов и способе сочленения вертикальных трещин. По этому вопросу имеется обширная литература и не только геологическая. Известно, что в базальтах преобладают 5-6-угольные отдельности [Толоконников, 1966]. Но иногда встречаются почти правильные ортогональные сети с преобладанием четырехугольных отдельностей. Исследуя сети морозобойных трещин, Б.Н. Достовалов [1959] пришел к выводу, что для однородных массивов характерны ортогональные трещины, а шестигранники образуются при искривлении трещин на неоднородностях. Свою точку зрения Б.Н. Достовалов обосновывает, анализируя процесс формирования сети трещин в сторону от уже существующей бесконечной плоской трещины. В работе [Рац, Чернышев, 1970] в изложенной выше концепции возникновения первичной трещиноватости авторы исходили из одновременного зарождения трещин во множестве точек по всему массиву, одновременного их роста и, наконец, смыкания. На рис. 10, а показана незавершенная сеть первичных трещин. Четко видны автономно развивающиеся участки сети. Одновременное по всему объему развитие первичных трещин приводит к возникновению шестигранных столбов отдельности [Smolly, 1966]. Однако в реальных массивах среднее количество граней у столбов отдельности меньше шести (табл. 8). Д. Смолли объясняет это тем, что в природе не реализуются очень короткие стороны многогранников, получающиеся при модельном рассмотрении процесса.

Своеобразие сетей первичных трещин проявляется еще в способе пересечения трещин. По подсчетам А. Веба, М.В. Раца и автора, для рассматриваемых здесь сетей трещин характерно смыкание трех лучей (см. рис. 10 и табл. 9). Такое смыкание трещин вполне укладывается в концепцию автономного развития каждого участка сети. Действительно, если источник напряжений замкнут в полигоне, то и порожденная им трещина не распространяется дальше уже возникшей ранее трещины — границы полигона. Иначе идет развитие трещин при наличии внешнего источника напряжений, например, развитие тектонических трещин. Внешняя сила создает относительно однородное поле напряжений во всех блоках массива, и трещины из одного блока трассируются в другой. Вследствие этого в тектонических сетях на плоском срезе чаще наблюдаются четырехлучевые пересечения (табл. 9) с преобладанием четырехугольных "ячеек". Наложение внешних полей напряжений на контракционные приводит к тем же результатам. Поэтому контракционные трещины батолитов ближе по геометрии к тектоническим, чем к первичным, описанным выше.

В гранитных батолитах, по Клоосу [Cloos, 1921], выделяются по от-

Таблица 8

Фактические данные о числе сторон полигонов в первичных сетях трещин [Рац, Чернышев, 1970]

Местоположение	Количество полигонов с числом граней, %						Среднее число граней	Наблюдавшееся число граней	Источник
	3	4	5	6	7	8			
Базальтовый поток в районе Лунных кратеров, Айдахо (Q)	—	28	56	16	—	—	4,9	50	[Beard, 1959]
Базальтовый поток Дансмур, Калифорния (Q)	0,5	14,3	46,0	33,5	4,5	1,0	5,3	200	[Beard, 1959]
Базальты "Дороги гигантов", Северная Ирландия	—	4,5	35,0	51,0	9,25	0,25	5,7	400	[Beard, 1959]
Базальты Армении	1	13	36	36	13	1	5,5	—	[Толоконников, 1966]
Андезитовые лавы Грузии	—	4,4	32,0	63,6	—	—	5,6	—	[Н.В. Короновский, 1968]
Песчано-глинистый осадок в долине р. Вахша (Q ₄)	10	27	17	27	12	7	5,0	150	
То же	10	27	35	19	7	2	5,0	200	

ношению к структурам течения поперечные и продольные трещины, крутые и пологие, а также диагональные. Они образуют четыре основные системы первичных трещин и обозначены Г. Клоосом буквами Q, S, L, D. Каждой системе свойственны определенные черты, связанные с ее ориентировкой относительно осей главных нормальных напряжений, которые определенным образом ориентированы относительно структур течения. Систематика Г. Клооса на протяжении более чем 50 лет существования находила многочисленных сторонников [Пэк, 1939; Болк, 1946; Кригер, 1951; и др.] и подвергалась критике [Елисеев, 1935].

Инженерно-геологические исследования трещиноватости в области распространения гранитных массивов на Колыме, в Монголии и Средней Азии дали автору возможность убедиться, что в систематике Г. Клооса схвачены основные черты первичной трещиноватости гранитов. Отклонения от схемы Г. Клооса связаны с аномальным или нестабильным влиянием рамы. Для анализа природы отклонений от схемы Клооса интересный материал дает В.К. Монич [1957]. Он описывает изменение трещиноватости от контакта к внутренней части батолита. По мере приближения к контакту трещиноватость усложняется: увеличивается количество систем трещин, более изменчивыми становятся густота и длина трещин. В целом по мере приближения к контакту отклонения от схемы Клооса увеличиваются. Вообще по мере приближения к контакту увеличивается дисперсия всех параметров трещин, возрастает неоднородность и, следовательно, увеличиваются отклонения от любой схемы.

Первичная трещиноватость гипабиссальных тел имеет много общего с трещиноватостью излившихся массивов и глубоких интрузий.

Это понятно, поскольку гипабиссальная фация занимает промежуточ-

Характеристика пересечения трещин

Число лучей в пересечении	Процент узлов с данным числом лучей			
	Первичные трещины			
	глазури	лавового покрова		гранитного баголита
		$l \sim 10$ м	$l \sim 1$ м	
1	2	3	4	5
1	0,6	0,8	2,7	6,7
2	0	0	0	2,9
3	77,5	71,8	72,0	60,0
4	21,5	23,9	22,0	32,6
5	0,4	2,3	1,8	0,4
6	0	0,8	0,6	0,4
7	0	0,4	0,6	0
8	0	0	0,3	0

ное положение по условиям кристаллизации и растрескивания между глубинными телами и эффузивами. Основные черты сходства трещиноватости гипабиссальных и глубинных интрузивов: 1) преимущественное развитие трех систем ортогональных трещин; 2) гидротермальное заполнение трещины; 3) приконтактные изменения трещиноватости. С эффузивами те же сети первичных трещин гипабиссальных тел связаны четким проявлением столбчатой отдельности, а также появлением местами шаровой и неправильно-глыбовой форм отдельности.

Первичные трещины даек следуют обычно перпендикулярно контакту и образуют полигональную сеть, по форме не отличающуюся от сети в осадочных породах. Они выглядят точно так же, как трещины в песчанике на рис. 10, в. Необходимо подчеркнуть морфологическую общность сетей трещин. Она выражает подобие напряженного состояния осадочных и магматических пород в момент растрескивания. Но, безусловно, есть различия сетей трещин в осадочных и магматических породах, связанные с различиями общей структуры массива. Массив осадочных пород слоистый. Первичные трещины в нем локализованы в отдельных слоях, строго ориентированы перпендикулярно слою, длина их пропорциональна мощности слоя. Обычно одна трещина пересекает 1–3 слоя, не более. Расстояние между первичными трещинами осадочных пород и их ширина четко связаны с мощностью слоя. В слое алевролита мощностью 1,1 м максимальная ширина трещин 12 см при средней ширине 7 см. В слое того же состава мощностью 0,2 м ширина трещин около 1 см, а в слое мощностью порядка 0,01 м ширина трещин усыхания около 0,1 см. Известная связь частоты литогенетических трещин с мощностью слоя рассмотрена при описании "общих" трещин, которые трудно отграничить от литогенетических.

В магматических породах, в отличие от осадочных, структуры первичных сетей трещин более разнообразны, что связано с разнообразием форм

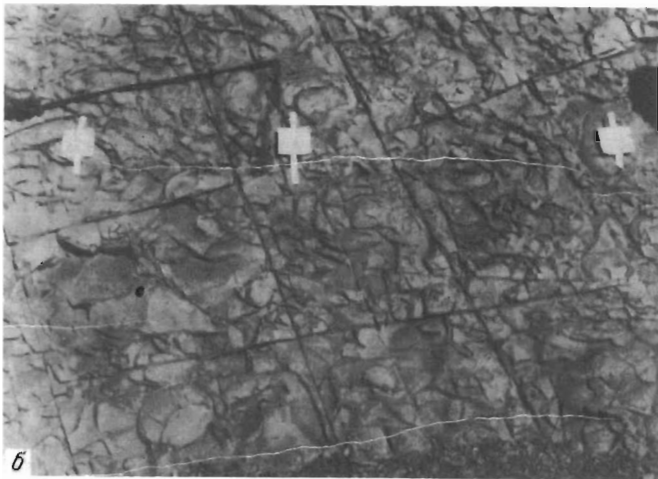
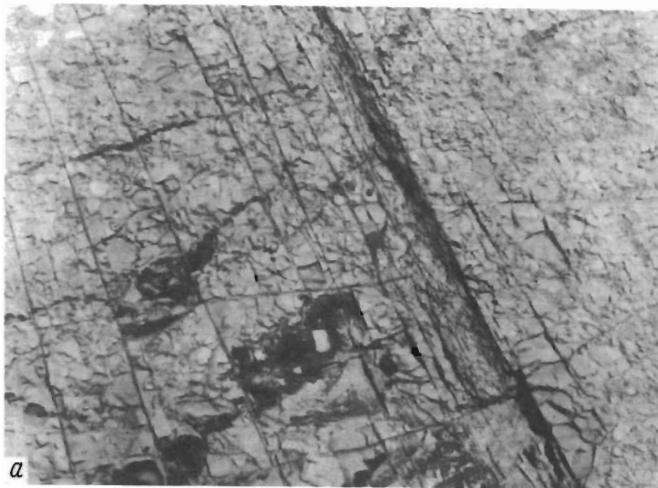
Процент узлов с данным числом лучей					
Первичные трещины				Тектонические трещины	Гипергенные трещины
усыхания в иле				соскладчатые в алевролитах у Нурека	взрыва в гранитах (р. Колыма)
6	7	8	9	10	11
1,5	3,3	4,2	6,5	10	1,4
0	0	0	0	0	12,8
83,2	88,5	86	75	18	72,8
14,8	8,2	8,4	18,5	72	11,4
0	0	1,4	0	0	1,4
0,5	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

магматических тел, которые могут быть подобны слою (тогда первичные трещины магматических тел подобны трещинам осадочных пород) или иметь совершенно иные формы. От самых простых, как отдельная лавовая подушка подводных излияний со сфероидной трещиноватостью (рис. 4, а), и до сложнейших сплетений отдельных струй и глыб лавы, в которых расположение трещин не подчинено какой-либо закономерности. В интрузивных телах и мощных эффузивах трещины у поверхности магматического тела обычно перпендикулярны контакту или поверхности потока, а с уходом внутрь тела отклоняются к вертикальному направлению. Таким образом возникает изогнутая столбчатая отдельность и веерообразное расположение трещин у изогнутых контактов магматических тел.

§ 2.3. Тектонические трещины

К тектоническим относятся трещины, возникающие под воздействием внешних сил, связанных с относительным перемещением масс в земной коре. Для изучения геометрии сетей трещин главное не происхождение этих сил и даже не их величина, а принципиальное отличие от сил контракции, образующих первичные трещины. Это отличие в том, что тектонические силы по отношению к массиву внешние, тогда как контракционные — внутренние. Именно с этим отличием связана основная особенность тектонических трещин, присущая всем классам этих трещин — системность (рис. 11).

Одна система трещин может возникнуть в ходе первичного растрескивания, но две или более всегда обязаны своим происхождением внешнему полю тектонических, преимущественно сжимающих, напряжений. Несколько систем трещин в первичной решетке могут возникнуть только при сложении контракционного поля напряжений с внешним тектоническим полем в момент первичного растрескивания. Несколько систем в зоне



Р и с. 11. Системная сеть прямолинейных тектонических трещин и сфероидальная сеть трещин выветривания на поверхности слоя алевролитов в долине р. Вахша у ГЭС Байпазы. Расстояние между тектоническими трещинами около 30 см

гипергенеза наблюдаются обычно при оживлении многосистемной решетки тектонических трещин. Эта наиболее общая особенность тектонических трещин не всегда отмечается при описании трещиноватости. Другая общая особенность тектонических трещин — их прямолинейность, особенно характерная для микро- и макротрещин и менее характерная для разрывов. Подчеркивая эти особенности тектонических трещин, Ю.А. Косыгин писал: "Тектонические трещины в большинстве прямолинейны и им свойственно закономерное расположение" [1958]. Прямолинейность трещин, как и системность, вызвана постоянством тектонических напряжений в пространстве и времени. Прямолинейность и системность нарушаются при пересечении геологических границ, связанных с существенным изме-



Р и с. 12. Тектонические трещины на крыле складки Кули-Меер в Дагестане

нением свойств горных пород. В однородных массивах прямолинейность тектонических трещин сохраняется на протяжении многих километров и даже сотен километров.

Например, в Дагестане в однородных массивных известняках баррема можно наблюдать прямолинейные тектонические трещины протяженностью в несколько километров. На снимке (рис. 12), сделанном с соседней вершины, видно крыло крупной антиклинальной складки, бронированное мощным слоем массивных известняков барремского яруса. Вниз по склону спускаются прямолинейные параллельные ложины, совпадающие с трещинами отрыва, поперечными складке. Под углом около 45° сечет эти ложины трещина скалывания. Видимая длина ее около 1,5 км.

Подчеркивая прямолинейность тектонических трещин как их общую особенность, нельзя отрицать, что в определенных геолого-структурных условиях возникают кольцевые разломы, искривления и расщепления разрывов [Невский, 1979]. Они связаны либо с локализацией напряжений от внедряющейся магмы, соляного штока или космического тела, либо с механической неоднородностью среды.

Каждому классу тектонических трещин свойственны особенности, хорошо изученные на протяжении последних десятилетий. Рассмотрим трещины планетарные, складок и приразрывные в последовательности, соответствующей все большей локализации сетей и в какой-то мере отражающей очередность их возникновения.

Планетарные или общие [Шульц, 1971; Белоусов, 1952, 1962] трещины пользуются чрезвычайно широким распространением, образуя наряду с литогенетическими трещинами фон трещиноватости осадочных пород. Они давно изучаются на Русской и Североамериканской платформах и обладают следующими общими особенностями.



Р и с. 13. Планетарные трещины в горизонтально-слоистой толще мергель-алевролитового состава. Высота обнажения 12 м

1. В каждой точке массива образуются две взаимно перпендикулярные системы, которые в недислоцированных толщах вертикальны и простираются чаще всего по направлению СВ и СЗ или на север и восток.

2. Системы общих трещин прослеживаются по разрезу платформенных отложений от докембрия до четвертичных (автору приходилось наблюдать их в четвертичных травертинах на Кавказе и суглинках в Монголии). Ориентировка их при этом может оставаться неизменной, а расстояние между трещинами вверх по разрезу увеличивается.

3. Трещины лучше выражены в прочных породах, в которых они преимущественно перпендикулярны слоистости и, как правило, не выходят за границы одного слоя.

4. С увеличением мощности слоя расстояние между трещинами увеличивается. Последние две особенности планетарных трещин хорошо видны на рис. 13.

Планетарные трещины отличаются от литогенетических системностью, которая, однако, не всегда выражена четко ввиду большого разброса значений азимутов трещин. Они отличаются также большей протяженностью в вертикальном направлении и прямолинейностью, т.е. всеми теми особенностями, которые присущи тектоническим трещинам. Единая для литогенетических и общих трещин зависимость расстояния между трещинами от мощности разбиваемых ими слоев была, видимо, впервые отмечена одновременно А.А. Богдановым и И.В. Кирилловой в 1947 г. и количественно исследована в 1962 г. М.В. Рацем [Рац, Чернышев, 1970], который показал, что расстояния между трещинами с увеличением мощности слоя

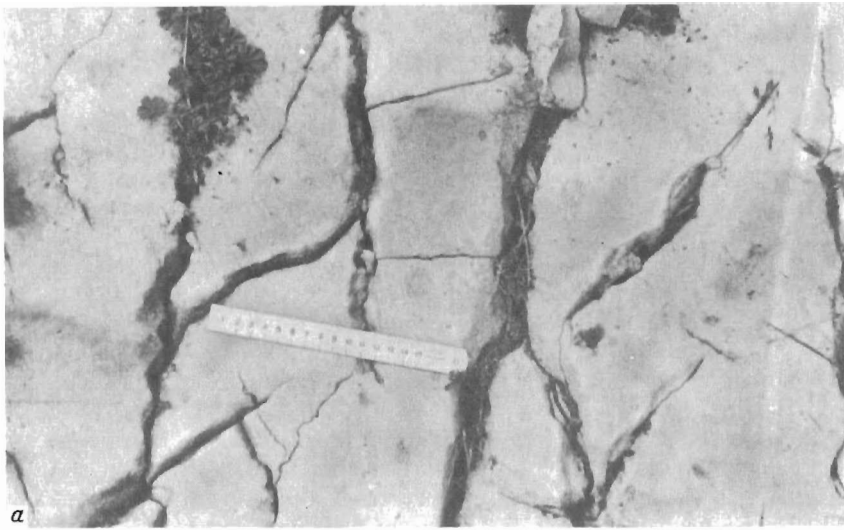
возрастают замедленно по закону $a = rM^k$, где M — мощность слоя, r и k — эмпирические коэффициенты.

Трещины складок возникают в горных породах, по-видимому, под действием тех же напряжений, которые создают складки, трансформируемых в каждой точке массива. По месту распространения и времени образования трещины складок совпадают со складками. Исследованию этих трещин посвящена обширная литература. Достаточно сказать, что класс трещин под названием "трещины складок" выделен уже в классификациях Гроддека и Ласо [Иностранцев, 1905]. В последующие годы появились работы, в которых рассматриваются трещины складок [Пэк, 1939; Sander, 1948; Кириллова, 1949; Белоусов, 1952; Косыгин, 1958; Гзовский, 1964; Кноринг, 1969; Погребиский, 1969; Букринский, 1970; Burge, Thompson, 1970; Guneisen, 1973; McQuillan, 1974]. Идеи и факты получили математическое оформление и развитие в работах [Adler et al., 1969; Hattori, 1971].

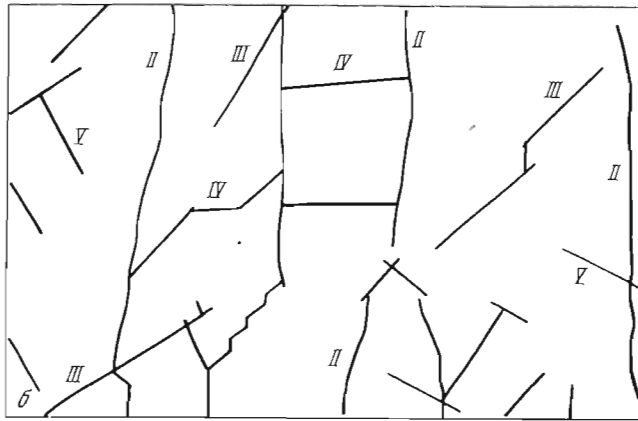
Автор в течение ряда лет исследовал тектоническую трещиноватость на складках продольного сжатия в Таджикистане и Иране, а также на складках поперечного изгиба в Дагестане. Совместно с сотрудниками (М.И. Погребиским, Н.И. Кутузовой и др.) им произведены десятки тысяч измерений ориентировки трещин в различных частях различных складок как с разрывами, так и без них. Основные закономерности ориентировки трещин на складках наиболее распространенного типа с достаточной полнотой выявлены И.В. Кирилловой [1949]. И.В. Кириллова на основании полевых работ в районе г. Мхеты установила следующую схему расположения трещин на складчатой структуре: система трещин, перпендикулярных пласту и параллельных его простиранию (8% от всего числа трещин); система трещин, перпендикулярных пласту и параллельных его падению (8%); системы трещин, перпендикулярных пласту и простирающихся под острым или тупым углом к простиранию пласта (36%); системы трещин, параллельных напластованию (20%); системы трещин, секущих пласт под различными углами, отличными от 90° , и простирающихся как пласт (5%), прочие трещины (23%).

Основные системы [Белоусов, 1952], составляющие в данном случае 72% трещин, параллельны или перпендикулярны напластованию (рис. 14, 15, 16). Во многих случаях на долю этих систем падает 90% и более трещин [Косыгин, 1958]. Это подтверждается и наблюдениями автора. Из названных систем не все встречаются совместно. Различия между трещиноватостью складок продольного сжатия и поперечного изгиба выражаются в преобладании тех или иных систем и в углах между трещинами и плоскостью напластования. В обычных условиях при сильной случайной изменчивости параметров трещин эти отличия трудноразличимы и несущественны для инженерной геологии.

Принятая И.В. Кирилловой схема верна только для участков складок с горизонтальным шарниром. На участках ундуляции и на периклиналях эта схема нарушается [Чернышев, 1974]. Действительно, положение систем трещин в крыле складки связано не с современными элементами залегания слоя, а с ориентировкой осей напряжений в момент складкообразования. Положение этих осей или координат Зандера [Мюллер, 1971, с. 189] наиболее четко реконструируется по элементам залегания слоев и наклону



а

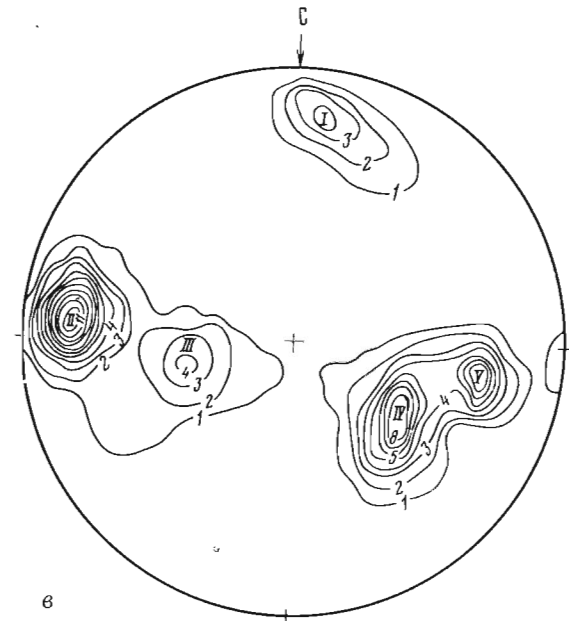


б

Р и с. 14. Четыре системы тектонических трещин, перпендикулярных слою на крыле антиклинали Кули-Меер

а - фотография (сеть трещин выявлена коррозией; длина линейки 15 см); б - зарисовка; в - круговая диаграмма трещин

шарнира. Для складок продольного сжатия ось максимальных главных нормальных напряжений проходит вдоль слоя перпендикулярно шарниру, ось минимальных главных нормальных напряжений перпендикулярна слою, а ось промежуточных главных нормальных напряжений лежит в плоскости слоя и параллельна шарниру. Возникающие в таком поле напряжений трещины перпендикулярны слою и параллельны или перпендикулярны шарниру, а не линии простирания или падения слоя, как это со времени публикации И.В. Кирилловой [1949] утвердилось в литературе [Кноринг, 1969].

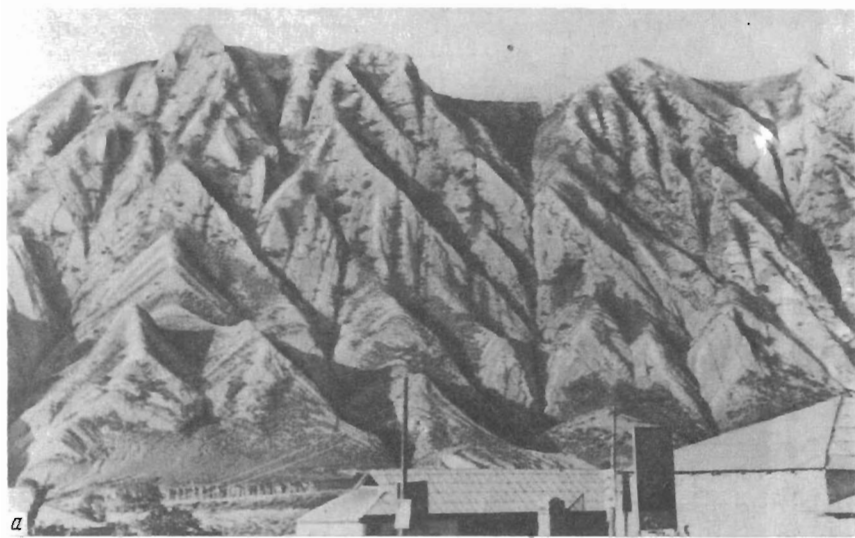


в

Косые трещины также определенным образом ориентированы не относительно элементов залегания слоя, а относительно плоскости слоя и линии шарнира. Когда линия шарнира горизонтальна, что практически наблюдается чаще всего, тогда направления главных нормальных напряжений совпадают с линией падения и линией простирания. В этом частном случае верна схема Кирилловой. Сделанное обобщение привело к пересмотру метода вращения, довольно широко используемого в структурной и инженерной геологии (см. гл. 8). Использование метода вращения без поправки приводит к ошибочным выводам об отсутствии единства в строении решетки трещин на различных частях складки. К аналогичному выводу о необходимости корректировки метода вращения пришел М.Р. Гуламов [1975].

Среди выделенных И.В. Кирилловой систем трещин имеются основные, включающие большинство трещин и второстепенные, представленные локально и только отдельными трещинами. Но даже основные системы развиты не всегда совместно. На некоторых складках имеется только три основные системы трещин. Всегда присутствуют трещины напластования и какие-либо две из четырех основных систем трещин. Это могут быть либо две системы трещин отрыва, простирающихся параллельно и перпендикулярно шарниру, либо две системы трещин скола, которые в случае складок продольного сжатия перпендикулярны слою и образуют с линией шарнира угол, близкий к 45° и 135° .

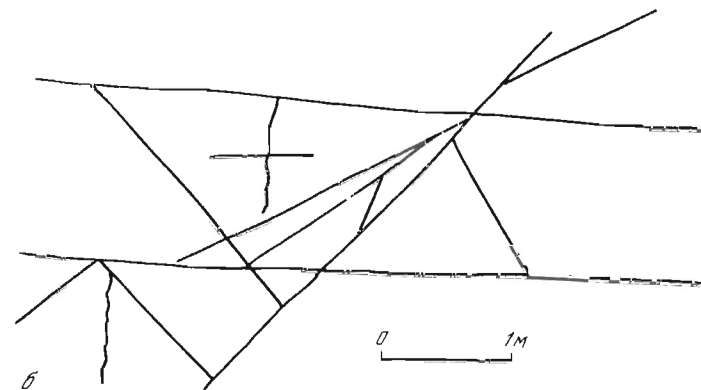
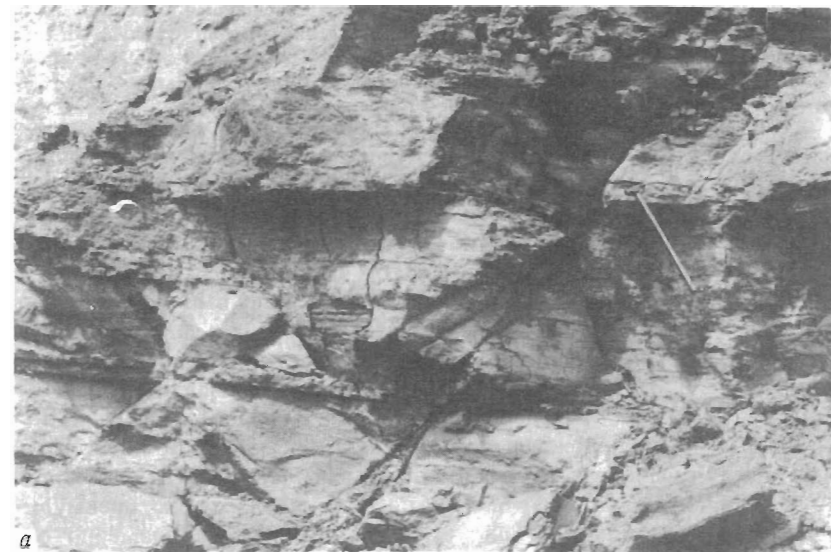
Попарное распространение систем установлено нами, в частности, в складках на Керманском угольном месторождении в Иране (табл. 10). Здесь сгущение трещин в системе, перпендикулярной шарниру (II), пространственно связано со сгущением трещин в другой системе трещин отрыва, параллельной шарниру (IV). Коэффициент



Р и с. 15. Рельеф на крыле складки, развитый по тектоническим трещинам

а — в альбских известняках в долине Аварского Койсу, развитый по системам тектонических трещин, перпендикулярных слоистости; *б* — то же в меловых красноцветах Гаджикской депрессии (долина р. Вахша)

корреляции, отражающий тесноту связи, имеет положительный знак и значение 0,66. Также прямой пропорциональной зависимостью связаны расстояния между трещинами в паре сопряженных систем сколовых трещин (III и V). Напротив, в местах сгущения трещин отрыва сколовые трещины разреживаются, и наоборот, при сгущении сколовых трещин разреживаются трещины отрыва. Это выражается отрицательными значениями коэффициентов корреляции между плотностью трещин скола и отрыва, например, для систем II и V или IV и V. Для построения табл. 10 исполь-



Р и с. 16. Наклонные к слоистости юрских алевролитов тектонические трещины скола в своде антиклинали в долине Аварского Койсу

а — фотография; *б* — зарисовка

зованы измерения плотности трещин, выполненные на обнажениях в 33 съемочных точках, в каждой из которых измерено примерно по 200 расстояний между трещинами и столько же элементов зацепления. В ходе обработки для каждой точки вычислены средние расстояния между трещинами в системах II, III, IV и V. Съемочные точки, в которых та или иная система отсутствует, в обработку не включались, так как в этих точках и этих системах расстояние между трещинами возрастает до бесконечности, что исключает подсчет коэффициента корреляции¹. Коэффициент кор-

¹ Если бы мы могли включить и эти точки, то коэффициенты корреляции по абсолютной величине сильно возросли бы и исследуемая закономерность выявилась бы еще более четко.

реляции рассчитывался по средним расстояниям между трещинами в системе. Например, за u принимались все 33 значения средних расстояний между трещинами в системе II, а за x соответствующие средние по системе IV. В данном случае было получено значение коэффициента корреляции 0,66.

Итоги выполненного нами анализа традиционного подхода к трещинам на складках вкратце сводятся к следующему: ориентировка трещин на складках изучена всесторонне и детально, основные закономерности ориентировки систем трещин выявлены в ряде предшествующих работ. Структура сети ошибочно давалась в этих работах в координатах слоя, тогда как ее следует давать в координатах складки. Эта поправка может быть учтена в дальнейших работах. Она требует лишь выбора новой системы координат для сложившейся модели решетки трещин складок.

Густота трещин на складках обладает тремя существенными для инженерной геологии закономерностями, из которых первая и вторая были описаны ранее: 1) трещины, перпендикулярные и параллельные слоистости, значительно чаще расположены, чем трещины, секущие слои косо; 2) расстояние между трещинами, перпендикулярными слою, зависит от мощности слоя; 3) из четырех систем трещин, перпендикулярных слою, преимущественным развитием обычно пользуются какие-либо две примерно ортогональные.

Приразрывные трещины локализованы вблизи тектонических разрывов. Ориентировка исследована во многих работах [Будько, 1958; Гзовский, 1960; Данилович, 1961 и ранее; Михайлов, 1956; Невский, 1959; Tchalenko, 1970; Стоянов, 1975; и др.]. Ширина зоны оперения и изменение густоты в зоне приразрывной трещиноватости исследованы менее детально.

Происхождением приразрывные трещины обязаны либо полю напряжений, формирующему разрыв, либо полю напряжений, возникающему в крыльях существующего разрыва при подвижках. Положение осей напряжений, в котором возникают опережающие трещины и разрыв, определяется силами, внешними по отношению к зоне разрыва. Положение этих осей диктует положение опережающих трещин и разрыва, развивающегося по ним. Все разрывы, кроме раздвигов, образуются слиянием опережающих трещин сколового типа [Тетяев, 1940; Гзовский, 1960; Рац, 1966]. Сколовые трещины, согласно теории Моора, подтверждаемой геологическими наблюдениями [Tchalenko, 1970; Стоянов, 1973; Погребиский, Чернышев, 1974а], образуют две системы трещин под углом $\pi/2 - \varphi$ друг к другу, где φ — угол внутреннего трения породы.

Т а б л и ц а 10

Матрица коэффициентов корреляции между частотой трещин по различным системам на складке

Номер системы	II	III	IV	V
II	1,0	—	—	—
III	-0,39	1,0	—	—
IV	0,66	-0,24	1,0	—
V	-0,48	0,74	-0,61	1,0

В соответствии с теорией, опережающие трещины группируются в две системы R и R' , по индексации, введенной Скремптоном [Стоянов, 1973]. Система R образуется с направлением зоны разрыва угол $\varphi/2$. Система R' — угол $90 - \varphi/2$. Кроме того, в окрестности разрыва формируются трещины оперения. Они, по мнению автора, своим происхождением обязаны полю напряжений, возникающему за счет трения при относительном перемещении крыльев. Угол между двумя наиболее развитыми системами оперения, как и между опережающими трещинами, равен $90 - \varphi$. Оперяющие трещины отличаются расположением относительно зоны разрыва. Зона проходит по биссектрисе острого угла между ними и, следовательно, образует с оперяющими трещинами угол $90 - \varphi/2$. Обычно возникает также система трещин оперения, параллельных зоне разрыва. Таким образом, всего возникает около пяти систем приразрывных трещин. Все эти системы расположены так, что линии их пересечения параллельны плоскости основного разрыва и перпендикулярны направлению относительного перемещения крыльев (рис. 17).

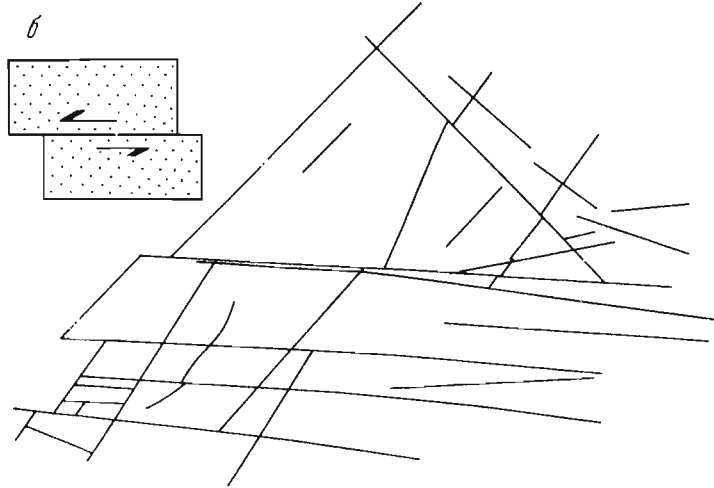
Многочисленность систем приразрывных трещин и значительная дисперсия ориентировки их в пределах почти каждой системы приводят к длительному живущих разрывов к слиянию систем. На круговой диаграмме трещиноватости трещины оперения с опережающими трещинами обычно сливаются в сплошное поле точек. Это вытянутое через диаграмму поле точек называют поясом оперения (рис. 18). Для некоторых разрывов, по наблюдениям В.Н. Даниловича [1961], подтверждаемым данными автора, кроме трещин пояса характерна система трещин, перпендикулярных поясу. На круговых диаграммах ее положение совпадает с полюсом поверхности разрыва. Таким образом, развитая решетка трещин у разрыва при наличии множества систем оперения по геометрическому строению сходна с решеткой первичных трещин, возникающих без влияния внешнего поля напряжений. Это сходство мы используем при построении единой геометрической классификации сетей трещин.

При смене направлений движений по разрывам трещины оперения образуют несколько поясов. Уже при наличии двух поясов их трудно различить на круговой диаграмме (в поле на обнажении даже опытный глаз не всегда может обнаружить и единственный пояс оперения). а при большем количестве поясов эта задача практически неразрешима. Поэтому зоны оперения разрывов часто характеризуются появлением трещин разнообразного направления или хаотической трещиноватостью.

Автором трещины оперения разрывов были исследованы на Керманском угольном месторождении в Иране, а также совместно с М.В. Рацем и М.И. Погребиским в Таджикской депрессии и Монголии, совместно с Н.И. Кутузовой в известняковом Дагестане. В этих работах практически одновременно с С.С. Стояновым и Д.С. Чаленко и независимо от них изучена ориентировка пяти основных систем приразрывных трещин, составляющих известный пояс оперения. Нами, по-видимому, впервые были исследованы закономерности изменения густоты трещин у тектонических разрывов [Погребиский, Рац, Чернышев, 1971].

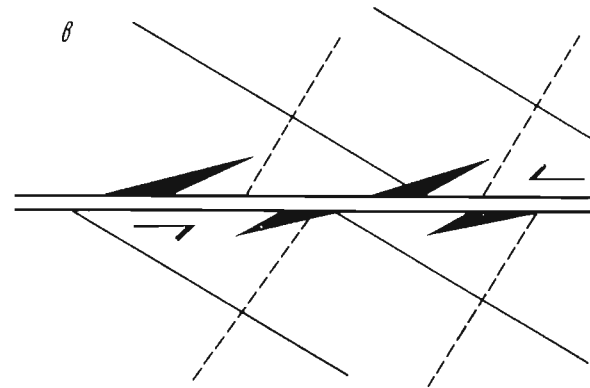
Анализ тренда густоты трещин по расстоянию от разрыва был выполнен на территории Таджикской депрессии в осадочных породах мезокайнозоя, а также в гранитоидах верхнего палеозоя Южно-Гиссарской структурно-фациальной зоны, грани-

а

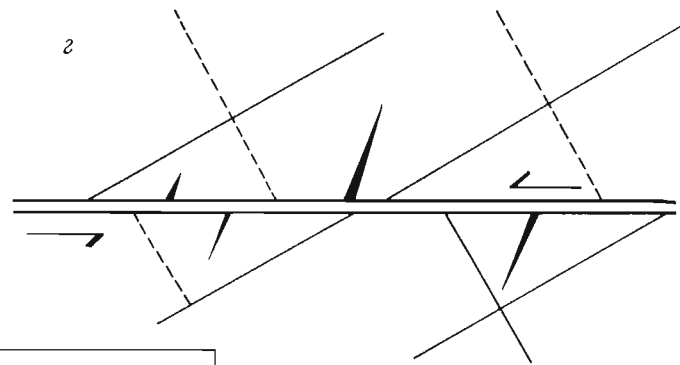


Р и с. 17. Трещины оперения Сарикамарского надвига (Нурекское вдхр.) в массивных песчаниках неогена. Вектор смещения лежит в плоскости снимка, три системы оперяющих трещин перпендикулярны плоскости снимка. Высота обнажения 15 м
 а – вид обнажения (фото М.И. Погребиского); б – зарисовка трещин; в – теоретическая схема расположения трещин, возникающих при сдвиге с дополнительным растяжением (по М.В. Гзовскому [1975]); г – то же с дополнительным сжатием: 1 – трещины скалывания, 2 – трещины отрыва. Площадь обнажения 30 X 40 м

в



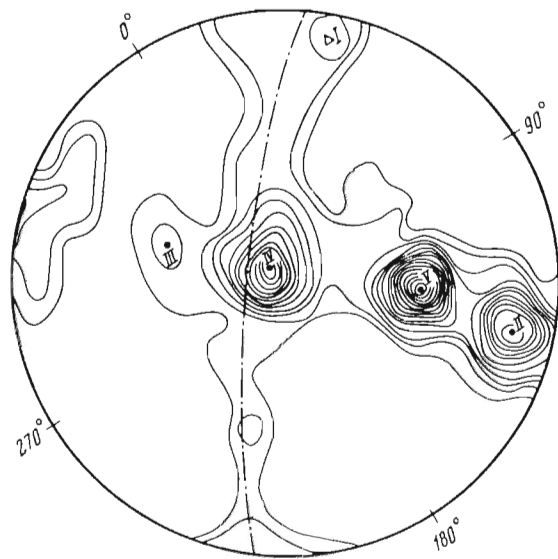
г



чащей на севере с Таджикской депрессией. Измерение густоты, т.е. расстояний между параллельными трещинами (а), проведено в точках, равноудаленных от разрыва. Для крупных разрывов удаление x достигало 10-15 км. Точки располагались по створам, перпендикулярным простиранию разрыва.

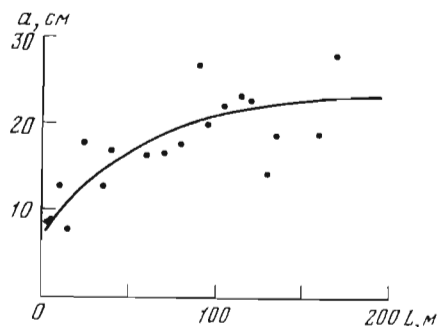
Измерения проведены для тектонических разрывов различного размера от крупнейшего регионального Вахшского сдвига-надвига на стыке области Южного Гиссара и Таджикской депрессии до небольших нарушений протяженностью в несколько сотен метров.

Анализ графиков зависимости (рис. 19) густоты трещин от расстояния до разрыва указывает на известное сгущение трещин у разрыва. Однако при количественном анализе связи сразу выделяется ее новая особенность - нелинейность. Сокращение расстояний между трещинами по мере приближения к разрыву убыстряется. Зависимость в общем виде может быть аппроксимирована функцией $\bar{a} = a_{\text{ф}} \cdot \text{Сехр}(x/k)$, где $a_{\text{ф}}$, C и k - параметры, оцениваемые методом наименьших квадратов. Геологическое содержание параметров: $a_{\text{ф}}$ - фоновое расстояние между трещинами в области, где не сказывается влияние разрыва; $(a_{\text{ф}} - C)$ - предельное минимальное расстояние между трещинами в зоне разрыва, после превышения которого происходит слияние трещин в единый разрыв и перетирание породы крыльев с образованием брекчии и милонита; параметр k характеризует ширину зоны приразрывной трещиноватости. Конкретные параметры уравнений по четырем разрывам приведены в табл. 11.



Р и с. 18. Круговая диаграмма трещиноватости с поясом приразрывных трещин, отмеченным пунктиром. Угольное месторождение Дарегор (Иран), угленосная толща юрского возраста

I – трещины по напластованию; II–V – тектонические трещины складки. Приразрывные трещины связаны с подвижками по напластованию



Р и с. 19. Изменение средних расстояний между трещинами по мере приближения к разрыву Таджикская депрессия, левый берег р. Вахша в районе Рогунской ГЭС

Т а б л и ц а 11

Изменение частоты трещин у разрывов. Параметры уравнений регрессии

Разрыв	Возраст г.п.	Длина, км	Ширина, км	Число измерений a
Сай Гоугел в бассейне р. Обишура, правого притока р. Вахша	$K_1(v+h)_1$ песчаник	1,0	0,2	600
Левый берег р. Вахша у г. Нурека	$K_1(v+h)_2$ песчаник	0,8	0,2	700
Гудизинданский, долина р. Обишура близ кшл. Кундызамон	$K_1 a p t + a l b$ песчаник	60-70	0,8	1000
Вахшский, р-н кшл. Ходжаалишо, Тагикомар	Pz_1 граниты	100	4,1	1300

Значения a_{Φ} и $a_{\Phi-C}$ для различных разрывов региона оказались близки. a_{Φ} характеризует региональную трещиноватость и, в идеале, могла бы быть постоянной по крайней мере для литологически однотипных пород. Вторая характеристика, хотя и относится непосредственно к зоне разрыва, как становится очевидно, более связана с прочностными свойствами пород. Это проливает свет на характер формирования разрыва и увязывается с существующими гипотезами роста разрывов [Тетяев, 1940; Гзовский, 1960; Рац и Чернышев, 1970]. Сгущение трещин в зоне разрыва интенсивно протекает до слияния некоторых из них в сплошную линию разрыва. После образования единой поверхности трещинообразование замедляется, однако не прекращается вовсе. Густота трещин у крупных, длительно развивающихся разрывов все же несколько больше, чем густота в зоне смесителей мелких разрывов.

В отличие от двух названных параметров уравнения, третий параметр k , характеризующий ширину зоны приразрывных трещин, весьма существенно связан с длиной разрыва. Он изменяется в наших условиях не в 2–3 раза, как a_{Φ} и $a_{\Phi-C}$, а более чем в 30 раз. Максимальных значений этот параметр достигает у наиболее длинных разрывов. Следовательно, в процессе роста разрыва в длину зона приразрывной трещиноватости интенсивно развивается не только у концов разрыва, что неоднократно подчеркивалось в литературе, но и вширь, а также менее интенсивно в непосредственной близости от сместителя. Эти наблюдения хорошо согласуются с теорией преобразования полей региональных напряжений у тектонических разрывов, а в более общей постановке у любых отверстий и трещин в материале [Griffith, 1921, 1924; и др.]. Согласно теории по всей длине разрыва вдоль него снимаются "региональные" напряжения. Они концентрируются у концов разрыва и в периферической области по всей его длине.

Обращает на себя внимание довольно строгое постоянство для района Рогунской ГЭС (строки 1, 3, 4 в табл. 11) значения $(a_{\Phi-C})/a_{\Phi}$. Если отдельно a_{Φ} и $(a_{\Phi-C})$ характеризуют каким-то образом прочность пород приразрывной зоны и характер тектонического процесса, то в безразмерном отношении характеристика пород упрощается и отношение выступает как некоторая постоянная, характеризующая для данного региона степень изменения трещиноватости в приразрывной зоне в сравнении с фоном. В районе Нурекской ГЭС им. Л.И. Брежнева и Рогунской ГЭС по данным около 3600 измерений происходит сгущение трещин у разрывов примерно в 3–4 раза в сравнении с фоном.

Мерой тесноты связи при анализе приразрывных трещин служит отношение дисперсии расстояний между трещинами s_a^2 при $x = \text{const}$ к полной дисперсии всех значений a в исследованной зоне разрыва.

	Параметры уравнений					Оценка тесноты связи η
	a_{Φ} , см	$a_{\Phi-C}$, см	$(a_{\Phi-C})/a_{\Phi}$	k , м	R , м	
	24,3	6,8	0,28	60	60-70	0,46
	38,0	13,0	0,34	50	60	0,56
	14,0	4,0	0,28	150	200	0,80
	25,9	5,9	0,23	1700	1500	0,35

Итак, при исследованиях тектонической трещиноватости осадочных и изверженных пород установлены общие закономерности строения решеток тектонических трещин. Трещины складок образуют группу взаимосвязанных по ориентировке систем трещин. Положение систем трещин на складке связано как с положением крыла, так и с положением шарнира. Приразрывные трещины образуют пояса оперения. Закономерности сгущения трещин у разрывов заключаются в следующем: сгущение трещин по мере приближения к разрыву идет нелинейно, ускоренно; зоны крупных разрывов от зон мелких отличаются преимущественно своей шириной, тогда как густота трещин в непосредственной близости от нарушения мало зависит от длины разрыва.

§ 2.4. Гипергенные трещины

Гипергенные трещины развиваются на контакте массивов горных пород с атмосферой и гидросферой. По месту появления мы разделяем их на возникающие вблизи объектов инженерной деятельности и связанные с ними, и на естественные, возникающие под воздействием природных факторов.

Трещины разгрузки (отпора). Массивы горных пород, выведенные на дневную поверхность, несут в себе следы напряжений, существовавших на глубине. Поле напряжений в таких массивах перестраивается, напряжения релаксируют. Если скорость релаксации напряжений мала по сравнению со скоростью эрозионной разгрузки массива, то у поверхности оказываются породы, обладающие некоторым запасом упругой энергии. В таких породах могут возникать трещины, для которых в отечественной литературе предложены названия трещин отпора, бортового [Лыкошин, 1953] и донного [Бондарик, 1959].

В результате разгрузки в первую очередь изменяются параметры трещиноватости в системе, примерно параллельной поверхности земли. Часто изменения затрагивают только ширину трещин, не касаясь других параметров трещиноватости. Ширина отдельных трещин достигает одного метра. Такое развитие процесса разгрузки автору приходилось наблюдать на Усть-Илимской [Чернышев, 1965] и Токтогульской ГЭС [Количко, Рац, 1966]. Нередко в системе, параллельной дневной поверхности, трещины не только расширяются, но и сгущаются [Kieslinger, 1958; Бондарик, 1959; Terzaghi, 1962; Müller, 1962; Прочухан, 1964; и др.]. Характер изменения ширины трещин и расстояния между ними примерно одинаков: расширение и сгущение трещин нарастает по мере приближения к поверхности по экспоненте (ширина трещин [Чернышев, 1965]) и гиперболе (расстояние между трещинами [Прочухан, 1964]). По мере приближения к поверхности земли возрастает не только среднее значение ширины трещин, но и дисперсия ширины. Рост дисперсии ширины трещин наблюдается, в частности, в траппах на Усть-Илимской ГЭС. Совместное нарастание среднего значения и дисперсии ширины трещин показывает, что процесс разгрузки, как и большинство геологических процессов, обладает избирательностью и унаследованностью. В ходе разгрузки оживляются унаследованные от предыдущих деформаций трещины. Разуплотнение идет за счет дальнейшего расширения трещин, оживших первыми. В результате растет дисперсия ширины трещин. О росте, в частности, фильтрационной неод-

нородности трещиноватого массива в ходе разгрузки писал Д.С. Соколов [1962]. Рост фильтрационной неоднородности изверженных массивов был позднее подтвержден статистической обработкой результатов фильтрационного опробования массивов различных изверженных пород. Неоднородность других физических свойств массива, зависящих от трещиноватости в зоне разгрузки, также возрастает.

Изменение ширины и густоты трещин в системах, не параллельных поверхности земли, часто практически незаметно. Изменение ширины b и расстояния между трещинами a по системам в каменноугольных известняках на Токтогульской ГЭС (данные А.В. Количко, М.В. Раца) приведены в табл. 12. Система 1 параллельна, системы 2 и 3 непараллельны поверхности земли. Если же трещиноватость в системах, непараллельных поверхности, подвергается изменениям, то изменения носят тот же характер, что и в системе, параллельной поверхности земли.

Процесс разгрузки редко приводит к образованию новой системы трещин, параллельной поверхности земли. Условия возникновения горизонтальной системы трещин предположительно таковы: 1) отсутствие в массиве трещин, примерно параллельных поверхности земли; 2) наличие в массиве весьма высоких сжимающих горизонтальных напряжений, приводящих к потере устойчивости слоя, что в свою очередь может привести к возникновению вертикальных растягивающих напряжений. Случаи возникновения специфических трещин разгрузки описывает Кислингер [Kieslinger, 1958], рассматривая граниты Норвегии. Здесь новые трещины образуются, если существующие в массиве трещины пересекаются с поверхностью земли под углом больше 20° .

Трещинами разгрузки принято называть не только те трещины, которые возникли в зоне разгрузки, но и те из ранее существовавших трещин, которые претерпели в результате разуплотнения массива существенные изменения. Степень изменения, при которой тектонической или петрогенетической трещине можно присвоить новое название, конечно, условна, однако можно назвать несколько морфологических черт, при совместном присутствии которых общепринято относить трещины к трещинам разгрузки. Это прежде всего местонахождение вблизи земной поверхности и ширина в несколько сантиметров или дециметров; простирание примерно параллельно поверхности земли; зияние или заполнение элювием и даже четвертичными образованиями другого генезиса.

Глубина, на которую распространяется разуплотнение массива в результате разгрузки, показана в табл. 13, составленной по данным обработки массовых фильтрационных испытаний. Мощность зоны разгрузки на Русской и Восточно-Сибирской платформах колеблется в пределах первых десятков метров. Причем для слабых пород и для участков относительно активных поднятий мощность зоны разгрузки больше, чем для пород более прочных, залегающих на участках менее активных поднятий. Отметим, что проведение нижней границы зоны разгрузки всегда условно, поскольку раскрытие трещин, как и изменение других параметров, постепенно затухает с глубиной, асимптотически приближаясь к некоторому среднему значению, характерному для глубинных частей массива.

Механизм образования **техногенных трещин разгрузки и выветривания** совершенно такой же, как механизм образования соответствующих естест-

Т а б л и ц а 12

Изменение частоты и ширины трещин различных систем с глубиной

Глубина от устья штольни, м	1		2		3	
	a, см	b, мм	a, см	b, мм	a, см	b, мм
0,0-5,0	15,0	0,8	6	0,2	16	0,4
5,0-10,0	14	0,3	6	0,2	16	0,4
10,0-20,0	18	0,2	8,5	0,2	11	0,1
20,0-30,0	—	—	6	0,1	17	0,1

Т а б л и ц а 13

Мощность зоны разгрузки в различных условиях

Район	Породы	Мощность зон разгрузки, м	Источник
Днепрогэс	Граниты	15	[Саваренский, 1937]
Кременчугская ГЭС	"	15	[Конярова, Нейштадт, 1963]
Украина	Гранито-гнейсы	30	То же
Башкирия	Известняки	30	[Лыкошин, 1953]
Братская ГЭС	Траппы	30	[Бондарик, 1959]
	Песчаники и алев-ролиты	30	[Тиздель, 1963]
Усть-Илимская ГЭС	Траппы	30	[Чернышев, 1965]
	Песчаники и алев-ролиты	50	[Чернышев, 1979]
Красноярская ГЭС	Граниты	25	[Конярова, Нейштадт, 1963]

венных трещин. Очень важно, что они, как и естественные трещины, развиваются унаследованно, т.е. растут по подготовленным плоскостям. Видимо, благодаря избирательности процессов разгрузки и выветривания, приуроченности их к уже существующим трещинам извлеченные из массива блоки породы, не имеющие трещин в момент добычи, затем долгое время сохраняют монолитность. Общеизвестен, например, факт длительного существования монолитных каменных блоков в качестве деталей архитектурных сооружений, постаментов.

Выветривание сильно изменяет решетку трещин в горной породе (рис. 20). Оно ведет к расширению существующих трещин, к сгущению их в существующих системах и к образованию новых трещин выветривания, часто многочисленных, своеобразной ориентировки. Выветривание, так же как и разгрузка, развивается по решетке существующих трещин [Коломенский, 1952], т.е. избирательно, унаследованно. В ходе выветривания нарастает неоднородность массива. С одной стороны, в зоне выветривания имеются очень широкие трещины (см. рис. 9), заполненные глинистыми продуктами выветривания, с другой рядом находятся почти

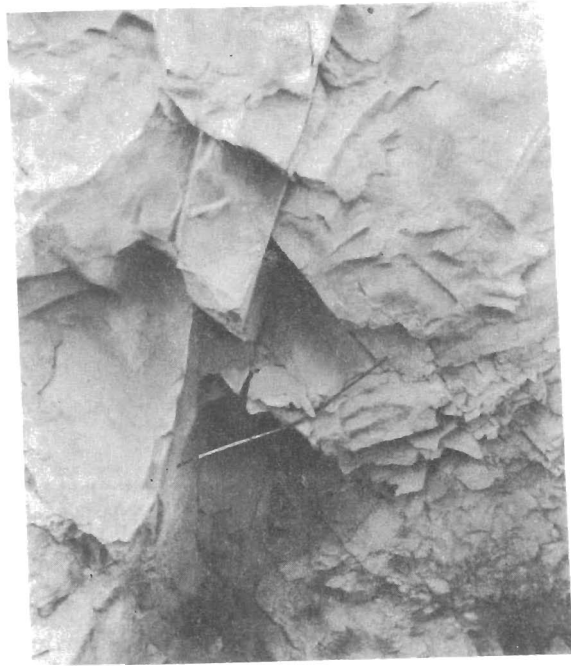


Р и с. 20. Трещиноватость в зоне выветривания базальтов, высота обнажения 8 м. Долина р. Орхона (МНР)

не затронутые выветриванием блоки породы, которые не были разбиты первичными и тектоническими трещинами, и поэтому не разрушены в ходе разгрузки и выветривания. Процесс выветривания распространяется от поверхности земли по крупным трещинам, от них в стороны по более мелким и т.д. В результате трещины выветривания образуют решетку из элементов нескольких порядков, в срезе подобную гидрографической сети, только с разрывами.

Анализ изменений пород в зоне выветривания позволил Н.В. Коломенскому [1952] и Г.С. Золотареву [1962] выделить четыре горизонта, или зоны: 1) монолитную, 2) глыбовую, 3) мелкообломочную, 4) тонкого дробления. Сейчас можно говорить, что это расчленение принято в нашей стране. Аналогичным четырехчленным делением зоны выветривания пользуются за рубежом [Ruxton, 1957; Richey, 1963; и др.]. Основными чертами трещин выветривания, вновь образованных и развивающихся из ранее существовавших трещин, можно считать: 1) местонахождение вблизи поверхности земли; 2) выветривание заполнителя и стенок; 3) небольшую протяженность; 4) разнообразие ориентировки. Два последних признака отличают трещины выветривания от трещин разгрузки.

Трещины взрыва, как и другие гипергенные трещины, развиваются преимущественно наследуя поверхности ослабления, уже существующие в массиве. После взрыва в массиве горных пород обычно расширяются и сгущаются трещины в существующих системах. Даже при разрушении массива, если породы обладают достаточной прочностью, в результате взрыва оживляются преимущественно трещины, существовавшие в массиве ранее [Количко, 1966]. Только в зоне, непосредственно прилегающей к заряду, происходит дробление породы без учета существующей в ней решетки трещин (рис. 21). При взрывах линейных зарядов в скважинах системы естественных трещин экранируют массив от влияния взрывов.



Р и с. 21. Трещины взрыва (сгущаются к местам закладки ВВ) и оживленные взрывом тектонические трещины скалывания (прямолинейные) в известняках нижнего мела в долине р. Кара-Койсу, высота обнажения 3,5 м

Инженерно-геологическое значение взрывных трещин может быть весьма существенным. Так, по данным Ф. Маковека [Masovec, 1962], при производстве взрывных работ в котловане ГЭС Ибс-Перзенберг на р. Дунае водопроницаемость увеличилась в 1,8–3,5 раза по сравнению с данными изысканий, в зоне мощностью 2 м, а местами до 5 м.

Заканчивая рассмотрение гипергенной трещиноватости, остановимся на общих особенностях гипергенных трещин. При гипергенных воздействиях на массив в первую очередь изменяется ширина трещин, затем преобразуется заполнитель трещин и выветриваются породы в стенках, а следовательно, изменяется шероховатость стенок. Дальнейшие изменения приводят к росту густоты трещин в существующих системах. Наконец, изменяется ориентировка трещин, которая наиболее устойчива при гипергенезе из всех названных параметров трещин. Это означает, что трещины в зоне гипергенеза появляются преимущественно в системах, уже существовавших ранее. Новые системы или бессистемная трещиноватость возникают локально при интенсивном выветривании или взрыве.

Другая установленная существенная особенность гипергенной трещиноватости — рост дисперсии ширины трещин, а также других параметров трещиноватости [Чернышев, 1965]. Эта особенность гипергенных трещин важна при планировании опробования [Аронова, Чернышев, 1967]

§ 2.5. Симметрия сетей трещин в зависимости от генезиса

Приведенное краткое описание генетических типов сетей трещин завершим описанием главнейших морфологических структурных особенностей сетей трещин различного генезиса.

Наиболее общие закономерности взаимного расположения трещин в сетях могут быть описаны с помощью учения о симметрии. Рассмотрев симметрию сетей трещин, мы выделили четыре класса (см. табл. 1). Ранее эмпирически были выделены три из этих классов [Рац, Чернышев, 1970]. Известно, что трещины при разрушении сплошной среды и горной породы [Гзовский, 1960] располагаются симметрично относительно осей главных нормальных напряжений. Пара систем сколовых трещин зеркально симметрична относительно оси минимального главного нормального напряжения. Названные системы трещин пересекаются по оси промежуточного по величине главного нормального напряжения (σ_2). Трещины отрыва располагаются перпендикулярно и параллельно оси максимального главного нормального напряжения: трещины скола и отрыва исчерпывают без остатка все множество трещин в горных породах. Сети, состоящие из этих трещин, отражая симметрию тензора напряжений, симметричны.

В каких объемах массива и с какой точностью соблюдается симметрия? Постоянство напряжений в период роста трещин определенной генерации сохраняется в пределах отдельных участков массива, которые, как правило, литологически однородны и структурно обособлены. В пределах таких участков сеть трещин обладает определенной группой симметрии. Случайная неоднородность массива в пределах участка приводит к флуктуациям напряжений, хрупкому разрушению и, как следствие, к статистическому выражению симметрии.

Каждая генерация трещин в массиве представляет собой согласно утвердившимся в механике и тектонофизике воззрениям запись поля напряжений, существовавших в момент возникновения трещин. Смена полей напряжений приводит к возникновению новых генераций трещин. Каждая генерация трещин, взятая в отдельности, обладает своей группой симметрии. При последовательном наложении генераций их диссимметрии складываются¹ в соответствии с принципом, открытым П. Кюри. При этом группа симметрии сокращается, в сети остаются все меньше автоморфизмов — преобразований жесткой сети, переводящих ее в себя самое. Усложняясь, сеть теряет симметрию.

Вследствие флуктуации напряжений и сложения последовательных генераций трещин симметрия сетей значительно сложнее, чем в схеме образования трещин отрыва и скола. Дополнительно сокращается группа симметрии при деформациях массива после трещинообразования.

Главнейшие генетические типы трещин, рассмотренные ранее, являются следами определенных типов напряжений. Проанализируем последовательно эти типы напряжений и возникающие сети трещин в предположении, что перед образованием новой генерации трещин все предыдущие заличиваются. Рассмотрим критические напряжения в физической точке сплошного массива в момент образования трещин.

¹ Изменение группы симметрии происходит без сложения диссимметрий, если перед возникновением новой генерации предыдущие полностью заличиваются.

На первой стадии существования породы, при литогенезе, возникают растягивающие напряжения, направленные во все стороны от рассматриваемой точки с одинаковой интенсивностью, что в изотропной породе создает шаровой тензор напряжений. Обычно стяжение (растяжение породы) комбинируется с гравитационным давлением. В чистом виде стяжение реализуется редко, когда вес ничтожен в сравнении с силами стяжения. Известны реализации шарового тензора напряжений в скорлуповатой отдельности шаровых лав и конкреций (см. рис. 4). Подобная сфероидальная отдельность возникает при выветривании некоторых изотропных пород: алевролитов, гранитов и других, когда в блоке породы возникают радиально направленные напряжения сжатия—растяжения.

Сложение сил стяжения и гравитации приводит к неравенству главных нормальных напряжений. Растяжение в вертикальном направлении компенсируется сжатием. Дисимметрии напряжений складываются. Остаются общая для напряжений полярная вертикальная ось симметрии и бесконечное множество горизонтальных неполярных осей симметрии. Параллельно и перпендикулярно осям растут трещины отрыва. Образующиеся симметричные (в статистическом смысле) полигональные столбы отдельности фиксируют положение вертикальной оси симметрии напряжений. В слоистом осадке при многочисленности границ возникает плитчатая отдельность, также полигональная в плане.

Второй тип сетей трещин более распространен. Практическое значение полигональные сети трещин имеют преимущественно в базальтовых эффузивах. Полигональная отдельность формируется в изотропном и трансверсально изотропном массиве, когда ось анизотропии совпадает с вертикальной осью главных нормальных напряжений. В большинстве случаев это выполняется, так как при литогенезе анизотропия, как и напряжение, регулируется гравитацией.

Тектонические напряжения возникают в массиве вследствие направленного внешнего сжатия или реже, растяжения. Направления главных нормальных напряжений обычно не совпадают с осями анизотропии среды. Вследствие этого возникает неравенство всех трех главных нормальных напряжений. Эти оси становятся осями симметрии в формирующейся сети трещин. Образуются трещины отрыва, совпадающие с плоскостями декартовой системы координат, построенной на осях главных нормальных напряжений. Образуются также трещины скола по направлениям максимальных касательных напряжений.

Важно подчеркнуть, что в фиксированном структурном блоке массива при неизменном поле тектонических напряжений имеется конечное множество направлений, по которым растут трещины. Положение осей главных нормальных напряжений фиксируется как положение осей симметрии в решетке трещин.

Счетное множество направлений реализуется соответствующим количеством систем трещин. Таким образом возникает третий тип сетей трещин — системная сеть. Если при тектонических деформациях ось максимального главного нормального напряжения совпадает с осью анизотропии трансверсально изотропной среды, то возникает полигональная сеть тектонических трещин, что наблюдается в диагирах ("черепаховая структура").

По времени образования в массиве за тектоническими трещинами сле-

дуют гипергенные. Рассмотрим их образование в точке анизотропного массива. У поверхности земли тензор напряжений перестраивается под влиянием разгрузки. Это обычно приводит к возникновению неравенства главных нормальных напряжений. Не останавливаясь на характерном расположении осей напряжений, подчеркнем, что по симметрии напряжений и возникающих трещин создается картина, полностью аналогичная картине тектонических напряжений: возникает системная сеть трещин бортового отпора. Гравитационное напряжение в отседающем анизотропном блоке приводит также к неравенству главных нормальных напряжений и к возникновению систем трещин. Таким образом, гипергенные изменения поля напряжений не приводят к формированию нового типа сети трещин, отличного от трех ранее названных.

До сих пор мы рассматривали формирование сетей трещин в сплошной среде, где трещины предыдущих генераций залечены, или столь многочисленны и мелки, что не препятствуют принятию модели сплошной среды. Фактически многие трещины сохраняются в массиве длительное время. Последовательно возникающие генерации накладываются одна на другую. При суммировании сетей их дисимметрии складываются. После нескольких сложений сеть теряет все элементы симметрии, становится асимметричной или хаотической. Так возникает четвертый тип сетей трещин.

Группа симметрии сети трещин может изменяться не только за счет разрушения блоков при последовательном наложении новых генераций трещин, но и при пластическом деформировании, например, на складках или в подвижном расплаве с трещинами. Деформации сокращают количество автоморфизмов и приближают сеть трещин к асимметричной.

Рассмотренные в историческом порядке типы напряжений, которые вызывают разрушение материала, составляют полный набор возможных сочетаний главных нормальных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 . Соответственно, образованные этими напряжениями сети трещин представляют все возможные в природе типы сетей трещин.

Генетические аспекты формирования сетей с разной степенью прерывистости менее ясны. Первичные сети, как правило, развиваются до полного соединения трещин. Однако на стадии катагенеза эти трещины частично или полностью залечиваются. В магматических породах залечивание трещин связано с пневматолитовым или гидротермальным процессами. Сети тектонических трещин, как правило, не приводят к полному расчленению массива на блоки. Они относятся к разорванным, а чаще к прерывистым. Только сеть приразрывных тектонических трещин часто имеет непрерывный характер. При гипергенных изменениях, как отмечалось, редко меняется ориентировка трещин и симметрия сети. Но прерывистость сети обычно коренным образом изменяется. Любые сети при гипергенезе становятся непрерывными. Для практических целей мы совместили классификацию сетей трещин по симметрии и прерывистости [Чернышев, 1979]. Сфероидальные сети трещин как редкие и не имеющие значения в классификацию не включены. Классификация (рис. 22) рассматривалась на совещании по инженерной геологии скальных массивов в ПНИИИСе в 1976 г. Она была распространена в форме анкеты среди участников — преимущественно инженеров-геологов и горных инженеров — с просьбой указать, как часто в практике встречаются показанные

	Системная	Полигональная	Хаотическая
Непрерывная			
Прерывистая			
Разорванная			

Р и с. 22. Сводная геометрическая классификация трещиноватости для прикладных целей

в классификации типы сетей трещин. Обработка анкеты позволила построить следующий ранжированный ряд классов.

Сети	
I системная непрерывная	IV хаотическая прерывистая
II системная прерывистая	V системная разорванная
III хаотическая непрерывная	VI полигональная прерывистая
	полигональная разорванная
	хаотическая разорванная

Таким образом, чаще всего встречаются системные сети, реже полигональные и хаотические. В некоторых инженерных задачах преобладают те или иные не самые распространенные сети трещин. Так, в инженерно-геологической практике при промышленном, гражданском и дорожном строительстве чаще всего встречаются непрерывные хаотические и непрерывные системные сети, характерные для зоны гипергенеза. При подземном и гидротехническом строительстве и разработке рудных и угольных месторождений в сферу инженерного воздействия вовлекаются более глубокие горизонты. Здесь чаще встречаются прерывистые, преимущественно системные и хаотические сети трещин, характерные для неветрелых пород с тектонической и первичной трещиноватостью. Разорванные сети трещин в природе встречаются сравнительно редко. Они характерны для молодых литифицированных, но не подвергавшихся значительным тектоническим напряжениям горных пород и для внутренних частей батолитов.

Приведенная геометрическая классификация сетей трещин обобщает геолого-генетические представления о трещиноватости. Она служит точкой соприкосновения геолого-генетического и механико-математического подхода к изучению трещиноватости. В абстрактной форме отражая при-

родные особенности сетей трещин, она служит базой для решения инженерных задач методами механики.

Практически каждый из выделенных классов трещин требует своеобразного подхода как при полевом исследовании, так и при построении расчетной модели сети трещин и инженерных расчетах. Например, при оценке прочности массива с системной непрерывной сетью трещин можно не учитывать прочность породы в блоке, что значительно облегчает задачу расчета. К той же сети применима тензорная теория проницаемости. К системной прерывистой сети тензорная теория проницаемости может быть применена только с поправками. При расчете прочности массива с такой же сетью необходимо учитывать дополнительный фактор — прочность породы в целиках.

§ 2.6. Кливаж

Кливаж — это совокупность очень частых примерно параллельных поверхностей, по которым порода делится на тонкие плитки и чешуйки. Кливажные поверхности, как правило, проявляются при выветривании или раскалывании породы, поэтому часто кливажом называют делимость породы по определенному направлению. По формальным морфологическим признакам кливаж не отличается от трещин, точнее от микротрещин (см. § 1.1). С позиций механики горных пород, которая рассматривает породы как материал, кливаж представляет собой такие же поверхности ослабления в массиве, как трещины или границы слоев, отличаясь малыми размерами отдельных дефектов. Однако облик этого явления, его связь с минеральным составом, структурой и текстурой породы дают повод геологам выделять кливаж как особую структурную форму.

Принято различать кливаж течения и разлома [Белоусов, 1962; Материалы по тектонической терминологии, 1964]. **Кливаж течения** проявляется в способности породы раскалываться вдоль параллельных поверхностей, проходящих вдоль длинных осей вытянутых минеральных зерен, как по контактам зерен, так и по поверхностям спайности. Кливаж течения характерен для пород, содержащих глинистые минералы, слюды, хлорит, роговую обманку, т.е. минералы с совершенной и весьма совершенной спайностью по одному из направлений. Возникновение этого типа кливажа связывают с течением кристаллического материала горной породы в условиях высоких давлений. При этом кристаллы поворачиваются длинными осями по направлению потока. О перемещении материала свидетельствует не только переориентировка пластинчатых минералов, но и деформация оолитов и остатков фауны, которые описаны Е. Клоосом, А. Ветштейном и А. Геймом [Белоусов, 1962].

Кливаж течения возникает при сжатии и располагается по направлению, перпендикулярному максимальному сжимающему усилию. Это подтверждено лабораторными экспериментами А. Добре на образцах глин и металлов. Эксперименты И.В. Кирилловой и Е.И. Чертковой [Белоусов, 1962] на воске, парафине, стеарине, озокерите подтвердили гипотезу о переориентации кристаллов при раздавливании и совпадении кливажных поверхностей с положением длинных осей кристаллов. Д. Максвелл и Н.А. Розанова [Белоусов, 1962] прямыми наблюдениями кливажа в толще переслаивающихся песчаников и сланцев показали, что при течении песчаный

материал затягивался в глинистый по поверхностям кливажа. Таким образом, разнообразные факты свидетельствуют о связи кливажа с течением материала. По происхождению кливаж течения, видимо, нельзя назвать трещинами, поскольку трещины — результат хрупкого разрушения породы.

Кливаж раскола или разлома отличается от кливажа течения тем, что: 1) направление поверхностей ослабления в породе не совпадает с ориентировкой минеральных зерен и не зависит от структуры или текстуры породы; 2) поверхности ослабления более четко локализованы, тогда как вдоль кливажа течения породы раскрываются почти в любой точке. Кливаж разлома по форме и расположению поверхностей ослабления и способу пересечения минеральных зерен ближе к трещинам, чем кливаж течения. Г.Д. Аджирей, М.П. Биллингс и другие называют этот тип кливажа мелкими частыми трещинами [Материалы по тектонической терминологии, 1964]. Сходство между трещинами и кливажом раскола подчеркивается в английских наименованиях этого кливажа: fracture cleavage или near fracture.

Однако частота кливажа разлома так велика, что без микроскопического анализа его трудно отличить от кливажа течения. Кливажные поверхности следуют параллельно через 0,1–2,0 см. Некоторые минеральные зерна, находящиеся на поверхности ослабления, поворачиваются осями вдоль плоскости кливажа. Между кливажными поверхностями этого не происходит. Кливаж раскола связан с кливажом течения так, что поверхности кливажа течения в пластической породе при переходе в соседний более жесткий слой приобретают черты кливажа раскола. Вообще, кливаж течения сменяет кливаж раскола как при повышении давления, так и при повышении пластичности материала. Все это, несмотря на различия, объединяет два основных генетических типа кливажа.

Кливаж не является обязательным следствием течения горной породы. Возможно течение каменной соли, мрамора и даже гнейса без образования кливажа. Наиболее часто кливаж встречается в глинистых породах и каменных углях, реже в глинистых известняках и мергелях, еще реже в глинистых и известковистых песчаниках. Существенно, что в той же последовательности убывает степень изменения мощности слоев под влиянием выдавливания материала с крыльев в замок складки. Это подчеркивает связь кливажа с пластическим течением пород.

Кливаж описан исключительно в складчатых толщах. По отношению со слоистостью и положением осевой поверхности складки выделяются несколько геометрических типов кливажа.

1. Главный кливаж течения, параллельный осевой поверхности складки. Он нередко переходит с одной складки на другую, сохраняя ориентировку, а на периклинальных замыканиях складок сечет слои не по простиранию.

2. Поперечный кливаж развивается в плоскости, перпендикулярной оси складки.

3. Веерообразный прямой кливаж представляет собой множество поверхностей, сходящихся под синклиналью или над антиклиналью; веерообразный обратный кливаж — множество поверхностей, сходящихся над синклиналью или под антиклиналью.

4. Слоевой кливаж параллелен поверхности слоя и связан со скольжением слоев по поверхностям напластования в процессе изгиба складок.

5. S-образный кливаж представляет собой изогнутые поверхности, часто имеющие в поперечном сечении форму знака интегрирования. Такая форма кливажа возникает либо в слоях с постепенно изменяющимся от кровли к подошве составом, либо при деформации слоя после образования кливажных поверхностей типа 1–3. Деформация чаще всего связана с разностью скоростей скольжения кровли и подошвы пластичного слоя, зажатого между жесткими слоями. Выделяются и другие, реже встречающиеся формы кливажа. Например, А.Е. Михайлов [1956] выделяет приразрывный кливаж, который локально развит вдоль плоскости разрыва параллельно сместителю.

В большинстве случаев кливаж пересекает поверхности напластования. М.А. Гончаров, изучавший кливаж в терригенных породах верхнего девона на Урале, установил, что угол между кливажом и слоистостью и густота кливажных поверхностей зависят от зернового состава породы [1963]. С уменьшением среднего размера зерен в породе угол между кливажом и слоистостью также уменьшается, а частота кливажа увеличивается.

Следует отметить, что кливаж по происхождению связан как с хрупким разрушением (кливаж раскола), так и с пластическим течением минеральных зерен, поэтому с генетических позиций его нельзя полностью ассоциировать с трещинами.

Следует признать, в соответствии с физической теорией трещин, что трещины — это полости, возникшие при хрупком разрушении. Кливаж как поверхности ослабления, развивающиеся по поверхностям удлиненных зерен и плоскостям спайности, близок генетически к сланцеватости. Учитывая двойственную природу кливажа и полную заменяемость этого термина двумя другими (сланцеватость и трещиноватость) Л.И. Лукин, И.П. Кушнарв [1960] и Ю.А. Косыгин [1958] считают, что термин "кливаж" может быть исключен из употребления в геологии. Такая практика уже сложилась в инженерной геологии. В инженерно-геологических расчетах кливажные поверхности неотличимы от микротрещин. Они создают анизотропию прочностных, деформационных и фильтрационных свойств породы и изучаются под видом сланцеватости или трещиноватости. Считая такой подход целесообразным, мы далее не используем термин "кливаж".

Глава 3

РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН И ИХ СЕТЕЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

§ 3.1. Унаследованное развитие тектонических структур

В геологии известны теории развития отдельных генетических типов трещин и сетей трещин, например теории образования контракционных трещин батолитов Г. Клооса, образования тектонических трещин и разрывов [Белоусов, 1952, Гзовский, 1960, 1975], образования морозобойных трещин [Достовалов, 1959], трещин выветривания и др. Все они рассматривают какие-либо специфические условия образования трещин, выявляют особенности формирования отдельных генетических типов трещин и различия между ними. На раздельное изучение генетических

типов трещин геологов нацеливают задачи рудной геологии и тектоники. Возраст и генезис трещин может служить важным признаком при поиске и разведке полезных ископаемых. Раздельное изучение трещин необходимо для расшифровки истории тектонических деформаций.

Между тем сеть трещин представляет собой единство трещин разного возраста и происхождения. Многие трещины периодически оживают на различных этапах геологической истории массива. Их трудно отнести к какому-либо одному генетическому типу. Поэтому интересно построить общую теорию развития сетей трещин в горных породах. В такой теории, видимо, особенно нуждается инженерная геология, в рамках которой изучаются все без исключения трещины. В данной главе предпринята попытка выявить наиболее общие закономерности строения и развития сетей трещин в горных породах, которые были бы равно свойственны как тектоническим, так и другим сетям трещин.

Наиболее общие закономерности трещиноватости горных пород, свойственные различным генетическим типам, удастся выявить и объяснить на основе принципа унаследованного развития геологических структур, известного в геотектонике.

Принцип унаследованности, разработанный московской школой геологов, по существу, представляет собой основной закон развития геологических структур. Согласно А.В. Пейве: "Структурообразование представляет собой поступательно развивающийся процесс, складывающийся из двух противоположных начал: унаследования и новообразования структур. В этом состоит сущность принципа унаследованности" [1965, с. 30]. Впервые принцип унаследованности использовал при построении теории орогенеза Э. Зюсс. Д.И. Мушкетов с 1910 г. многократно подчеркивал закон постоянства плана складчатости. А.Л. Яншин [1951 и др.] использовал принцип унаследованности для исследования погребенных складчатых структур.

Унаследованность в развитии крупнейших элементов в строении земной коры прослеживается на протяжении всей истории Земли. А.В. Пейве, исследуя глубинные разломы, установил: "Линейность и во многих случаях прямолинейность геоморфологических и структурных элементов, связанная разломам земной коры, для архейских и раннепротерозойских периодов развития Земли была не столь характерна, как для всех последующих эпох" [1956, с. 12]. Линейность возникла как следствие устойчивости структурного плана главнейших деформаций на протяжении всего фанерозоя. Многочисленные и разнообразные древние разломы земной коры известны в различных частях СССР и за рубежом. А.Л. Яншин установил унаследованное развитие складок в чехле молодых платформ [1951]. Унаследованные складки продолжают развиваться после консолидации фундамента эпикалендонских и эпигерцинских платформ на протяжении 120-200 млн. лет. Унаследование или преемственность в развитии выражается в сохранении плана деформаций, ориентировки структур, наконец, в полном совпадении осей и формы складок в чехле и фундаменте платформы.

В более общем плане "унаследованность — это преимущественное развитие всяких крупных структур в ущерб структурам более мелким, которые не наследуются" [Яншин, 1951, с. 276]. "Мелкие разломы в от-

личие от мелких складок характеризуются в ряде случаев более длительным унаследованным развитием" [Пейве, 1956, с. 14].

В литературе описано два варианта развития унаследованных структур. Первый из них установил Э. Зюсс. Он описал постумный механизм унаследованного развития. Молодая структура наследует план древней, но развиваться она начинает после отмирания древней структуры, т.е. тектоническое развитие возобновляется после перерыва по старому плану. Другой механизм непрерывного унаследованного развития описал А.Л. Яншин. Он показал, что унаследованные структуры в платформенном чехле развиваются непрерывно. Что складки не "умирают", а растут непрерывно, затухая во времени и вверх по геологическому разрезу. Это относится и к примерам, рассмотренным Э. Зюссом. Между тем постумный механизм унаследованного развития встречается в природе в других ситуациях и, в частности, при развитии трещин.

В противовес унаследованным элементам геологических структур развиваются наложенные структуры (термин Н.С. Шатского), которые не согласуются с планом предшествующего тектонического развития. Наложённые структуры представляют собой новообразование. Однако и в них прослеживаются иногда наиболее значительные элементы старых структур, подчеркивая единство унаследованности и новообразования в развитии структуры земной коры.

Вопрос об унаследованном развитии трещиноватости неоднократно поднимался в рудной геологии. Г.Л. Пospelов отмечал, что "системы трещин, вмещающих дайки и жилы, не возникают вновь, а происходит оживление, рост в длину и раскрытие трещин одной или нескольких систем" [Лукин, Кушнарв, Чернышев, 1955, с. 25], что имеются "унаследованные" трещины, которые повторяют направление существовавших ранее систем [Бородаевский, 1946]. Л.И. Лукин, И.П. Кушнарв и В.Ф. Чернышев [1955] подчеркивают повторяемость направлений разновозрастных трещин. По минерализации трещин в рудных телах авторы прослеживают несколько этапов в развитии одной и той же системы. Интересно, что на одних этапах трещины развивались как сколовые, на других как трещины отрыва. Менялись направления смещения по трещинам. Следовательно, трещина — сложное геологическое образование, которое для решения той или иной частной задачи можно отождествить то с моделью "трещина скола", то с моделью "трещина отрыва". Многочисленные примеры авторов подтверждают эту основную мысль, но в статье не рассмотрен механизм наследования и не указано, рост каких параметров трещин наблюдается при унаследованном развитии. Отмечается также, что наряду с повторяемостью направлений имеются более молодые системы, положение которых определяется анизотропией массива, связанной с более древними трещинами. В ряде случаев повторяемость не проявляется. Это, в частности, имеет место, когда прежняя трещиноватость уничтожена метаморфизмом, либо залечена

§ 3.2. Форма трещины и ее преобразование при тектонических движениях

Форма стенки трещины достаточно сложна и изменчива, но форма внутреннего пространства трещины, расположенного между стенками, сложнее. Она отражает одновременно форму обеих стенок. Шероховатость стенки принято характеризовать несколькими параметрами, измеряемыми относительно генерального направления трещины [Рекомендации..., 1980]. Эти параметры: угол наклона выступа, высота выступа, длина волны. Действительная форма выступов очень различна и, как говорилось, зависит от генезиса поверхности. В практических задачах выступы рассматриваются как треугольники или трапеции. По размерам треугольника различаются: меганеровности с длиной волны порядка десятка метров, мезонеровности длиной порядка метра, макронеровности длиной порядка дециметра и микронеровности длиной от нескольких миллиметров до первых сантиметров. На стенках длинных трещин обычно встречаются неровности всех уровней. Углы наклона выступов, по многочисленным измерениям С.Е. Могилевской, достигают максимально $40-60^\circ$ при средних значениях от 5 до 30° . Конечно, углы отдельных выступов достигают 90° , но они не характерны даже для ступеней на трещинах скалывания (рис. 1). В среднем более крутые и более высокие выступы отмечены в неоднородных и относительно прочных породах типа гранитов и гравелитов.

В ряде практических задач более целесообразно говорить о форме внутреннего пространства трещины. В реальной трещине расстояние между стенками непрерывно меняется. Колебания стенки трещины удобно рассматривать как случайную функцию по длине трещины. Выбрав начало отсчета в какой-то точке трещины и проведя ось абсцисс параллельно генеральному направлению трещины, можно рассмотреть сечение стенки как график стационарной случайной функции, обладающей эргодическим свойством. Вторая стенка дает другую реализацию той же случайной функции. Разность между значениями реализаций соответствует расстоянию между стенками, или раскрытию трещины. В задачах фильтрации интересна преимущественно величина этой разности, которая также является случайной функцией. В задачах о деформируемости и прочности важно знать, как часто эта разность достигает нуля. Рассмотрим ее простейшее свойство -- закон распределения в случайном сечении.

Обратимся к примеру. На фотографиях (рис. 23) хорошо виден разрез трещины. Она лишена извилистости, раскрытие ее заметно меняется в пределах от нуля до двух миллиметров. Измерив раскрытие трещины в 38 сечениях, с помощью вероятностной бумаги мы убедились (рис. 24), что распределение раскрытия по длине одиночной трещины практически не отличается от нормального. Отличия заметны лишь в области минимальных значений. Они невелики и могут быть объяснены ошибками измерения или случайностью. Однако возможно неслучайное расхождение фактического распределения с нормальным. Рассмотрим причины неслучайного расхождения, так как они проливают свет на реальную форму трещины и ее происхождение. Расстояние между стенками трещины, очевидно, не может быть отрицательной величиной. Между тем разность между значениями двух реализаций случайной функции при незначительном



Р и с. 23. Открытая трещина отрыва в граните основания Колымской ГЭС. Деления на линейке через 1 мм

смещении по математическому ожиданию, т.е. при незначительном раскрытии трещины, местами может принимать отрицательные значения. Принятая для этой разности модель нормального распределения, строго говоря, предназначена для случайных величин, не ограниченных ни сверху, ни снизу, и, следовательно, с некоторой отличной от нуля вероятностью допускает отрицательные значения случайной величины.

Параметры нормального распределения, установленные на реальной трещине, в нашем примере таковы, что вероятность отрицательных значений раскрытия равна $5-8\%$. Участки, где разность случайных функций, описывающих стенки трещины, принимает отрицательные значения, соответствуют участкам, где графики функций как бы перекрестываются. На рис. 24, а они заштрихованы. Физически это участки, где выступы стенок срезаны или раздавлены. Профиль стенки здесь отражает уже не тот процесс, который исследуется на протяжении более чем 90% трещины. В частности, как видно на кумулятивной кривой, дисперсия в результате механического сглаживания уменьшается, а раскрытие на сглаженных участках становится больше нуля, так как даже шлифованные плоскости соприкасаются только незначительной частью поверхности, что хорошо исследовано в теории машин и механизмов [Руппенейт, 1975]. Теоретические отрицательные значения раскрытия при отсутствии сглаживания показаны на пунктирном продолжении линии основного графика распределения.

Сглаженные участки составляют менее 10% в линейном сечении трещины. На площади стенки трещины они, следовательно, занимают менее одного процента. Это показывает, как близка модель щели, открытой для свободного движения воды по всему сечению, к реальной трещине, где участки смыкания составляют менее 1% от площади. Фактически соприкосновение стенок трещины, необходимое для передачи напряжений в массиве с од-

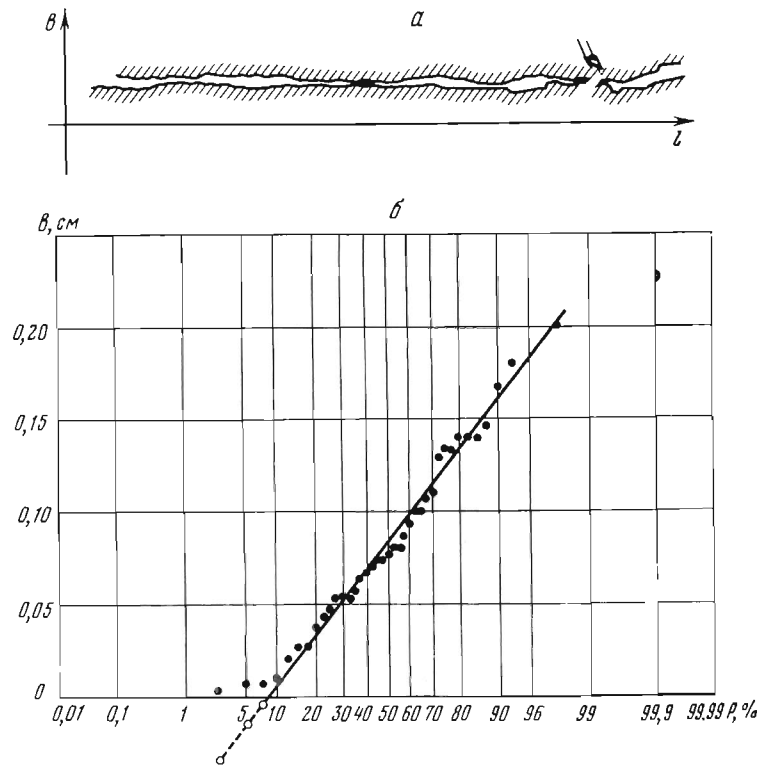


Рис. 24. Статистическое распределение ширины трещины
 а — зарисовка трещины по фотографии. б — кривая распределения ширины на вероятностной бумаге

ного блока на другой, имеет место на площади порядка десятых и сотых долей процента от общей площади трещины. По оценкам: З.В. Каякина и К.В. Руппeneйта [Руппeneйт, 1975], эта величина весьма устойчива для разных пород и равна 0,03%. Столь малая площадь смыкания трещин в массиве на глубине в первые десятки и сотни метров определяется высокой твердостью минералов, слагающих скальные породы [Юшкин, 1971]. Так, твердость кварца примерно 1000 кг/мм², что примерно на два порядка больше, чем временное сопротивление сжатию прочного кварцевого песчаника. Расчет показывает, что горизонтальная трещина с кварцевыми смекками при давлении на нее столба породы высотой около ста метров сомкнется за счет раздавливания стенок на площади около 0,025% от общей площади трещины. Для кальцита, обладающего, как известно, более низкой твердостью, соответствующая оценка площади контактов стенок равна 0,25%. Определение площади контактов через твердость минералов позволяет учесть напряжения в массиве и не требует трудоемких измерений, так как может быть основано на визуальной диагностике минералов в трещинах и табличных сведениях об их твердости.

Нормальный закон распределения раскрытия по длине трещины поз-

воляет выбрать в качестве наилучшей оценки средней ширины среднюю арифметическую. Сглаживание стенок трещины при сдвиге усложняет распределение ширины, делая его либо асимметричным логнормального типа, либо многовершинным.

§ 3.3 Статистическое описание системы трещин

Решение конкретных инженерных задач методами механики на основе геометрической модели решетки трещин возможно только при количественном, цифровом описании ее структуры. Цифровая характеристика может быть дана двумя принципиально разными способами: детерминированным и вероятностно-статистическим. Оба способа применяются в практике изысканий при изучении трещиноватости. Каждый из них обладает определенными преимуществами. Детерминированный способ описания сетей трещин позволяет наиболее точно характеризовать локальный участок массива, для которого устанавливаются параметры всех трещин, но не допускает экстраполяции и интерполяции в связи со значительной случайной изменчивостью сетей трещин. Вероятностно-статистический способ не дает точной характеристики ни для одного фрагмента, но приближенно характеризует значительные объемы массива. Этот последний способ благодаря достигаемому обобщению позволяет выявить общие закономерности строения сетей трещин, которые ранее не исследовались, а также использовать их для анализа генезиса сетей трещин и обоснования методики исследования трещиноватости. К рассмотрению этих закономерностей мы переходим.

При вероятностно-статистическом описании трещиноватости основным является вопрос о законах распределения параметров трещин как случайных величин. Анализ будем вести на уровне множества трещин, называемого системой. Прежде чем перейти к рассмотрению законов распределения, следует показать, что фактический материал не противоречит гипотезе о том, что параметры трещин — случайные величины. Из практики геологических исследований трещиноватости давно известно, что в ряду измерений каждое следующее значение непредсказуемо заранее по причине сильной изменчивости параметров трещин. Именно эта изменчивость уже на заре геологического исследования трещиноватости потребовала массовых измерений параметров трещин. Уже тогда параметры трещин фактически были признаны случайными величинами.

Не удовлетворяясь этими соображениями, автор выполнил проверку случайности расстояний между трещинами в рядах. Были применены критерий серии и критерий скачков (табл. 14), которые показали, что гипотеза о случайности не отвергается на высоком уровне значимости. Для однородных участков массива, где нет ярко выраженного тренда параметров трещин по пространству, была проверена также гипотеза о равномерном распределении для контракционных и тектонических трещин [Рац, Чернышев, 1970]. По результату более чем тысячи измерений эта гипотеза не отвергается. Следовательно, на участках, выделяемых на глаз в качестве однородных по трещиноватости, трещины действительно рассеяны случайным образом. Наконец, для тех же участков были рассчитаны нормированные автокорреляционные функции для последовательностей

Таблица 14

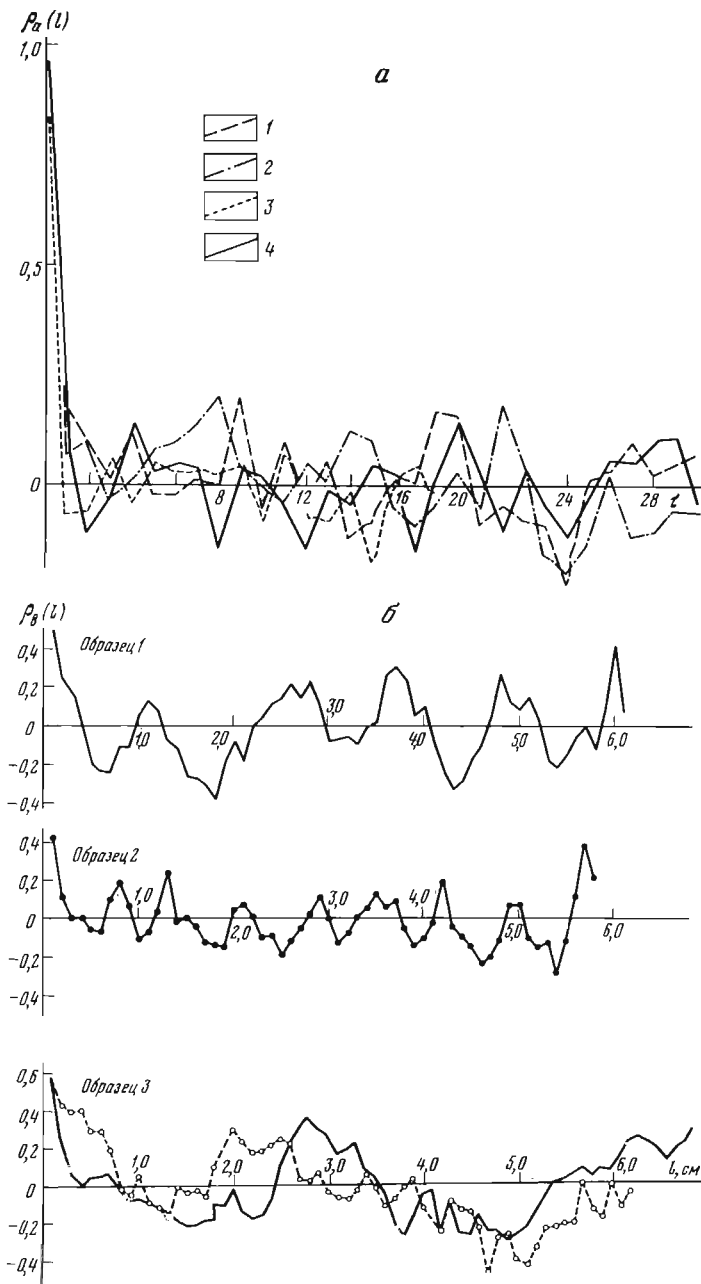
Проверка случайности расстояний между трещинами в непрерывных рядах

№ полевых точек	Местонахождение обнажения, возраст пород и генетический тип трещин	Количество измерений в ряду	Вероятность того, что фактический материал не противоречит гипотезе			
			по критерию числа серий	по критерию смены знака скачков		
127	Таджикская депрессия, песчаники и алевролиты нижнего мела, трещины складок	99	0,086	0,872		
		110	0,126	0,495		
		51	0,066	0,378		
		115	0,164	0,102		
		45	0,097	0,548		
		139	Там же, алевролиты	24	1,000	0,402
		24	0,679	0,735		
		17	0,181	0,682		
		23	0,139	0,139		
		84	0,796	0,728		
		84	0,273	0,728		
		154	0,705	0,897		
		121	0,051	0,943		
		36	1,000	0,590		
49	0,636	0,656				
35	0,387	0,682				
106	0,170	0,939				
14	0,175	1,000				
5064	Юго-западная часть	104	0,694	1,000		
5073	Тунгусской синеклизы,	198	0,118	0,142		
5065	траптовый силл,	124	0,470	0,353		
5034	триас, контракционные трещины	280	0,056	0,142		
5060		94	0,097	0,162		
5052		88	0,198	0,147		
Всего		2082				

расстояний между параллельными трещинами [Рац., Чернышев, 1970]. В каждом ряду содержалось от 120 до 300 членов. Значение нормированной автокорреляционной функции для рядов трещин (рис. 25) уже на первом шаге и далее статистически не отличается от нуля так же, как для последовательности случайных чисел. Таким образом, разносторонняя проверка показала, что расстояния между трещинами в системе можно рассматривать как случайные величины.

С представлением о случайном, взаимонезависимом расположении трещин в рядах согласуется представление о равномерном распределении трещин в объеме массива и на площади обнажения. Закономерность эта нарушается на участках систематического сгущения трещин, где действуют какие-либо наложенные процессы.

Гипотеза о равномерном расположении трещин была проверена на обнажении центральной части трапсового силла, залегающего в основании Усть-Илимской ГЭС. Был выбран вполне однородный по геолого-петрографическим признакам участок



Р и с. 25. Автокорреляционные функции последовательности расстояний между соседними трещинами *a* и ширины трещин *б*

1 — субгоризонтальные контракционные трещины в трапах Толстомысовской интрузии; 2 — приразрывные трещины в палеогеновых алевролитах Дагестана; 3 — трещины складок в силурийских песчаниках Ферганского хребта; 4 — последовательность случайных чисел [Рац, Чернышев, 1970]

траппового силла со сплошным картированием трещин в масштабе 1:50 на площади 40 м². Участок был разделен случайным образом сначала на 10 равных прямоугольников, а затем на 5. Для всех трещин одной системы, а именно системы горизонтальных трещин, параллельных кровле силла, найдены середины следов на площади обнажения. Таким образом, каждая трещина представлена в качестве точки на плоскости обнажения. Подсчитано количество точек, попадающих в каждый квадрат. Результаты проверки гипотезы о равномерном распределении центров следов трещин представлены ниже.

	Количество трещин					σ	χ^2	ν	P	L	$\chi^2_{0,05}$
Площадка 4 м ²	8	10	15	6	12	10,8	22,3	9	<0,01	108	14,68
	20	6	2	11	18						
Площадка 8 м ²	28	16	17	17	30	21,6	8,5	4	0,07	108	9,49

Как видно, гипотеза о равномерном распределении следов трещин по площади отвергается на 5%-ном уровне при детальном рассмотрении участка, когда он разбивается на 10 площадок. Гипотеза не отвергается на том же 5%-ном уровне при разбиении на 5 площадок. При детальном рассмотрении распределение плотности трещин приближается к Пуассонову закону, что вполне понятно со статистических позиций при случайном разбросе точек по квадратам.

Таким образом, распределение трещин на площади должно рассматриваться как равномерное или как неравномерное в зависимости от размера участка. Непосредственное значение этого факта для инженерной геологии заключается в том, что основание инженерного сооружения следует считать однородным или неоднородным в зависимости от размера сооружения. Так, в приведенном выше примере трещиноватость траппов может считаться однородной применительно к задаче проектирования плотины Усть-Илимской ГЭС (площадь порядка 100 X 1000 м). Откосы выемок в данных условиях в среднем также будут постоянны. Но при выполнении откосов и крепления их анкерами крутизна естественных откосов или плотность анкеров уже не будет строго постоянной, а будет изменяться в пределах десятиметровых участков.

Рассмотрим законы распределения параметров трещин. Эмпирическое решение этой задачи было, видимо, впервые предпринято применительно к ориентировке трещин в системе в 1962 г. Л.Д. Кнорингом [1962]. М.В. Рацем (1962) тогда же была высказана гипотеза о логарифмически нормальном распределении расстояний между трещинами в системе. Подробное исследование законов распределения параметров трещиноватости на обширном фактическом материале выполнено автором [Чернышев, 1966], а позже А.В. Количко [1968], М.И. Погребиским [1969], Н.Н. Богаченко [1971] и др.

В массивах, не претерпевших существенных деформаций после образования трещин, ориентировка тектонических трещин, группирующихся в систему, может быть аппроксимирована двумерным нормальным распределением [Кноринг, 1969; Количко, 1968]. Для первых трещин, не группирующихся в системы, распределение носит более сложный характер. В том распространенном случае, когда трещины — грани полигонов — в среднем вертикальны, вариации углов падения близки к нормальному распределению, а вариации азимутов падения к равномерному распределению от 0 до 360° [Чернышев, 1966]. Деформации массива приводят к переориентировке трещин и искажению характера распределения ориентировки. "Наблюдения показывают, — пишет Л.Д. Кноринг, — что влияние

Таблица 15

Распределение единичных трещин по азимутам

Номер сектора	Интервал азимутов, градусы	Количество трещин в интервале	Среднее количество векторов в секторе
1	0—36	15	11,4
2	36—72	11	11,4
3	72—108	10	11,4
4	108—144	13	11,4
5	144—180	16	11,4
6	180—216	10	11,4
7	216—252	13	11,4
8	252—288	10	11,4
9	288—324	9	11,4
10	324—360	9	11,4
	$\chi^2 = 3,72$	$\Sigma = 114$	$\Sigma = 114$

Таблица 16

Распределение единичных трещин по углам отклонения от математического ожидания θ

Номер кольцевой области	Интервал области, град	Количество трещин в интервале		Вероятность
		фактическое	теоретическое	
1	0 5	19	22,58	1,00000
2	5 10	63	65,09	0,80192
3	10- 15	13	10,64	0,23095
4	15- 20	15	12,27	0,13761
5	>20	4	3,42	0,02998
		$\Sigma = 114$	$\Sigma = 114$	
		$\chi^2 = 1,864$		

пластических деформаций проявляется как в нарушении характера распределения трещин, принадлежащих одной системе, так и в изменении ориентировки целых систем трещин" [1969, с. 80]. Нарушается в первую очередь симметричный характер распределения.

Известному распределению Гаусса соответствует круговое двумерное распределение Фишера. Л.Д. Кнорингом проверено соответствие реального распределения модельному распределению Фишера для системы трещин складок. Объем выборки — 114 трещин. Проверка (табл. 15, 16) показала удовлетворительное совпадение материала с гипотезой о нормальном (Фишера) распределении трещин по ориентировке в пределах системы.

Гипотеза не отвергается на 10%-ном уровне значимости. Следовательно, она может быть принята. Нормальный характер распределения трещин по ориентировке в пределах системы можно видеть на рис. 18. Круговая диаграмма построена по 200 измерениям ориентировки трещин в песча-

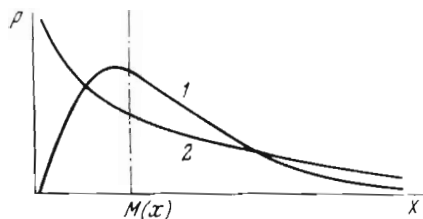


Рис. 26. Формы дифференциальных кривых логнормального (1) и экспоненциального (2) распределения вероятностей, характерных для длин трещин, расстояний между трещинами в системе и амплитуд относительного смещения стенок трещин

никах юрских угленосных отложений. Симметричный характер распределения и повышение плоскости к центру имеет место во всех системах трещин складки от I до IV.

Линейные параметры трещин: длины, расстояния между трещинами в системе, амплитуды относительного смещения стенок — взаимосвязаны между собой. Распределения их в большинстве случаев характеризуются ярко выраженной левой асимметрией. Фактические ряды наблюдений этих параметров неплохо согласуются с логарифмически нормальным

Таблица 17

Некоторые результаты проверки гипотезы о логнормальном распределении длин трещин и расстояний между трещинами в системе

№ рядов	Горная порода, место наблюдения	Генетический тип трещин, измеренный параметр	Объем выборки	Критерий Пирсона χ^2	P
1	Долериты (Т), Вост.-Сиб. платформа	Контракционные, a	56	1,90	0,58
2	То же	То же	163	5,43	0,49
3	Кварцевая жила, Зайлийский Алатау	Тектонические, l	99	3,49	0,62
4	Известняк (К), Таджикская депрессия	Тектонические, a	97	3,21	0,20
5	Песчаник (К), Таджикская депрессия	То же	80	2,56	0,47
6	То же	"	62	1,56	0,66
7	"	"	63	2,21	0,32
8	Суглинок (Q ₄), Монголия	Сейсмотектонические, a	192	2,4	0,50
9	То же	Сейсмотектонические, l	297	7,0	0,40
		Всего	1009		

Примечания. P — вероятность того, что в условиях соответствия фактического материала нулевой гипотезе расхождения могут превысить имеющиеся в данном ряду; при $P > 0,05$ нулевая гипотеза о логнормальном распределении не отвергается; a — расстояние между трещинами; l — длина трещин; 8,9 — данные работы [Погребиский, Чернышев, 1974]

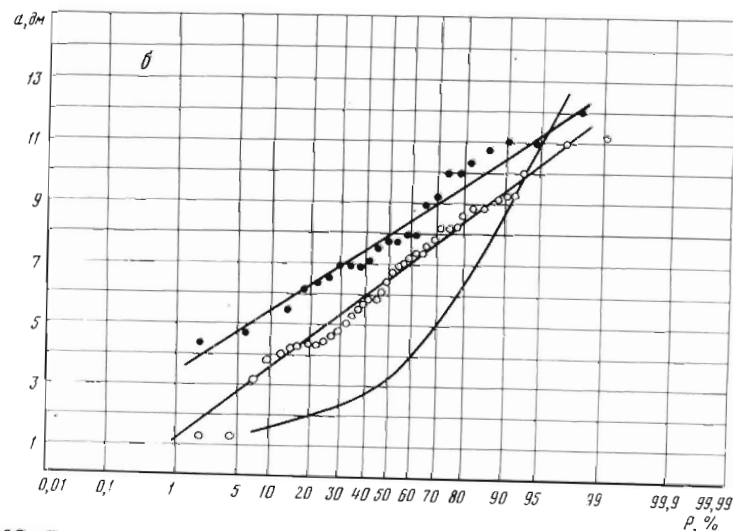
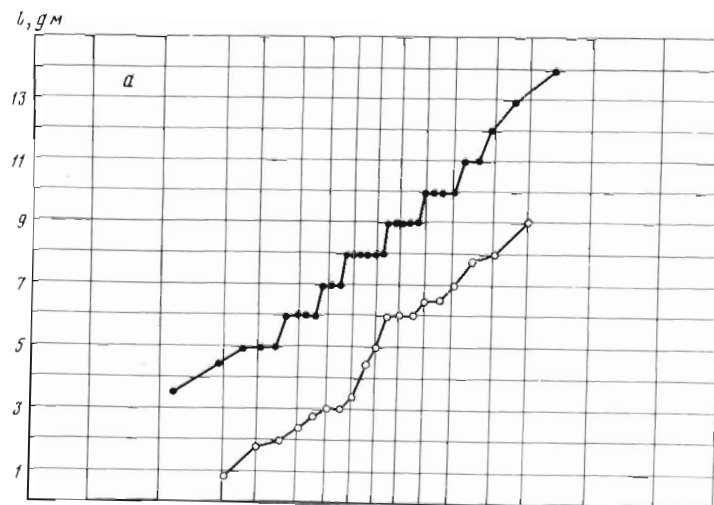


Рис. 27. Статистические распределения длин сторон полигонов (а) и поперечников полигонов (б); в сети литогенетических трещин, изображенной на рис. 10, б. Для сравнения сплошной линией показана кривая логнормального распределения расстояний между тектоническими трещинами

распределением [Рац, 1962; Чернышев, 1966; Количко, 1968; Погребиский, 1969], а также с экспоненциальным распределением [Батугин, 1966; Богаченко, 1971]. Сравнивая две модели (рис. 26), нетрудно заметить, что правые ветви распределений почти совпадают. Следовательно, распределение вероятностей встречи трещин в области значений выше среднего всеми авторами интерпретируется одинаково. Левые ветви кривых распределения различаются коренным образом.

Экспоненциальная кривая хорошо отражает известную природную

Таблица 18

Проверка гипотез о нормальном и логнормальном распределении ширины трещин в горных породах (Погребиский, Чернышев, 1974)

Местоположение участка, горные породы	Генетический тип трещин	Параметры выборки		
		Объем n , шт.	Среднее значение b , см	Стандартное отклонение, S_b , см
Р. Вахш, современный осадок	литогенетические	154	0,75	0,28
Колымская ГЭС, штольня № 100, 43–97 м, гранит	контракционные	165	0,14	0,07
Нурекская ГЭС им. Л.И. Брежнева, штольня № 129, 41–61 м, песчаники	складок	79	0,06	0,03
Там же, обн. 108, 109, известняки	складок в зоне гипергенеза	54 66 97	0,05 0,07 0,18	0,03 0,13 0,30
Могод-сомон, у сейсмодислокации, суглинки	приразрывные	239	25,2	16,3

Примечание. "+" — гипотеза не отвергается; "-" — отвергается.

Таблица 19

Распределение ширины видимых трещин в зоне гипергенеза

№ п/п	Местоположение участка, горная порода	Количество трещин, % шириной, мм			
		0,00–0,25	0,25–0,50	0,5–1,00	1,0–1,5
1	Усть-Илимская ГЭС, траповая интрузия, шт. № 1, 0–6 м	29,5	10,5	18,9	7,4
2	То же, 6–20 м	8,5	47,5	30,5	6,5
3	Нурекская ГЭС им. Л.И. Брежнева, песчаники и алевролиты, шт. 129, 0–24 м	60	21,8	14,1	2,3
4	То же, 24–41 м	14,8	46,3	32,5	6,3
5	То же, на обнажении длиной 130 м	48,6	15,6	21,4	6,9

особенность трещин, связанную с механизмом их роста, а именно наличие в породе роя микротрещин. В единичном объеме породы этих трещин всегда тем больше, чем меньше их длина и, соответственно, чем меньше расстояние между ними. В логнормальной модели игнорируется этот рой. Ряды полевых наблюдений неплохо согласуются с логнормальной моделью

Распределение					
нормальное			логнормальное		
χ^2	$\chi^2_{0,05}$	проверка гипотезы	χ^2	$\chi^2_{0,05}$	проверка гипотезы
3,95	9,48	+	212,7	7,82	–
4,73	7,82	+	–	–	–
1,47	7,82	+	73,9	9,48	–
3,40	7,82	+	34,0	9,48	–
40,35	12,39	–	7,76	12,59	+
33,8	12,59	–	10,69	12,59	+
86,3	9,5	–	8,4	11,1	+

Количество трещин, % шириной, мм										
1,5–2,0	2,0–3,0	3,0–4,0	4,0–5,0	5,0–6,0	6,0–7,0	7,0–8,0	8,0–9,0	9,0–10,0	10–15	15–20
13,7	6,3	1,1	5,3	1,0	0	2,1	0	1,1	1,0	2,1
6,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,9	0,3	0,3	0,3	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,1	2,0	0,5	0,3	0,1	0,3	0,2	0	0	0,1	0

только потому, что микротрещины находятся по своим размерам за пределами разрешающей способности человеческого глаза. С принятой системой измерения связано появление левой нисходящей ветви распределения. Это обстоятельство частичного, избирательного отражения природной сети трещин в логнормальной модели с позиций инженерных изысканий

не недостаток, а достоинство. Ультранеоднородность массива, к которой в данном случае относится микротрещиноватость, при изысканиях учитывается "автоматически" в ходе лабораторных определений свойств пород. Поэтому при составлении модели трещиноватости для пересчета свойств пород с образца на массив не нужно включать в модель трещины, целиком попадающие в образец. Необходимо пользоваться усеченным экспоненциальным, логарифмически нормальным или другим подобным распределением. Предпочтительна логнормальная модель, как наиболее удобная для работы и в большинстве случаев удовлетворительно согласующаяся с наблюдениями (табл. 17).

Случаи несоответствия фактических распределений линейных параметров трещин логнормальной модели характерны для литогенетической трещиноватости. Для периметров полигонов нормальное распределение было экспериментально установлено А.В. Думанским, А.Ю. Ишлинским в пятидесятых годах [Рац, Чернышев, 1970]. Можно предположить, что в данном случае нормальное распределение возникает в силу центральной предельной теоремы при суммировании длин сторон полигона для определения периметра. Однако это не так. Нормальное распределение, видимо, присуще самим элементарным отрезкам, образующим полигоны. На рис. 27, а показаны две кумулятивные кривые распределения длин сторон полигонов. Они в масштабе вероятностной бумаги мало отличаются от прямых линий, свидетельствуя о гауссовском типе распределения длин литогенетических трещин. Поперечники, т.е. расстояния между противоположными сторонами полигонов, также распределены нормально (рис. 27, б).

Ширина трещин — этот важнейший для гидрогеологических задач параметр сети трещин — долгое время оставалась в вероятностном смысле совершенно неизученной. Во-первых, для ее исследования требуются весьма точные измерения, возможность выполнения которых считалась проблематичной, и, во-вторых, она весьма подвержена изменениям в ходе гипергенеза и горных работ. Характер ее распределения был выявлен только после специального исследования точности измерения ширины трещин. Удалось показать, что распределение ширины первичных, литогенетических и контракционных трещин статистически не отличается от нормального (табл. 18).

Возможно, что и тектонические трещины складок в глубине массива имеют распределение, близкое к нормальному. Гипергенные и другие изменения сети трещин нарушают симметричность распределения ширины и приводят его к виду, в котором оно сходно с логнормальным. Такое преобразование распределения ширины в ходе гипергенеза отмечалось нами и ранее [Чернышев, 1965]. Приразрывные трещины уже в момент возникновения получают асимметричное распределение типа логнормального. Распределения ширины трещин для зоны гипергенеза приведены в табл. 19. Виден общий асимметричный характер распределения ширины трещин в зоне гипергенеза. Из попарного сравнения первой и второй строк, а также третьей и четвертой строк можно заметить уменьшение дисперсии и асимметрии по мере продвигания в глубь массива в зону сохраненных пород и не нарушенных гипергенезом сетей трещин.

Итак, статистический анализ параметров трещиноватости показал, что

они обладают значительной изменчивостью, которая носит случайный характер. Как случайные величины параметры трещин на начальных этапах развития (первичная трещиноватость) характеризуются распределениями, близкими к нормальному. В ходе развития сети распределения приобретают асимметрию. Для расстояний между трещинами, длин и раскрытий трещин, а также амплитуд смещения оказывается характерным левоасимметричное распределение, которое может быть аппроксимировано экспоненциальной или логнормальной кривой.

Попробуем выяснить физические причины различия распределений.

§ 3.4. Унаследованное развитие трещин и их систем

Рассмотрим развитие отдельной трещины и множества независимых трещин в условиях воздействия на массив различных геологических факторов. Эти факторы в физическом смысле всегда сводятся к потокам вещества или энергии. В ходе развития сети каждая или почти каждая трещина в какой-то мере удлиняется, расширяется, сближается с соседней, или наоборот, залечивается.

Изменение ширины трещин происходит, например, при карстовом процессе в его начальной стадии, когда полости еще можно рассматривать как трещины или щели с параллельными стенками. В работе [Золотарев, Калинин, Минервин, 1970] к таким трещинам применен термин "первичные, измененные выщелачиванием".

Опираясь на основополагающие понятия геохимической гидродинамики [Шестаков, 1961] и собственные эксперименты, покажем, что рост трещины ускоряется при движении через нее напорного потока жидкости, растворяющей стенки при сохранении постоянными градиента напора на концах трещины и концентрации раствора на входе в трещину.

Основное уравнение переноса вещества фильтрующимся потоком $u = vC - D \text{grad} C$. Общий расход растворенного вещества складывается из конвективного переноса $u_k = vC$ и диффузионного переноса $u_D = -D \text{grad} C$; v — скорость; C — концентрация; D — коэффициент диффузии, зависящий от скорости.

Растворение с поверхности фильтрующего канала по Н.Н. Веригину [1977]: $\partial N / \partial t = -\gamma(C_m - C)N$, где N — массовая концентрация вещества в твердой фазе. Количество вещества, уходящего в раствор, пропорционально разнице между концентрацией раствора C и концентрацией C_m . Оно пропорционально доле растворимого вещества в стенках трещины и константе растворения или кристаллизации γ .

Пусть по трещине конечной длины l и ширины b течет вода. Движение ее вызвано гидравлическим градиентом, который не меняется во время процесса. Движение воды ламинарное. Вода растворяет стенки в условиях конвективной диффузии. Опыт показывает [Ильин, Чернышев, 1976], что перемешивание потока в трещине даже при ламинарном движении происходит на весьма небольшом отрезке ее длины при $l = 10-15$ см ($b/l = 0,001$). Примем, что рост концентрации зависит только от длины трещины и не зависит от ширины. Для фиксированной длины l концентрация раствора за счет растворения стенок возрастает на ρ . Объемная масса

растворяемой породы γ_0 . Отыщем по этим данным зависимость ширины трещины от времени.

При растворении породы трещина расширяется. Стенки ее отходят от осевой плоскости. Скорость смещения стенки $db/dt = \Delta\rho q/\gamma_0 S$, S — площадь обеих стенок трещины; q — расход воды, пропускаемой трещиной: $q = C_1 b^3$; C_1 — постоянная, зависящая от градиента, плотности и вязкости жидкости.

В принятых начальных и граничных условиях площадь стенки трещины не меняется, разница концентрации на входе и выходе $\Delta\rho$ и объемная масса γ_0 остаются постоянными. Обозначим

$$\Delta\rho/\gamma_0 S = C_2; db/dt = C_1 C_2 b^3.$$

Известно, что первая производная выражает скорость процесса, описываемого в данном случае функцией $b(t)$. Как видно из последнего выражения, скорость расширения трещины при растворении в принятых условиях пропорциональна кубу ширины трещины. Следовательно, при наличии в массиве множества параллельных трещин, образующих систему, в рассматриваемых условиях рост трещин должен идти неравномерно: широкие трещины будут развиваться значительно быстрее тонких. Тонкие будут отставать в развитии. Интегрируя выражение для скорости, нетрудно найти, в какое время ширина трещины примет то или иное значение:

$$b = (C_b - C_t t)^{-1/2}, C_b \text{ и } C_t \text{ — постоянные интегрирования.}$$

Выражения для db/dt могут ориентировочно характеризовать процесс только для начальной стадии растворения, когда ширина увеличивается на порядок от исходной ширины тектонических трещин. При дальнейшем росте ширины трещин в ней в связи с увеличением скорости может возникнуть турбулентный режим потока. При турбулентном режиме $q = 4,7b(b^5 C)^{1/2}$. В этом случае скорость расширения трещины $db/dt = Cb^{3/2}$. Рост трещины в первый момент при переходе к турбулентному режиму замедляется. Однако скорость продолжает расти и вследствие увеличения ширины b достигает прежнего значения и продолжает увеличиваться. Поэтому замена в условиях задачи ламинарного режима турбулентным не изменит нашего вывода о преимущественном росте широких трещин.

Иногда возникает сомнение в том, что расширение трещин идет равномерно по всей длине. Кажется, что на входе в трещину растворение может протекать существенно быстрее, чем на выходе вследствие изменения концентрации по длине трещины. Однако роль этого фактора незначительна. Известно, что концентрация агрессивной углекислоты и ионов кальция в карстующихся массивах практически постоянна на протяжении нескольких километров. Рассматриваемые трещины имеют длину от нескольких метров до нескольких десятков метров. В пределах таких трещин состав подземных вод почти постоянен, а следовательно, постоянна скорость расширения трещины на всем ее протяжении. Высказывается мнение, что массоотдача и скорость расширения трещины уменьшаются по мере роста трещины. Однако в условиях кинетического режима эти изменения незначительны, а при диффузионном и диффузионно-кинетическом режимах коэффициент массоотдачи уменьшается пропорционально увеличению рас-

крытия трещины. В таком случае в принятые нами постоянные C_1 и C_2 необходимо ввести переменный множитель $1/b$. Расчетная скорость роста трещины уменьшится. Она будет пропорциональна не третьей, а только второй степени ширины трещины. Но и при этом скорость расширения широких трещин по-прежнему будет больше скорости расширения узких трещин.

Вряд ли следует рассматривать диффузионный механизм растворения применительно к трещинам с турбулентным потоком. Поэтому можно заключить, что в условиях различного режима потока и различного механизма растворения лидерство в расширении сохраняется за наиболее широкими трещинами. Этот вывод верен при сохранении поставленных нами граничных условий, т.е. при сохранении постоянного напорного градиента между концами рассматриваемой трещины и при сохранении напорного потока в трещине на протяжении всего процесса. Такие граничные условия сохраняются, как правило, в природных условиях при малой ширине трещин. Изменение граничных условий приводит к снижению расхода воды через трещину, к образованию свободной водной поверхности в трещине и в конечном счете к уменьшению скорости или полному прекращению роста трещин. Поэтому рассматриваемая модель роста трещин при всей громадной длительности геологического времени не может быть верна, если время стремится к бесконечности. Трещины бесконечной ширины не образуются из-за ограниченного расхода подземных вод.

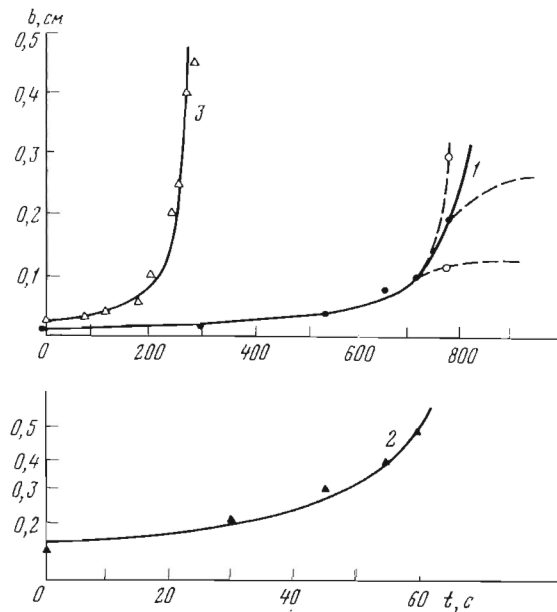
Чтобы проверить сказанное, зависимости $b(t)$ получены из опыта (рис. 28). В качестве среды с трещиной взят лед с температурой $-0,5^\circ\text{C}$, в качестве агрессивной жидкости — вода с температурой $+0,3^\circ\text{C}$. Градиент потока в течение опыта сохранялся постоянным $I = 1,0$, а расход увеличивался для поддержания градиента. Длина трещины в приборе 40 см, площадь трещины $552,6 \text{ см}^2$. Режим движения жидкости был преимущественно турбулентным. Температура окружающего воздуха $+1^\circ\text{C}$. Полученные кривые имеют форму ветви гиперболы. Конкретно экспериментальные кривые аппроксимированы уравнениями: 1) $t = 840 - 7,6/b^{1,2}$; 2) $t = 72,5 - 5,0/b^{1,3}$; 3) $t = 280 - 3,2/b^{1,2}$. Здесь, как и на графике (рис. 28), ширина трещины b , см, время t , с. Наблюдения прекращались при расщеплении потока на отдельные струи. Каждая струя локализовалась в отдельной трубе диаметром до 5–8 мм. Начальный момент развития труб показан на графике I . Здесь процесс идет уже при граничных условиях, отличных от условий нашей задачи.

Примем теперь иные условия. Пусть имеется конечное количество параллельных трещин с разной шириной $b_1; b_2 \dots b_n$ и равной длиной l . Через трещины проходит постоянный суммарный расход $\sum q_i = \text{const}$. Градиент потока во всех трещинах остается в течение всего опыта одинаковым, но зависящим от времени $I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$. Концентрация раствора на выходе, как и прежде, на $\Delta\rho$ больше, чем на входе. Как будет развиваться ширина трещин в этом случае?

Очевидно, и в этом случае широкие трещины будут развиваться быстрее тонких. Вследствие преимущественного роста широких трещин расход будет перераспределяться и с течением времени стремиться к сосредоточению в изначально наиболее широкой трещине. В пределе скорость расширения максимальной трещины установится постоянной и сохранится таковой, пока не будет изменен расход воды, подаваемой в рассматриваемую систему на ее границе.

Таким образом, преимущественный рост широких трещин сохраняется и при постоянном расходе потока.

Поток подземных вод может оказывать на стенки трещин не только химическое, но и механическое воздействие. При скорости потока v , превы-



Р и с. 28. Рост ширины трещины во времени под действием потока воды. Сплошной линией показано изменение средней ширины трещины, пунктиром — изменение ширины отдельных участков

шающей критическое значение v_k , приходит в движение рыхлый заполнитель трещины или материал породы в стенках трещины. Размыв стенок представляется маловероятным, когда речь идет о скальных породах. Однако в породах, слабо литифицированных, где имеются трещины, как и в скале, размыв с образованием полостей достаточно известен под названием суффозии. Рассмотрим единичную трещину фиксированной длины в напорном потоке, создающем неизменный градиент на концах трещины. Оценим скорость расширения трещины за счет размыва.

Известно, что скорость потока в трещине $v = C_1 b^2$. Механический перенос частиц грунта потоком начинается с критической скорости течения v_k . Критерий отсутствия суффозии в трещине $v_k > C_1 b^2$. Следовательно, суффозия не может развиваться в трещине шириной $b < (v_k/C_1)^{1/2}$. Расход воды, пропускаемой трещиной, и соответственно вынос частиц породы будут пропорциональны, как и в случае растворения, кубу ширины трещины.

Переходя к множеству независимых трещин со статистическим распределением ширины, можно заметить, что развитие этих трещин будет протекать почти так же, как развитие при карстовании. Отличие в том, что тонкие трещины $b < (v_k/C_1)^{1/2}$ не будут расширяться, тогда как при растворении они очень медленно, но растут. Критическая ширина трещины в реальных условиях несколько колеблется в зависимости от изменения градиента на концах трещины, случайной изменчивости породы в стенках

трещины и других факторов. Это еще более сближает картины карста и суффозии. Если в массиве до начала процесса существовало нормальное распределение ширины трещин, то в процессе суффозии оно преобразуется. В силу опережающего развития широких трещин вытягивается правая ветвь распределения. Оно становится левоасимметричным. Одновременно возрастают математическое ожидание и дисперсия ширины трещин.

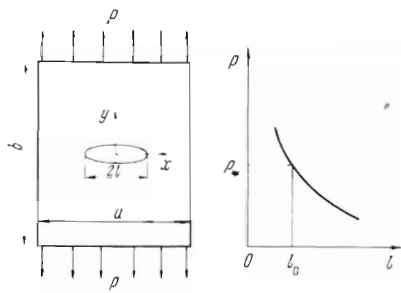
При обратном процессе время на залечивание трещины пропорционально ее начальному раскрытию [Гершлинг, Литов, Лопушняк, 1976]. Коэффициент пропорциональности зависит от коэффициента влагопереноса в породе блоков, начальной влажности породы, числового коэффициента, характеризующего изменение геометрических размеров трещины в результате протекания физико-химических процессов. Из установленной зависимости следует, что первыми среди множества трещин закроются тонкие. Это вызовет усиление левой асимметрии распределения при залечивании трещин.

Теперь рассмотрим рост трещины в условиях механического нагружения. Для этого можно воспользоваться классической теорией Гриффитса, который решил следующую задачу, ставшую основой современной теории хрупкого разрушения [Черепанов, 1974]. К хрупкой пластине длиной b и шириной a (рис. 29) приложена сила P . В пластине имеется сквозная трещина длиной $2l$. По условию $l \ll a$ и $l \ll b$. При увеличении растягивающей пластины силы с некоторого момента трещина начнет лавинообразно распространяться, если скорость освобождения энергии упругой деформации превзойдет прирост поверхностной энергии трещины. Установлена следующая зависимость между разрушающей растягивающей силой и длиной трещины $P = \lambda_1 (E\gamma/l)^{1/2}$; E — модуль Юнга; γ — поверхностная энергия единицы свободной поверхности; λ_1 — безразмерный множитель, зависящий от коэффициента Пуассона.

Согласно уравнению, рост трещины при растяжении не происходит, пока сила не достигнет критической величины P_* (рис. 29). После этого начинается быстрое развитие трещины и разрушение пластины. В предельном случае возможен медленный квазистатический рост трещины при сохранении равновесия между скоростью освобождения энергии упругой деформации и приростом поверхностной энергии трещины (см., например, [Ярема, Панасюк, Попович, 1978]).

Впоследствии исследование привели к распространению теории Гриффитса на случай квазихрупкого разрушения, когда материал проявляет пластические свойства. Существенно, что в механике хрупкого разрушения установлено следующее: для тела с трещиной длиной l , м, состоящего из материала с фиксированными константами типа E и γ , при постоянной температуре и постоянном составе окружающей материал агрессивной жидкой среды верно соотношение между длиной трещины l и растягивающей критической нагрузкой $\sigma_c = C/l^{1/2}$; σ_c — прочность на растяжение тела с трещиной; C — константы материала.

Принципиальный для рассматриваемого здесь вопроса результат в той же области исследования получил Г.П. Черепанов [1966]. Он рассмотрел задачу о развитии трещин в сжатых телах и установил связь длины тре-



Р и с. 29. Пластина с трещиной и зависимость критической растягивающей нагрузки от длины трещины (по Гриффитсу). P_* критическая растягивающая нагрузка при длине трещины l_0 .

щины с разрушающим напряжением для условий одноосного сжатия в виде

$$\sigma_+ = \frac{2}{(1 + \varphi^2)^{1/2} - \varphi} \left(C_T + \frac{\sqrt{2}L}{\pi\sqrt{G}} \right),$$

σ_+ — прочность на сжатие тела с трещиной; φ , C_T — угол трения и сцепление по поверхности трещины; L — сдвиговой модуль сцепления, характеризующий прочность материала на концах трещины.

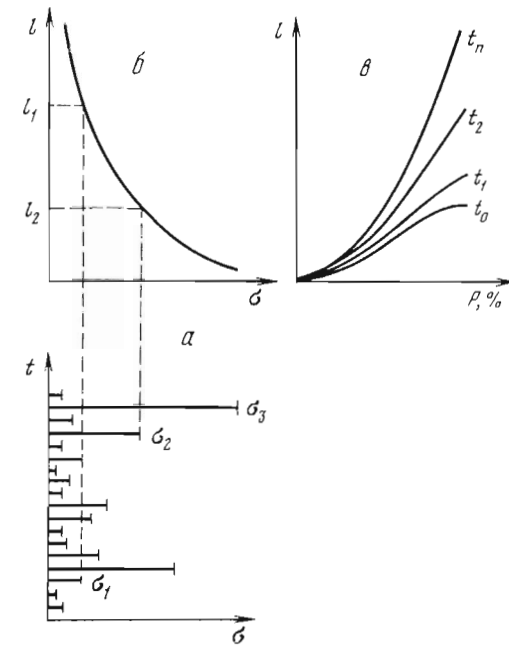
Как видно, и в условиях сжатия сохраняется принципиально та же нелинейная зависимость между длиной трещины и напряжением, которая была установлена Гриффитсом, т.е. прочность тела обратно пропорциональна корню квадратному из длины трещины. С ростом длины трещины прочность тела при сжатии падает по тому же закону, что и при растяжении. При некоторой фиксированной длине трещины l прочность тела при сжатии больше прочности при растяжении на величину

$$\frac{2C_T}{\sqrt{1 + \varphi^2} - \varphi}.$$

Это вытекает из сравнения двух последних выражений. В случае идеально гладкой поверхности трещины $\sigma_+ = (2L/\pi) (2/l)^{1/2}$.

Ввиду сложности реальных процессов, протекающих в массивах горных пород, формулы теории хрупкого разрушения пока не могут быть использованы для сколько-нибудь точных инженерных расчетов процессов, протекающих в скальном массиве. Однако сложность природной среды не препятствует качественной оценке картины роста трещин в горных породах, например при горном ударе [Авершин, Мосинец, Черепанов, 1972; Черепанов, 1974], землетрясения [Костров, 1975; Мячкин, 1978]. Поэтому используем их для принципиальной оценки закономерностей образования сетей трещин в горных породах.

Рассмотрим множество трещин, совместно и независимо развивающихся в массиве горных пород. Множество включает трещины различной длины. Многообразие длин может быть описано вероятностным распределением. Если трещины развиваются как равновесные при постепенном и равномерном возрастании напряжений, то более длинные из них будут расти быстрее коротких, так же, как в примере с карстованием широкие трещины развивались быстрее узких. Для неравновесных трещин, которые лавинообразно удлиняются при мгновенном возрастании напряжения, будет соблюдаться правило, сходное с правилом развития равновесных трещин. А именно, при этом втором механизме роста трещин в первую очередь



Р и с. 30. Схема изменения распределения длин трещин при импульсивном росте неравновесных трещин в условиях периодического повышения напряжений

a — последовательность импульсов напряжений σ ; b — зависимость критической длины неравновесной трещины от напряжения (по Качанову [1974]); b — последовательность кумулятивных кривых распределения длин трещин от кривой нормального типа на момент времени t_0 до кривой логнормального типа на момент времени t_n

будут удлиняться наиболее длинные трещины, так как для их роста достаточно минимального увеличения напряжений. Резкое периодическое повышение напряжений в массиве, возможное, например, при землетрясениях, можно представить в виде последовательности скачкообразных всплесков напряжений во времени (рис. 30, a). Из закона повторяемости землетрясений следует, что чем значительнее всплеск напряжений, тем меньше его вероятность и тем реже случаются такие всплески. Назовем σ_1 напряжение на момент времени t_1 , σ_2 то же на момент t_2 и т.д. Сопоставим величины напряжений σ_1 , σ_2 и т.д. с длиной трещин, которые могут развиваться как неравновесные при первом, втором и т.д. всплеске напряжений.

Обратимся к рис. 30, b . Спроектируем σ_1 и σ_2 на кривую $l(\sigma)$. Пользуясь графиком функции Гриффитса, получим значения l_1 и l_2 длин трещин, которые окажутся в неравновесном состоянии и увеличатся при всплесках напряжений σ_1 и σ_2 . Значительная часть трещин (см. рис. 30, b), длина которых менее l_1 , окажется в первом случае в устойчивом состоянии. Во втором случае развитие коснется огромного большинства трещин, которые больше l_2 . В том числе будут вторично захвачены процессом трещины, увеличившиеся в первом случае. Вероятность возникновения таких больших напряжений, как σ_2 , весьма мала. Соответственно мала

и вероятность вовлечения в процесс роста коротких трещин на уровне l_2 . Вероятность удлинения более коротких трещин еще меньше. При достаточно большом промежутке времени вероятность возникновения тех или иных по величине напряжений реализуется в виде скорости роста трещин. Скорость оказывается в зависимости от начальной длины трещин. В этом смысле преобразование исходного распределения длин независимо от механизма роста трещины, равновесного или неравновесного, приводит к одинаковому результату, а именно к ускоренному росту длинных трещин. Вследствие этого с течением времени интегральная кривая распределения вероятностей длин трещин вытягивается вдоль оси l и переходит от начального нормального или иного распределения к левасимметричному распределению логнормального типа (рис. 30, в).

Мы рассмотрели развитие ширины и длины трещин. Развитие других параметров: амплитуды смещения и расстояния между параллельными трещинами при фиксированном объеме массива, — несомненно, функционально связано с рассмотренными параметрами. Действительно, амплитуда смещения есть накопленная на крыле трещины деформация, возникающая за счет разрыва вектора смещения. Накопленная деформация, как очевидно из закона Гука, пропорциональна длине, на которой она накапливается. Экспериментально факт достаточно тесной линейной связи между длиной и амплитудой разрыва был установлен А. Кайе [Cailleux, 1958] и М.В. Рацем [1965]. Связь между длиной трещин, растущих в данном объеме, и расстоянием между ними очевидна.

Рост трещин означает ее проникновение в пространство между двумя параллельными трещинами. Тем самым на каком-то участке расстояние между параллельными трещинами сокращается вдвое. Дробление блоков породы происходит, видимо, в соответствии с гипотезой А.Н. Колмогорова [1941], вследствие чего возникает логнормальное распределение расстояний между трещинами.

Обобщая, можно записать: если параметр трещины x на момент t_0 распределен в вероятностном смысле нормально, то на момент t в результате развития трещин возникает левасимметричное распределение. Причиной возникновения такого распределения является нелинейная зависимость $x(t)$. Процесс идет указанным образом, если первая производная $x'(t)$ неуклонно возрастает.

Описанный преимущественный рост длинных и широких трещин, как и сгущение трещин на участках, где они уже имеют максимальную густоту, являются выражением известного геологического закона унаследованного развития. Описанный физический механизм объясняет происхождение левасимметричных вероятностных распределений параметров трещин, характерных для трещиноватости горных пород. Однако рассмотренная здесь модель процесса развития трещин обладает, по крайней мере, одним существенным недостатком. Она не может согласоваться с фактами в области больших экстремальных значений параметров трещин. Ускоренное развитие максимальной трещины быстро приводит к увеличению ее до бесконечности. Что, очевидно, невозможно хотя бы в силу ограниченности геологического пространства, в котором развивается трещина.

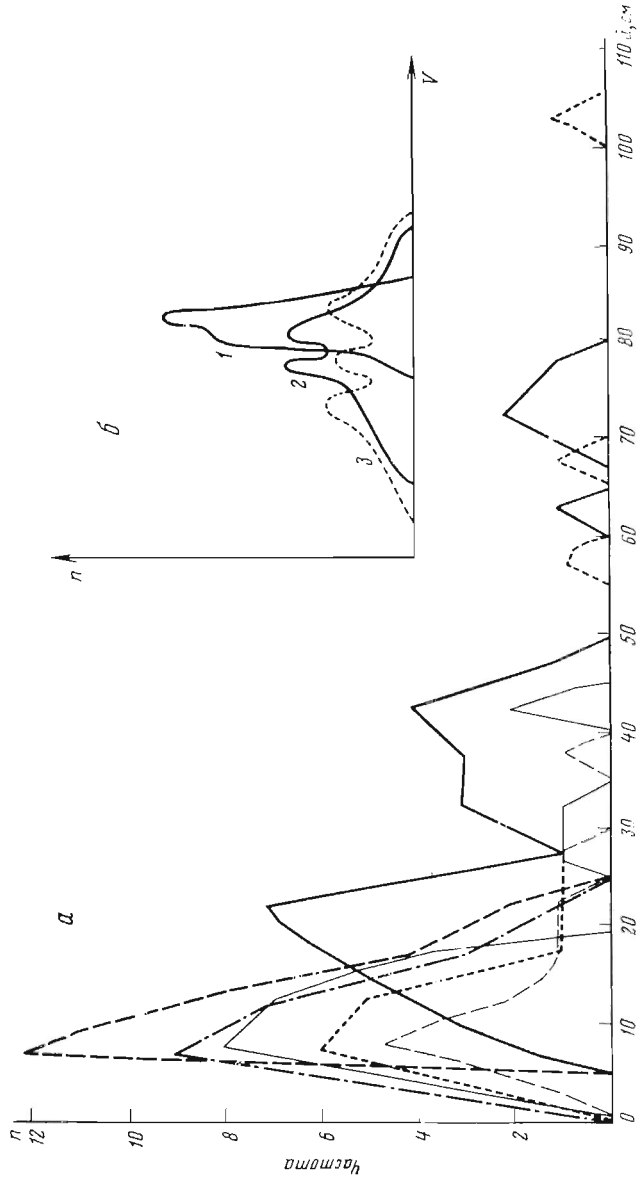
Следовательно, есть некий механизм — диалектическая противоположность механизма унаследованного развития, который препятствует развитию трещины в полном соответствии с предложенным здесь механизмом геологической наследственности. Тенденция унаследованного развития в точности определена параметрами зародышевой микротрещины. Место, направление и размеры микротрещины определяют место, направление и скорость роста трещины. Отклонение от тенденции унаследованного развития вызывается изменением условий внешней среды: геологическая граница на пути роста трещины, изменение поля напряжений или потока подземных вод под влиянием соседних трещин. Можно привести немало примеров, когда наличие геологической границы приводит к пресечению тенденции унаследованного развития.

Так, в слоистых толщах трещины, достигая границы пласта, часто не распространяются далее либо из-за смены свойств материала, либо из-за смены поля напряжений при переходе через трещину напластования. Развитие в пределах пласта идет, подчиняясь механизму унаследованности, развитие той же трещины в поперечном к пласту направлении отклоняется от этой тенденции под влиянием внешних условий. Трещины бортового отпора, которые могут служить одним из наиболее наглядных примеров унаследованного развития макроструктур, также не развиваются беспредельно. Длина их по простиранию оказывается ограниченной внешними по отношению к трещине и массиву условиями рельефа дневной поверхности и геологическими границами в массиве пород. Предельная глубина трещин также ограничена в зависимости от внешних условий, в которых развивается трещина.

§ 3.5. Возникновение порядков неоднородности в сети трещин

Ускоренное унаследованное развитие трещин наблюдается при отсутствии взаимовлияния между ними. При сближении и тем более пересечении тенденция унаследованного развития трещин нарушается. Влияние внешних условий может привести к двум противоположным результатам: 1) трещина прекращает развиваться, оказавшись в зоне влияния соседней более крупной трещины; 2) трещина соединяется с соседней трещиной и скачкообразно переходит к новому этапу ускоренного развития. Прекращение развития трещин при сближении прекрасно иллюстрируется ростом первичных трещин полигональной отдельности. Если какая-либо трещина такого типа сближается с уже существующей, то она изгибается и кратчайшим путем достигает старшей трещины. При этом образуется характерное для первичных сетей трехлучевое пересечение (см. рис. 10).

Прекращение роста первичных трещин при встрече связано с локализацией источников энергии в пределах полигонов. Энергия, запасенная осадком или расплавом, исчерпывается при возникновении трещин отрыва. У всякой трещины отрыва в направлении, перпендикулярном ее осевой плоскости, снимается растягивающее напряжение. Растяжение сохраняется лишь в направлении вдоль плоскости трещины. Поэтому вторая трещина, входя в зону влияния первой, изменяет свое направление, стремясь к положению перпендикуляра к первой трещине.



Р и с. 31. Многовершинные распределения в массивах с несколькими уровнями неоднородности сетей трещин
a — распределение расстояний между трещинами в известняках на строительной площадке Токтогульской ГЭС для различных систем (данные А.В. Количко и М.В. Раца); *б* — распределения скоростей распространения упругих волн в траппах на Талнахском месторождении (данные Г.А. Голодковской, Л.В. Шаумян) для массивов: 1 — с первичной трещиноватостью; 2 — со слабой тектонической трещиноватостью; 3 — с зонами интенсивного тектонического дробления на фоне тектонической трещиноватости

После встречи трещины напряжения оказываются снятыми по двум взаимно перпендикулярным осям. Рост трещин прекращается. В условиях взаимовлияния нескольких трещин со случайной ориентировкой ортогональность пересечения нарушается. Важно подчеркнуть, что в условиях роста тектонических и гипергенных трещин наряду с прекращением роста при пересечениях реализуется и вторая возможность: трещины, сливаясь, продолжают развиваться ускоренно. Рост тектонических разрывов за счет слияния трещин широко известен.

Следует подчеркнуть, что все трещины при этом разбиваются на две совокупности — большую и меньшую по объему. В большей — трещины, которые прекращают рост. В меньшей — новое поколение крупных трещин, которые уже при слиянии сразу становятся в среднем вдвое длиннее трещин предыдущего поколения и продолжают значительно быстрее расти наследуя ускоренный рост от слившихся крупных трещин. Таким образом, возникают две группы трещин разного порядка величины. Статистически это выражается в возникновении гетерогенного двухвершинного распределения параметров трещин. На некотором этапе рост трещин нового поколения снова приводит к их слиянию и образованию двух совокупностей — одной, растущей ускоренно, и другой замирающей. Этот процесс повторяется многократно. Он приводит к формированию нескольких порядков неоднородности в системе трещин, что выражается полимодальными распределениями ее параметров (рис. 31). Увеличение длины трещин при переходе от уровня к уровню вероятно происходит по закону близкому к закону геометрической прогрессии с основанием 2, точнее, несколько больше двух за счет роста трещин на каждом этапе до расщепления на две совокупности. Таким образом расстояние между модами на графике распределения ускоренно увеличивается, а количество членов в каждой новой лидирующей совокупности быстро уменьшается при переходе к новым уровням. Ранее эти порядки выделялись условно [Рац, Чернышев, 1970]. Теперь существование группировки трещин по размерам физически объяснимо. Существование порядков неоднородности в сети трещин экспериментально подтверждается скачкообразным изменением кривой масштабного эффекта [Ухов, 1975].

Существование нескольких уровней неоднородности в решетке трещин четко выявлено при исследованиях инженерно-геологических условий Талнахского месторождения [Инженерно-геологические..., 1975]. Приведенные в названной выше работе графики распределения скорости продольных волн в массивах порфировых базальтов имеют одновершинную форму для массивов с первичной трещиноватостью. В массивах со слабой тектонической трещиноватостью график имеет две вершины, соответствующие двум уровням неоднородности. Развитие тектонической трещиноватости приводит к появлению третьего максимума на кривой распределения. С развитием трещиноватости возрастает дисперсия скоростей. Новые максимумы на графике распределения возникают в области малых скоростей, т.е. они связаны с появлением зон дробления. Реальное существование нескольких уровней неоднородности в массиве горных пород подчеркивается формой масштабных кривых скорости распространения упругих волн. Кривая для зоны массива с первичной трещи-

новатостью плавно затухает. Для зон массива с тектонической трещиноватостью имеется несколько перегибов.

Методологический вывод из теории унаследованного развития трещин для инженерной геологии должен быть таким: наиболее крупные трещины развиваются наиболее быстро в любых процессах. В техногенных процессах они также будут лидировать. Для изучения трещиноватости можно выделить три категории трещин: микротрещины, которые локализованы в образцах породы и не подлежат подробным исследованиям при документации трещиноватости; макротрещины или трещины, которые во множестве имеются в массиве и подлежат выборочному статистическому изучению; мегатрещины, которые немногочисленны, но наиболее активны в любых процессах и потому подлежат внимательному исследованию индивидуально каждая.

§ 3.6. Новообразование систем трещин в массиве горных пород

Перейдем к количественному анализу решетки трещин в целом как совокупности систем трещин.

Сеть трещин в массиве горных пород, как правило, состоит из нескольких систем, возникших последовательно одна за другой, иногда с ничтожными, а иногда с очень длительными перерывами во времени. Даже сопряженные сколовые системы возникают в каждой точке массива последовательно. Это особенно хорошо видно в экспериментах [Косыгин, Лучицкий, Розанов, 1949; Гептнер, 1970; Стоянов, 1973], но устанавливается и в полевых условиях. Признав, что системы трещин возникают последовательно, можно рассматривать каждую из них как отдельную генерацию. Сеть трещин в таком случае представляет собой совокупность генераций. Выяснить закономерности строения сети можно путем изучения особенностей последовательных генераций трещин.

Исследование сети трещин как совокупности разновозрастных систем разного происхождения начато давно. Оно составляет существенную часть структурного анализа, созданного Г. Клоосом и А.А. Полкановым. Тот же подход находим в тектонофизике при анализе трещиноватости осадочных толщ [Белицкий, 1949; Гзовский, 1964; Косыгин, Лучицкий, Розанов, 1949; Tchalenko, 1970]. В названных работах при анализе последовательных генераций трещин выявились преимущественно закономерности смены ориентировки систем. Длина, ширина, густота трещин рассматривались значительно реже и с меньшей подробностью. Во всех случаях речь шла только о среднем значении параметров трещин. Моменты более высоких порядков не исследовались.

В качестве модели трещины примем вектор в пространстве признаков α (азимут падения), β (угол падения), a (расстояние до параллельной трещины), l (длина) и b (ширина). При таком подходе система трещин представляет собой бесконечное множество, которое со статистических позиций характеризуется непрерывной многомерной функцией распределения вероятностей. Исследование параметров функции позволило выявить некоторые закономерности смены ее формы при переходе от одной генерации к другой, оказавшиеся общими для трещин разного происхождения.

Изучение трещиноватости проведено автором в полевых условиях по единой методике в гранитах на р. Кольме, траппах на р. Ангаре, песчаниках и алевролитах Таджикской депрессии и Иранского нагорья, травертинах района Кавказских минеральных вод и суглинках у сейсмогенного сдвига в Монголии. Ниже в самом кратком изложении приведен фактический материал, собранный на протяжении ряда лет, несколько разнородный по составу. Все же, при некоторых пробелах, он составляет около 5,5 тыс. измерений различных параметров трещин, которые служат достаточным основанием для выводов.

Весьма существен вопрос о выделении последовательных генераций трещин при полевых работах. Если в лабораторных условиях последовательность генераций трещин устанавливается просто путем регистрации хода опыта во времени, то при исследовании обнажений геолог лишен возможности непосредственно установить относительный возраст системы трещин. Для выявления последовательности генераций необходим анализ. Мы во всех случаях пользовались простейшим классическим способом выявления последовательных генераций трещин, известным из структурной геологии. Однако он эффективен не на всех обнажениях. Иногда при значительной длине трещин четкие отношения не выявляются.

Совершеннее метод тектонофизического анализа, который был применен в двух случаях из шести рассмотренных ниже. Был проведен анализ смены полей напряжений и соответствующей смены ориентировки возникающих в этом поле трещин траппов (см. § 4.4) и суглинков в районе сейсмодислокаций Могодского землетрясения [Погребиский, Чернышев, 1974]. Для траппов (табл. 22) устанавливается первичность вертикальных трещин. Горизонтальные трещины составляют вторую генерацию. Для трещин оперения сейсмогенного сдвига (табл. 26) установлены две пары сопряженных трещин скола. В первой паре систем одна совпадает с основным сейсмогенным разрывом. Вторая, отстающая в своем развитии, проходит под углом 65° к первой. Последующие генерации трещин возникают за счет трения крыльев разрыва. Они образуют с поверхностью сместителя угол $30-35^\circ$. Которая из двух последних систем возникает раньше, можно установить только путем анализа их морфологии.

Рассмотрим параметры трещин по генерациям отдельно в различных породах. Трещины в гранитах (табл. 20) изучены в средней части интрузии, обнаженной в среднем течении р. Кольмы у пос. Синегорья. Расстояние от исследованного участка до контактов, обнаженных выше и ниже по реке, 5–7 км. Свежий облик пород и характер их трещиноватости позволяет рассматривать трещины как первичные, обновленные тектоническими или экзогенными процессами. В табл. 21 и далее $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$, \bar{l} — средние арифметические значения, s — среднее квадратическое отклонение, V — коэффициент вариации, n — количество измерений, r — оценка коэффициента корреляции, s_r — стандартная ошибка коэффициента корреляции. Первичные трещины в трапповом силле исследованы в среднем течении р. Ангары у с. Невон (табл. 21). Для составления таблицы использовано около 2000 измерений, выполненных на естественных обнажениях, в штольне и на керне колонковых скважин. Геологическое строение участка и трещиноватость описаны в § 4.4.

Измерения, помещенные в табл. 22, выполнены на одном обнажении в долине р. Вахша в районе курорта Обитарм на крыле крупной складки, имеющей ширину несколько километров, а протяженность несколько десятков километров. Для расчета табл. 23 послужили измерения, выполненные автором в таких же условиях на участке шахты Пабедана в Керманском угольном бассейне.

Для составления табл. 24 использованы измерения трещин в четвертичных латечных образованиях на склоне г. Машук. Здесь, как и в двух предыдущих таблицах, l — система трещин, параллельных слоистости.

В табл. 25 приведены параметры трещин оперения сейсмогенного сдвига, длиной 40 км, возникшего при Могодском 10-балльном землетрясении 6 января 1967 г. в бассейне р. Орхона. Они представляют собой зияющие траншееподобные образования с вертикальными стенками, развитые в полосе шириной 10–200 м в окрестностях главного разрыва [Погребиский, Чернышев, 1974].

Результаты частичных наблюдений, отраженные в табл. 20–25, обобщены в табл. 26, из анализа которой вытекает следующее.

Параметры контракционных трещин в гранитном батолите на р. Колыме

Параметры трещин	Параметры распределений	Относительный возраст системы трещин		
		1 старшая	2 средняя	3 младшая
Обнажение				
a , см	\bar{a}	73,9	107,3	195,6
	s	37,5	86,3	152,2
	V	0,5	0,8	0,8
	n	42,0	41	42
l , м	\bar{l}	8,9	8,3	3,6
	s	10,2	18,6	—
	n	23	34	10
	V	1,1	2,2	—
Штольни 100, 763, 733, 777				
β°	$\bar{\beta}$	21	80	86
	s	14	21	28
	n	185	326	23
b , см	\bar{b}	0,20	0,20	0,16
	s	0,24	0,21	0,19
	V	1,2	1,0	1,2
	n	185	326	101
α°	$\bar{\alpha}$	—	176	87
	s	—	28	32
	n	—	326	101

Последовательно возникающие в массиве системы трещин различаются не только по генеральным направлениям трещин, но и по другим параметрам. Смена отличительных признаков носит закономерный характер. Отличия между первой и второй генерациями трещин те же, что между второй и третьей, и так далее. При последовательном сравнении первой системы со второй, а затем с третьей и далее отличительные черты усугубляются. Главные среди них при переходе от старших систем к младшим: 1) увеличение стандартного отклонения угла падения и азимута падения трещин; 2) увеличение расстояния между трещинами, стандартного отклонения и коэффициента вариации этой величины; 3) уменьшение длины трещин и стандартного отклонения этой величины. Коэффициент вариации длины трещин от старшей системы к младшей по крайней мере не убывает. Вероятно, он даже возрастает при общем убывании среднего и дисперсии. За последнее утверждение материал табл. 20 (57 измерений), табл. 21 (238 измерений), столбцы 1, 2 и 3 табл. 25 (168 измерений). Ширина трещин, отраженная в табл. 20 и 25, не проявляет каких-либо закономерностей смены формы распределения при переходе от генерации к генерации. По-видимому, это связано с быстрым изменением ширины под воздействием экзогенных и других факторов, меняющих трещиноватость массива.

Параметры контракционных трещин в трапповом силле на Ангаре

Глубина от верхнего контакта силла, м	Параметры трещин	Параметры распределений	Относительный возраст системы трещин	
			1 старшая	2 младшая
0 - 10	β°	$\bar{\beta}$	90	0
		s	18	21
	a , см	\bar{a}	27	35
		β°	$\bar{\beta}$	90	0
10 - 20	β°	s	10	13
		a , см	\bar{a}	24	53
	l , м	\bar{l}	44,2	18,0
		s	31,5	17,4
V		0,71	0,96	
n		41	197	
20 - 30	β°	$\bar{\beta}$	90	0
		s	8	13
	a , см	\bar{a}	18	52
		β°	$\bar{\beta}$	90	0
30 - 80	β°	s	7,6	8,2
		a , см	\bar{a}	14	54
	β°	$\bar{\beta}$	90	0
		s	8	13
80 - 90	a , см	\bar{a}	12	60
		β°	$\bar{\beta}$	90	0
	β°	s	9,3	14
		a , см	\bar{a}	9	25

Таблица 22

Расстояние между тектоническими складчатыми трещинами в алевролитах мела Таджикской депрессии

Параметры распределений для a , см	Относительный возраст систем	
	1 старшая	2 младшая
\bar{a}	14,9	32,6
s	6,4	18,7
U	0,43	0,57
n	38	35

Таблица 23

Стандартные отклонения расстояний между трещинами по системам в песчаниках юры Иранского нагорья, см (по данным 300 измерений)

Съемочная точка	Относительный возраст системы				
	1 старшая	2	3	4	5 младшая
95	5,8	13,6	26,4	46,4	76,4
96	—	7,7	23,6	45,2	122,5
97	—	25,3	31,6	63,1	217,0
98	—	20,6	31,8	39,1	52,2

Таблица 24

Параметры планетарных трещин в травертинах г. Золовой в Пятигорске

Параметры трещин	Параметры распределений	Относительный возраст системы		
		1 старшая	2 средняя	3 младшая
α°	$\bar{\alpha}$	174	316	56,4
	s	12,8	23,7	21,4
	n	19	77	23
β°	$\bar{\beta}$	24	70	86
	s	5,7	9,2	12,8
	n	19	77	23
a , м	\bar{a}	0,50	1,43	5,44
	s	0,23	1,28	3,24
	n	19	77	23
l , м	\bar{l}	15,2	9,8	2,4
	s	11,7	15,3	1,8
	n	19	77	23

Таблица 25

Параметры приразрывных трещин у сейсмодислокации в суглинках в эпицентре Могодского землетрясения 1967 г. (МНР)

Параметры трещин	Параметры распределений	Относительный возраст системы			
		1 старшая	2	3	4 младшая
α°	$\bar{\alpha}$	275	335	305	236
	s	4,4	7,9	7,8	16,5
	n	12	71	68	9
a , м	\bar{a}	—	3,9	3,7	7,9
	s	—	2,6	2,9	12,1
	n	5	62	61	7
b , см	\bar{b}	19,0	19,0	23,6	12,6
	s	18,6	18,3	21,9	27,7
	n	8	60	66	8
l , м	\bar{l}	55,2	18,5	22,0	7,8
	s	49,0	12,6	17,2	4,8
	n	12	70	86	24
αa	r	-0,31	-0,11	-0,22	-0,57
	s_r	0,40	0,12	0,12	0,26
	n	5	62	61	7
αl	r	0,08	-0,11	-0,13	-0,67
	s_r	0,33	0,12	0,12	0,17
	n	10	70	68	9
αb	r	0,12	-0,10	-0,26	-0,34
	s_r	0,11	0,12	0,12	0,33
	n	8	69	66	8
al	r	-0,14	0,29	0,30	0,83
	s_r	0,43	0,12	0,12	0,12
	n	5	62	60	7
ab	r	0,26	-0,00	0,17	-0,24
	s_r	0,44	0,13	0,12	0,35
	n	4	62	60	7
lb	r	0,76	0,37	0,56	0,32
	s_r	0,15	0,10	0,08	0,32
	n	8	69	66	8

Рассмотрение многомерной функции распределения в принятом плане будет неполным, если не коснуться смешанных моментов. Для их характеристики в табл. 25 приведены парные коэффициенты корреляции, которые в большинстве случаев оказались низкими и часто не отличаются от нуля. Характерно отсутствие связи ширины и расстояния между трещинами с ориентировкой, отсутствие связи между шириной трещин и расстоянием между ними. Длина трещин оказалась в существенной зависимости от ориентировки в пределах системы и расстояния между

Таблица 26

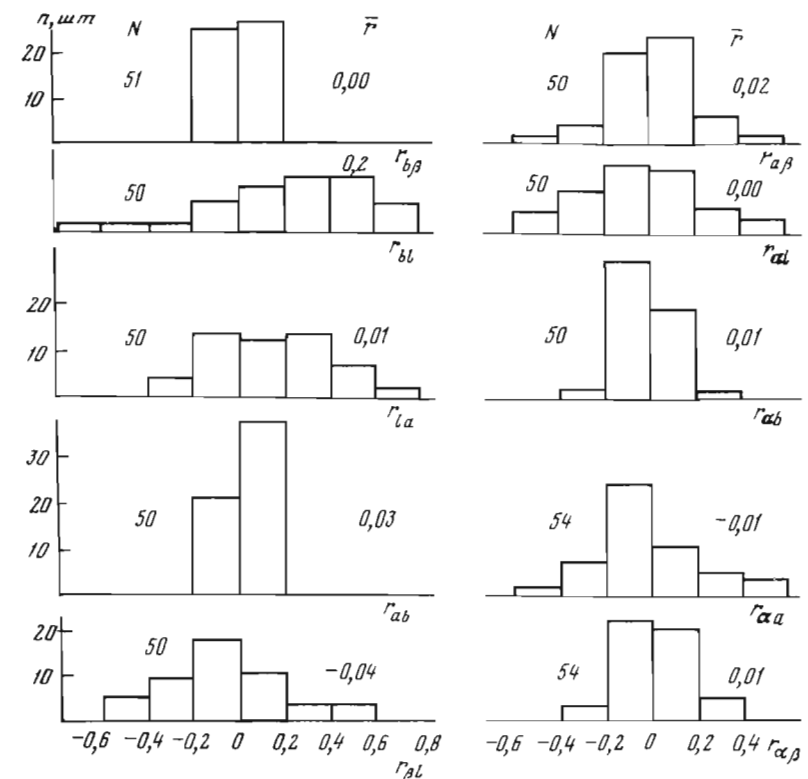
Смена параметров систем трещин в последовательных генерациях

Параметр трещины	Параметры распределений	Относительный возраст системы трещин (генерация)				
		1 старшая	2	...	n младшая	
Азимут падения α°	$\bar{\alpha}$	$\bar{\alpha}_1 \neq$	$\bar{\alpha}_2 \neq$	...	$\neq \bar{\alpha}_n$	
	s_α	$s_1 \leq$	$s_2 \leq$	...	$\leq s_n$	
Угол падения β°	$\bar{\beta}$	$\bar{\beta}_1 \neq$	$\bar{\beta}_2 \neq$	...	$\neq \bar{\beta}_n$	
	s_β	$s_1 \leq$	$s_2 \leq$	...	$\leq s_n$	
Расстояние между трещинами a	\bar{a}	$a_1 \leq$	$a_2 \leq$	...	$\leq a_n$	
	s_a	$s_1 \leq$	$s_2 \leq$	...	$\leq s_n$	
	V_a	$V_1 \leq$	$V_2 \leq$	...	$\leq V_n$	
Длина трещины l	\bar{l}	$\bar{l}_1 \geq$	$l_2 \geq$	...	$\geq l_n$	
	s_l	$s_1 \geq$	$s_2 \geq$	...	$\geq s_n$	
	V_l	$V_1 \leq$	$V_2 \leq$	...	$\leq V_n$	

трещинами для последней генерации. С шириной трещин длина также проявляет заметную связь. Эта связь наиболее отчетлива для трещин старшей генерации. В этой генерации наблюдается максимальная средняя длина.

Отсутствие существенных связей между параметрами трещин подтверждается и на другом материале. По результатам измерения 1200 трещин в известняках нижнего мела на складке Кули-Меер у с. Гергебиль в Дагестане подсчитаны парные коэффициенты корреляции для попарно взятых угла падения, азимута падения, длины, ширины и частоты трещин в системе. Коэффициенты корреляции подсчитаны примерно для 50 выборок. Это дало возможность оценить распределение коэффициентов корреляции и найти их средние значения (рис. 32). В одну выборку включались измерения, выполненные в одной съемочной точке и в пределах одной системы трещин. При построении гистограмм вычисленные оценки коэффициента корреляции рассматривались как принадлежащие к одной совокупности. Эта гипотеза не проверялась. Характер связи между параметрами может быть различен для разных систем трещин. Может быть, с этим связана большая дисперсия r в тех случаях, когда в паре аргументов участвует длина трещин.

В целом проведенный анализ связи между параметрами тектонических трещин складки показывает, что связи и взаимозависимость параметров статистически не выявляются. Средние значения коэффициента корреляции близки к нулю, характер распределения близок к нормальному, что типично для $r = 0$. Исключение составляет связь между длиной и шириной, длиной и частотой трещин. Как и в случае разрывных трещин (табл. 25) на складке слабо выполняется закономерность: чем длиннее трещина, тем она шире и вторая закономерность: чем длиннее трещина, тем больше расстояние до параллельной ей трещины. Эти закономерности понятны. Длинные трещины снимают напряжения в обширной окрестности, поэтому параллельные трещины возникают на заметном удалении. Дальнейшее исследование этих связей наряду со связью между длиной и амплитудой смещения, установленной ранее, может привести к созданию статистического метода прогноза длины трещины, частично видимой в обнажении. Значение решения этой задачи для расчета открытых и подземных выработок весьма актуально. Другой вывод, который можно сделать из анализа связей: слабая зависимость параметров трещин позволяет рассматривать их в различных инженерных задачах как независимые случайные величины.



Р и с. 32. Распределение выборочных оценок коэффициентов корреляции между параметрами трещины

N — количество выборок, по которым оценивался коэффициент корреляции;
 \bar{r} — среднее значение коэффициента корреляции

В целом отраженная в табл. 26 картина смены параметров свидетельствует о росте неоднородностей систем трещин и сети во времени. Каждая последующая система по всем параметрам более неоднородна, чем предыдущие. Рост неоднородности систем вполне можно объяснить ростом неоднородности поля напряжений в массиве по мере усложнения его структуры, имея в виду ту связь между структурой массива и структурой поля напряжений, о которой писал П.Н. Панюков [1962]. Рост неоднородности параметров системы, начиная с некоторого номера генерации, приводит к противоречию между цифровой характеристикой возникающей группы трещин и понятием системы как группы параллельных [Ю.А. Косыгин, 1958] или примерно параллельных [Рац, Чернышев, 1970] трещин. Начиная с некоторого момента в истории развития массива системы больше не образуются, а системная сеть трещин сменяется хаотической. Столь далеко процесс развития сети трещин заходит обычно лишь в зонах дробления у разрывов и в зонах выветривания.

Возможно и другое завершение развития сети трещин. При коренной перестройке структуры массива, связанной с пластическим течением и

метаморфизмом, системная сеть трещин исчезает. На смену ей возникают иные структурные поверхности и трещины, которые никак не связаны с ранее существовавшей сетью трещин. В работе Ю.А. Косыгина, И.В. Луцицкого и Ю.А. Розанова [1949] это явление воспроизведено экспериментально: "При давлении 9140 кг/см² и более происходит полное залечивание диагональных трещин, и они перестают играть какую-либо роль в ходе деформации" (с. 17). В дальнейшем при выветривании могут быть регенерированы сети трещин различных эпох, возникшие последовательно и независимо друг от друга. Так возникают особо сложные гипергенные сети трещин.

Элементы рассмотренной закономерности были отмечены ранее в литературе. Так, В.Н. Калачева [1970] писала, что ранние системы трещин гуще, чем возникшие позже в той же части массива (строка 5 табл. 26); Т.М. Гептнер [1970], которая экспериментально получила последовательные генерации трещин, отметила укорочение трещин при переходе к младшим генерациям (строка 7 табл. 26). Последовательным генерациям трещин в гранитном батолите [Cloos, 1921], кроме определенной ориентировки относительно структур течения, присущи закономерные отличия по длине, густоте и ширине. Однако отмеченная в табл. 26 закономерность не во всем согласуется со взглядами Г. Клооса. По его данным, в гранитах наименьшей густотой обладают трещины последней генерации (как в табл. 26), но наибольшая густота присуща второй генерации, а не первой. Наибольшая длина отмечается для трещин первой генерации (как в табл. 26), но наименьшая приписана трещинам второй, а не последней генерации. Корреляционные связи между параметрами трещиноватости магматических пород ранее исследовал Э.И. Ткачук [1967]. Им выявлены тесные связи между объемной плотностью микро- и макротрещин, между объемной плотностью и частотой трещин с зеркалами скольжения.

В заключение несколько слов об инженерно-геологическом значении закономерности смены параметров по генерациям трещин. Сеть трещин в свете изложенного состоит из нескольких неравнозначных в инженерно-геологическом отношении систем трещин. Наибольшее влияние на прочностные и фильтрационные свойства, на сопротивление разработке и денудации может оказывать наиболее совершенная система трещин первой генерации, состоящая из длинных трещин, ориентированных строго определенным образом, размещенных в массиве равномерно и наиболее густо. Вклад каждой последующей генерации трещин в свойства массива в связи с закономерной сменой параметров систем становится все меньше и меньше. Поэтому определяющим инженерно-геологическим признаком массива осадочных пород справедливо считаются элементы залегания слоев. Именно поэтому схема расчета устойчивости бортов откосов с учетом только слоистости дает приемлемое для практики приближение к истинному углу откоса. Введение в расчет трещин второй и третьей генерации значительно повышает качество инженерно-геологической модели. Дальнейшее усложнение модели будет все менее результативно в техническом смысле.

§ 3.7. Основные черты строения и стадии развития сетей трещин

Известные ранее и установленные здесь факты показывают, что в развитии сетей трещин можно выделить три стадии. На первой стадии происходит равномерное растрескивание породы по всему объему. Во всей монолитной породе трещины возникают независимо и одновременно в различных точках. Вследствие этого распределение их в пространстве оказывается случайным, пуассоновым, а ориентировка закономерна в соответствии с ориентировкой осей главных нормальных напряжений. В силу случайности трещины в отдельных местах расположены реже, в других чаще. Некоторые трещины оказываются длиннее других. Источники напряжений на первой стадии растрескивания обычно внутренние, формирующие первичную трещиноватость. Однако могут быть и внешние источники энергии. На второй стадии происходит сгущение трещин и их слияние. На этой стадии источники напряжения внешние, например, тектонические. Растут преимущественно наиболее длинные трещины. Сгущение происходит в зонах, где на первой стадии случайным образом трещины оказались расположенными наиболее часто. В этом проявляется закон унаследованного развития геологических структур, известный из работ Н.С. Шатского, А.Л. Яншина, А.В. Пейве. Слияние трещин на участке сгущения — основной способ образования тектонических разрывов согласно теории образования разрывов, оформленной М.В. Гзовским [1960], а ранее развивавшейся М.М. Тетяевым [1940] и В.В. Белоусовым [1952].

На второй стадии в статистическом смысле нарушается равномерное распределение трещин по объему благодаря преимущественному развитию трещин на участке сгущений. Распределения параметров трещин приобретают ярко выраженную левую асимметрию за счет преимущественного роста наиболее длинных трещин. Таким образом, вторая стадия развития — это стадия появления двух уровней неоднородности в сети трещин. На второй стадии происходит встреча и слияние не только субпараллельных, но и других, в частности, перпендикулярных трещин. Вследствие этого образуется блочная структура массива. Сеть из прерывистой переходит в разорванную (см. гл. 1). Интересно, что характер разрастания сети трещин на данной стадии в горных породах сходен с картиной роста трещин в металлах перед разрушением. И в том, и в другом случае последовательно наблюдается возрастание неоднородности среды в зоне будущего разрыва во времени или по мере приближения к разрыву в пространстве, локализация деформации и возникновение гетерогенных распределений параметров трещин.

Рассматриваемая стадия в целом для сети видимых трещин вторая. Для мегатрещин или разрывов, возникших на данной стадии, это первая стадия. Если рассматривать массив на мегауровне, то он после этой стадии расчленен прерывистой сетью разрывов. И наоборот, рассмотренную нами первую стадию можно было бы считать второй, если анализ начать с уровня микротрещиноватости.

Третья стадия развития сети трещин — разрастание и слияние разрывов и одновременное преобразование вложенной сети макротрещин. Разрывы растут ускоренно. Они сливаются и образуют новый уровень неод-

нородности в сети трещин -- уровень крупных разрывов. Одновременно сеть разрывов становится совершеннее, появляются блоки в массиве горных пород, оконтуренные разрывами. Сеть разрывов на данной стадии представляется прерывистой или даже непрерывной. Сеть мелких трещин на третьей стадии развивается под влиянием энергии, выделяемой в зонах разрывных нарушений, а также под влиянием других источников энергии (выветривание, взрывы и др.). В сети мелких трещин удлиняются и сливаются наиболее крупные, что ведет в конечном счете к образованию непрерывной сети трещин, расчленяющей массив на отдельные блоки.

Массив на этой стадии не представляет собой сплошного тела. Разбитый на блоки разного порядка с трещинами, заполненными продуктами дробления или выветривания горных пород, он способен к псевдопластическим деформациям за счет относительного перемещения блоков. Такие деформации в тектонике известны под названием крипа. При медленном перемещении в отдельных блоках возникают участки высоких напряжений и образуются новые трещины, короткие и разнообразные по ориентировке. Возникновение этих трещин стирает закономерности в ориентировке мелких трещин. Сеть трещин на третьей стадии превращается в хаотическую. За этим наступает либо разрушение сети вместе с массивом в процессе денудации, либо залечивание трещин в процессе того или иного вида метаморфизма. После залечивания трещин и восстановления прочности массива развитие новой сети, наложенной на старую, начинается с первой стадии.

В сети растут преимущественно наиболее крупные трещины. Однако периодически под влиянием изменения внешних условий тенденция унаследованного развития пресекается. Тогда возникают новообразованные системы трещин. Это не исключает при смене условий возврата к старому плану деформаций. Иногда при метаморфизме, гидротермальном залечивании трещин или выветривании унаследованное развитие полностью прекращается и сеть трещин перестает существовать. Впоследствии в породе на ее месте возникает наложенная сеть, своими параметрами не связанная со старой. Старая сеть может прослеживаться в виде жил и даек, которые не являются "дефектами" в механическом смысле и потому не влияют на развитие наложенной сети.

Пресечение тенденции унаследованного развития отдельной крупной трещины, опережающей соседние мелкие, обычно происходит при встрече с другой трещиной. При этом в зависимости от условий пересечения результаты бывают противоположные: если ориентировка трещин резко различна и они встречаются под углом, близким к прямому, то одна из трещин обычно прекращает рост. Если же трещины имеют сходную ориентировку, то они соединяются, давая начало новой более крупной трещине. Семейство таких новообразований даст новый порядок неоднородности.

Статистически унаследованное развитие трещин выражается в смене формы распределения большинства параметров трещиноватости. Вследствие преимущественного роста крупных трещин распределение ширины, длины, густоты трещин в ходе геологической истории приобретает асимметрию и переходит от распределения нормального типа к распределению логнормального типа. Новообразованные системы трещин закономерно

отличаются от более древних меньшей длиной и густотой, а также большей вариацией всех параметров, включая ориентировку.

Механизм унаследованного развития трещин вскрывается при физическом анализе процессов хрупкого разрушения, растрескивания, кольматации, которые приводят к перестройке сети. Общее у этих разнообразных процессов в нелинейности выражающих их математических зависимостей. Всякая трещина, какой бы процесс роста в ней не протекал, растет в стабильных геологических условиях ускоренно, или в группе одновременно растущих трещин быстрее развиваются крупные. Таким образом, ускоренный рост трещин в стабильных геологических условиях, который выражается в нелинейной форме уравнений, описывающих процессы роста, является фундаментальной причиной унаследованного развития сетей трещин.

Установленный факт развития сетей трещин в соответствии с законом унаследованности позволяет сделать два принципиальных практических вывода. Вслед за В.И. Вернадским, Ф.В. Котловым, Е.М. Сергеевым можно рассматривать инженерные сооружения, особенно наиболее крупные из них, как новообразование в составе земной коры -- элемент ноосферы. Если это так, то в новообразовании, следуя принципу унаследованности, мы обязаны ожидать деформации, наследуемые от подстилающих горных пород. Отсюда следует необходимость: 1) предусматривать возможность унаследованных деформаций в сооружении на месте наиболее крупных деформаций в подстилающих горных породах; 2) всемерно стремиться к использованию природных структур и унаследованных процессов в интересах строительства. Первый принцип широко используется в практике инженерной геологии. Может быть, мы даже склонны иногда преувеличивать опасность развития унаследованных деформаций в сооружениях, забывая о сохранности наложенных форм. Второй -- почти не осознан в практике современного строительства. Однако отдельные примеры его использования имеются в области тоннелестроения, камеразарботки и др.

Тренд инженерно-геологических свойств горных пород, как показано в работах [Рац, 1968; Бондарик, 1971], возникает вследствие локализации источников материала и энергии, образующих или преобразующих массив горных пород. Параметры трещин в этом отношении не составляют исключения. "В наиболее общем случае, если процесс растрескивания распространяется от некоторой поверхности, на которую оказывается относительно постоянное и равномерное тепловое, механическое или другое энергетическое воздействие, по мере удаления от этой поверхности обычно уменьшается дисперсия параметров трещиноватости. При этом среднее либо уменьшается, либо возрастает" [Чернышев, 1966, с. 20]. Тренд параметров трещин влечет за собой такой же тренд инженерно-геологических свойств массива. "Так, если процесс изменения водопроницаемости массива под влиянием потока энергии и вещества распространяется от какой-либо поверхности, то по мере удаления от этой поверхности обычно уменьшается дисперсия параметров водопроницаемости массива. При этом среднее либо возрастает, либо уменьшается. Изменение дисперсии является следствием избирательности геологических процессов и унаследованности в развитии элементов неоднород-

ности массивов горных пород” [Оценка точности... , 1971, с. 98–99]. Влиянием на свойства массива определяется значение тренда параметров трещин по пространству массива. Его происхождение и форма могут быть выявлены путем анализа конкретных геологических процессов растрескивания, которые на примерах рассмотрены далее.

Глава 4

ОСОБЕННОСТИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД ОСНОВНОГО СОСТАВА

Можно назвать несколько главных параметров горных пород, которые определяют своеобразие трещиноватости. Это — прочность горной породы в момент трещинообразования, первичная форма залегания породы, тип границы с соседней породой (резкий или постепенный переход), характер геологической среды (анизотропный или изотропный), в которой происходит растрескивание, структура и текстура породы, которые определяют шероховатость поверхностей трещин. Все эти признаки горной породы и ее окружения наиболее полно выражаются в понятии формации. Поэтому описание трещиноватости петрографических и литологических типов пород целесообразно вести по формациям. В общем виде эта мысль была, видимо, впервые высказана М.В. Рацем [1963], хотя прекрасные описания трещиноватости некоторых распространенных формаций были составлены гораздо ранее и даже ранее, чем оформилось понятие геологической формации. Примерами служат описание трещиноватости формаций гранитных батолитов наряду с описанием других их структурных особенностей Г. Клоосом [1921] или описание трещин угленосной формации Г.А. Ивановым [1939].

Кратко рассмотрим роль формационной принадлежности горных пород в формировании сетей трещин различного генезиса. Первичные трещины магматических и осадочных горных пород возникают за счет внутренней энергии, запасенной осадком или расплавом. Условия роста трещин, как и условия петро- и литогенеза определяются тепло- и массообменом между формирующейся горной породой и ее окружением в земной коре. В силу этого закономерности строения сетей первичных трещин теснейшим образом связаны с фациальными условиями образования породы. Закономерности строения контракционных сетей трещин определяются местом кристаллизации расплава (на глубине или на поверхности), тектоническим режимом в момент кристаллизации. Закономерности развития литогенетических трещин определяются составом, мощностью слоев, характером контактов между ними и способом переслаивания. Все это специфические признаки геологических формаций, а не только горных пород. Рассмотрение горных пород в отрыве от формаций было бы недостаточным для характеристики условий развития первичной трещиноватости.

Тектонические трещины развиваются в породе на фоне первичной трещиноватости. Расположение и размеры их наследуются от первичных трещин и первичных геологических тел. Очень важно, что каждая формация соответствует определенной стадии геотектонического цикла и

определенной геотектонической зоне [Белоусов, 1962]. Из этого вытекает, что характер последующих деформаций пород той или иной формации в какой-то мере предопределен их формационной принадлежностью. Так, флишевая формация переживает этап орогенеза с образованием сложной дисгармоничной складчатости. Совершенно иная история у платформенной карбонатной формации, которая обычно не испытывает ни глубоких погружений, ни значительного горизонтального сжатия, а слабо деформируется в ходе вертикальных колебательных движений плиты с образованием плакантиклиналей. Точно так же порфировая, по А.В. Пейве, или базальт-андезит-липаритовая, по Ю.А. Кузнецову, формация переживает орогенный этап развития геосинклинали и поствулканического изменения горных пород. Иначе складывается история базальтовой формации, возникающей при завершении вулканической деятельности орогена. Таким образом, формационная принадлежность горных пород сильно влияет на закономерности развития тектонической трещиноватости как механически через состав и структурные особенности формаций, так и исторически через специфические условия тектонического нагружения и деформирования каждой формации.

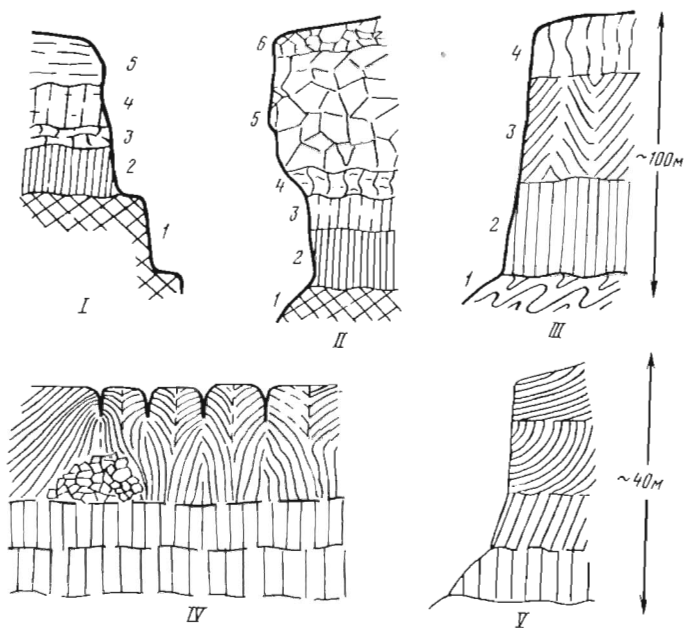
Гипергенные трещины образуются в горных породах под воздействием солнечной энергии, трансформированной различным образом на поверхности земной коры. Их строение определяется физико-геологическими условиями и рельефом местности, но также составом и структурой массива горных пород. Гипергенная трещиноватость наследует черты трещиноватости, сформированной ранее, поэтому и она зависит от формационной принадлежности горных пород. Поэтому следует согласиться с М.В. Рацем [1963, с. 154], что ”трещиноватость каждой осадочной (и не только осадочной. — С.Ч.) формации характеризуется сложным набором различных видов трещин, закономерности развития которых полностью для первичных трещин, в значительной степени для тектонических трещин и частично для гипергенных трещин определяются характером формации”.

Рассмотрим трещиноватость магматических горных пород основного ряда по их формационной принадлежности.

§ 4.1. Трещины базальтов

Базальты — одна из самых распространенных горных пород. Ю.А. Кузнецов [1964] выделяет две базальтовых формации — океаническую и континентальную. Петрографический состав их различается незначительно, но тектоническая обстановка и физико-географические условия образования различны. Это, в частности, находит выражение в совершенно различных формах отдельности.

Для континентальных базальтов характерна столбчатая, глыбовая, плитная, брекчиевидная и другие формы отдельности (рис. 33). Для маломощных потоков, верхних и передовых частей мощных потоков лавы типична глыбовая отдельность (рис. 20). Массив базальтов рассечен многочисленными хаотически расположенными трещинами. Сеть трещин непрерывная, т.е. трещины пересекаются. Они обычно образуют типичные для первичных сетей трехлучевые пересечения. Блоки отдельности имеют



Р и с. 33. Сочетание различных типов отдельности в лавовых потоках [Короновский, 1968]

I — Казбек, Чехерские потоки: 1 — субстрат, 2 — тонкие шестигранные призмы, 3 — глыбы, 4 — грубостолбчатая отдельность, 5 — плитчатая отдельность (единый поток); II — Эльбрус, поток Азау: 1 — субстрат, 2 — совершенная столбчатая отдельность, 3 — грубостолбчатая отдельность, 4 — неясная столбчатая отдельность, 5 — глыбовая отдельность, 6 — шлаковая корка (единый поток); III — лавы в долине р. Колумбии (США, по Спрау): 1 — субстрат, 2 — вертикальная столбчатая отдельность, 3 — наклонная столбчатая отдельность (единый поток); IV, V — лавовые потоки Эльбруса, Терскол



Р и с. 34. Трещины отрыва в базальтах долины р. Орхона (МНР)

остроугольную сложную форму. Поверхность граней блоков шероховатая, изогнутая и волнистая (рис. 34), что типично для трещин отрыва. Размеры глыб отдельности в поперечнике от 0,3 до 1,5 м. Глыбы, как правило, не соединены целиками породы. При тектонических деформациях и выветривании оживают существующие трещины, новых трещин практически не образуется, чему помимо непрерывного характера сети трещин несомненно способствует громадная прочность породы и сопротивление ее выветриванию. Вследствие выветривания и сейсмических деформаций на базальтах образуются глыбовые развалы — чингилы, как их называют в Армении.

Столбчатая отдельность наблюдается в нижних и средних частях базальтовых потоков, которые растрескивались в спокойной геодинамической обстановке после остановки потока. Наиболее совершенные по форме пяти- и шестигранные столбы встречаются во внутренних частях потоков мощностью 30–50 м [Толоконников, 1963]. В маломощных потоках столбы имеют менее совершенные формы. В лавовых покровах плато столбы имеют исключительно прямолинейную форму и вертикальное положение. В условиях пересеченного погребенного рельефа наблюдаются изгибы и наклоны столбов отдельности, которые в нижних частях потоков примерно перпендикулярны ложу, а кверху изгибаются, принимая вертикальное положение. Видимо, в нижней части потока трещины располагаются перпендикулярно фронту остывания в условиях гидростатического давления внутренней части потока. В дальнейшем, после затвердевания внутренних частей потока, направление трещин определяется направлением гравитации и положением кровли потока — трещины изгибаются и становятся вертикальными.

В мощных потоках базальтов, где столбы имеют высоту несколько десятков метров, можно наблюдать их скручивание, т.е. изменение простирания граней по длине вертикальной трещины, что свидетельствует об отсутствии различий в растягивающих напряжениях в плоскости, перпендикулярной оси столбов отдельности. Описаны также случаи проявления некоторой ориентированности трещин по простиранию [Толоконников, 1963], вызванной наложением на контракционное сжатие растягивающих напряжений по уклону подошвы потока. Поперечные горизонтальные трещины в столбах отдельности расположены неравномерно. Расстояние между ними колеблется от 0,1 до 5,0 м. Поверхности стенок трещин в базальтах обычно неровные: изогнутые и ступенчатые. Различной формы рубцы и ступени на поверхности вертикальных трещин обычно ориентированы горизонтально. Совокупность неровностей, развитых на разных гранях столба отдельности, приводит к пережествам и утолщениям столбов. Иногда наблюдаются закономерные ступенчатые утолщения столбов кверху или кверху. Н.В. Короновский [1968] связывает такие структуры на стенках со скачками в росте трещин.

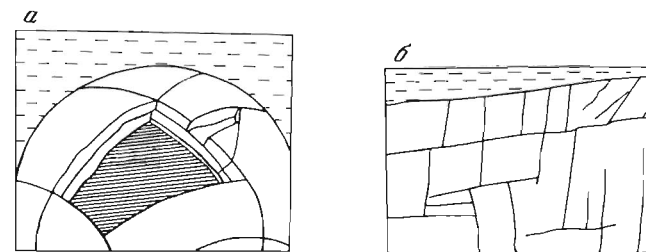
Сети трещин в базальтах континентальной формации даже вне зоны гипергенных изменений имеют на редкость большую трещинную пустотность. Она изменяется в зависимости от петрографического состава пород от 0,5 до 1,5%. Наибольшая трещинная пустотность характерна для плотных долеритовых базальтов со столбчатой и глыбовой отдельностью, наименьшая — для пористых гуфолов.

Наряду с двумя основными названными формами отдельности в базальтах континентальной формации на отдельных участках встречаются мелкопризматическая, плитчатая, брекчиевидная и сфероидальная формы отдельности. Мелкие призмы размером 10–20 см в поперечнике разделены тонкими трещинами. Ориентировка трещин на участке мелкопризматической отдельности меняется на протяжении нескольких метров. Массив с мелкопризматической отдельностью обычно имеет прерывистую сложную сеть трещин часто с веерообразными структурами. Прочность его зачастую выше прочности массива с нормальной столбчатой отдельностью. Аналогично в базальтах с брекчиевидной отдельностью сеть трещин прерывистая, трещины неправильной формы имеют раскрытие около десятых долей миллиметра. Базальты с мелкой брекчиевидной отдельностью обладают наибольшим сцеплением в массиве.

Экзогенные изменения сети трещин в базальтах обычно приводят лишь к расширению или сужению первичных трещин в локальных зонах концентрации экзогенных напряжений. Такие зоны могут быть связаны с тектоническими движениями по разрывам в ложе потока, с оползнями в породах, подстилающих базальты, ростом соляных куполов и т.п. Так, в Армении долина р. Азата прорезает базальты и подстилающие глины зоена [Тер-Степанян, Аракелян, 1973]. В глубине глинистой толщи развиваются деформации ползучести. На поверхности у борта каньона в базальтах возник крупный скальный оползень. В верхней части поверхность смещения сечет базальты. Вдоль нее блоки развернуты и разбиты сложной сетью новообразованных трещин. Первичные трещины в зоне смещения расширены.

В каньоне р. Раздана в Ереване лавы залегают на глинисто-гипсоносной толще, покрывающей мощные залежи каменной соли. На этом участке лавовый поток покрыт соляными куполами и оползнями, существовавшие на склонах куполов. Вследствие продолжающегося подъема куполов и медленных дифференцированных оползневых движений на их склонах, в лавах возникли зоны повышенной и пониженной водопроницаемости. Раскрытие трещин и повышение проницаемости отмечено в сводах куполов, над верховой и бортовыми трещинами погребенных оползней. Закрывание первичных трещин отмечено в межкупольных понижениях.

Базальты океанической формации отличаются от континентальных широким распространением шаровой отдельности, типичной для подводных эффузивов независимо от их состава. Молодые базальтовые лавы со сфероидальной отдельностью на месте их образования в Срединно-Атлантическом хребте наблюдал К. Ле Пишон [Риффо, Ле Пишон, 1970]. Остановимся на его уникальных наблюдениях. Наряду со сфероидами, полыми и монолитными, Ле Пишон описывает трубы переменного сечения с изгибами и раздувами. Сфероиды и трубы наиболее характерные формы поверхности лавовых потоков. В сфероидах четко видны концентрические и радиальные контракционные трещины (рис. 35, а). На поверхности труб трещины располагаются вдоль и поперек оси лавового потока, протекавшего по трубе. Интересно, что размеры обломков сфероидов на дне океана вне зон разломов имеют удивительно постоянную величину, что неоднократно подчеркивает К. Ле Пишон. Очевидно, базальт разрушается по первичным трещинам, расстояние между которыми при-



Р и с. 35. Сеть трещин в базальтах на поверхности полого сфероида (а) и на вертикальной плоскости обнажения в зоне трансформного разлома (б) Срединно-Атлантического хребта, глубина 2,7 км (схемы по фотографиям Ле Пишона)

мерно постоянно. В зоне трансформного разлома обломки базальтов в осыпи неоднородны по размерам. Наряду с отдельными крупными сцементированными глыбами встречается много мелких обломков. Трещины в стенке трансформного разлома прямолинейные и образуют характерные для системной сети параллелограммы (рис. 35, б). Таким образом, в современных базальтовых лавах на дне Атлантического океана наблюдаются характерные черты первичной и тектонической трещиноватости. Для первичной отмечаются однородность сети, малая протяженность и радиально-концентрическая ориентировка трещин. Для тектонической — неоднородность дробления, системная ориентировка трещин.

В базальтах на дне Атлантического океана К. Ле Пишоном встречена также призматическая отдельность. Вероятно, она возникает, как и на континенте, во внутренних частях мощных лавовых потоков, которые изолированы от контакта с океаном.

§ 4.2. Трещины пород трапповой формации

Трапповая формация распространена на многих платформах Земли. Она принадлежит к числу наиболее распространенных, хорошо изученных и определенно обособленных формаций магматических горных пород. Траппы представляют как чисто научный, так и практический интерес. Они образуют покровы, силлы, дайки, представлены туфовой, лавовой и интрузивной фашиями. Типичные горные породы трапповой формации — туфы, долериты, габбро, пикриты, порфириты и другие. Изучение трапповой формации много дает для понимания механизма магматических инъекций и излияний в платформенных условиях. В этом отношении наряду с изучением формы магматических тел и дифференциации пород в интрузии важное значение имеет изучение трещиноватости. Практическое значение изучения траппов определяется тем, что с ними связаны месторождения железных, медных, никелевых и других руд, исландского шпата, графита. С другой стороны, участки выхода на поверхность трапповых интрузий в долинах рек оказываются наиболее удобными для строительства крупных электростанций. Изучение трещиноватости траппов ведется для инженерно-геологических целей в связи с разработкой месторождений и строительством гидроэлектростанций.

Трещины горных пород платформенной трапповой формации описаны

в ходе тематических исследований формации А.П. Лебедевым [1955], детально изучены при проектировании и строительстве Братской, Усть-Илимской, Богучанской, Хантайской гидроэлектростанций геологами Ленинградского и Московского отделений Гидропроекта, а также при разведке и эксплуатации месторождений руд для Норильского и других ГОК Сибири. По материалам этих исследований ниже описываем основные черты трещиноватости трапповой формации.

Туфогенная фация траппов Сибири представлена туфами, туфобрекчиями, туффитами и туфопесчаниками, которые перемежаются в разрезе с типичными осадочными породами и базальтами. Трещиноватость этих пород хаотическая, неравномерная. У вулканических бомб радиальные трещины сочетаются с концентрическими, создающими скорлуповатую отдельность. Особенно характерна скорлуповатая отдельность для лапиллиевых и агломератовых туфов. Наряду с этими в агломератовых туфах имеются жилообразные полосы с продольной трещиноватостью. Для туффитов и туфопесчаников характерны признаки слоистости и связанной с ней ориентировки трещин напластования, а также поперечных к ним первичных трещин.

Лавовая фация имеет отдельности столбчатую, характерную для толеитовых диабазов, и тонкостолбчатую, характерную для долеритов и базальтов. Столбчатая отдельность часто переходит в розетковидную, когда у длинных тонких призматических тел наблюдается общее радиально-лучистое расположение с трещинами, расходящимися из одного центра, что свойственно лавовым языкам на участках их раздува или вспучивания. Крупноглыбовая или призматическая отдельность свойственна грубозернистым толеитовым и долеритовым типам лав, мелкоглыбовая отдельность встречается у афанитовых лав и мандельштейнов. Шаровая отдельность свойственна преимущественно туффитовым и туфовым образованиям. Встречаются лавы с шарами 0,5-1,5 м. Они образовались, очевидно, в прибрежной обстановке. Плоскости ограничения потоков неравны. Их положение влияет на наклон столбов отдельности. Мощность потоков невелика и колеблется от 1,2 до 12 м. Заметна связь толщины столбов с мощностью лавового покрова: чем больше мощность покрова, тем реже трещины.

Интрузивная фация траппов не может быть по петрографическим признакам, а следовательно, и по условиям образования резко отделена от эффузивной фации. Трещиноватость ее также имеет немало общего с трещиноватостью эффузивов. Интрузивные траппы залегают в форме сложных ступенчатых и многоэтажных силлов с куполовидными вздутиями и апофизами в форме даек, лакколитов, штоков и др.

Трещиноватость интрузивных тел в значительной мере обусловлена формой. Один из первых исследователей траппов Сибири К.И. Богданович [1896] писал об интрузивных траппах, что "они обнаруживают троякого рода отдельности: или весьма развитую столбчатую, или шаровую, или, наконец, пластовую". "Отдельности — пластовая, матрацевидная, часто гранитного типа, например, около Берендинского порога на р. Уфе, столбчатая и шаровая придают породам одного и того же геологического ряда совершенно иную наружность" (с. 237). В этих очень точных наблюдениях К.И. Богдановича отмечена основная особенность трещиноватости

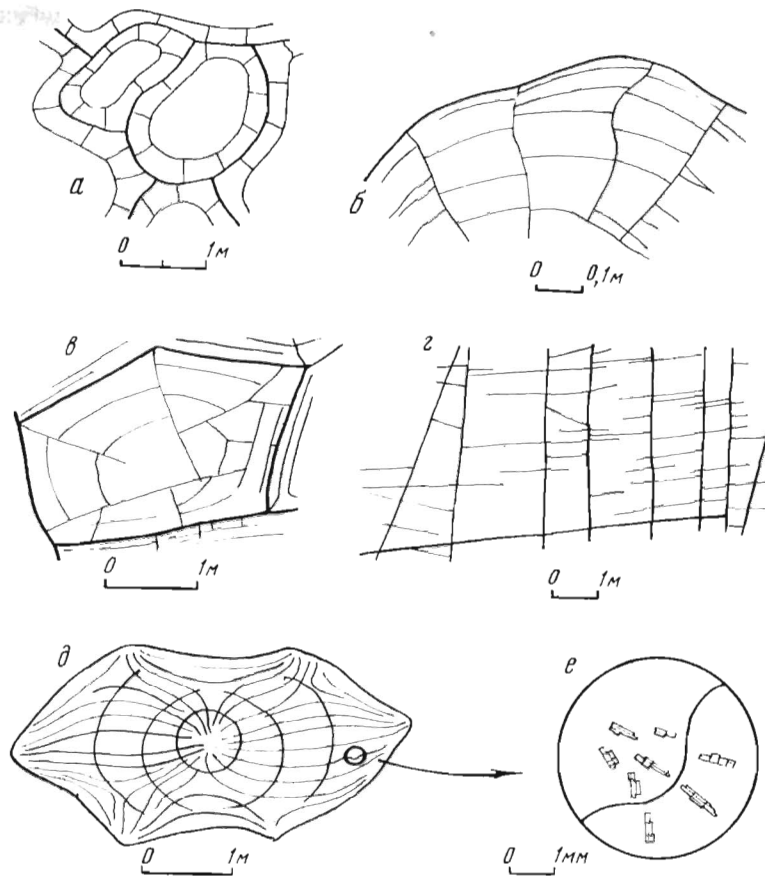
ти интрузивных траппов — сходство ее с трещиноватостью глубинных интрузивных пород (габбро) и эффузивов. В его описании не названа одна из распространенных форм отдельности — глыбовая отдельность, обусловленная хаотической трещиноватостью.

Классическая столбчатая отдельность типична для полого залегающих крупных тел типа силлов и лакколитов. Столбы, как правило, имеют развитую поперечную систему трещин. Столбчатая отдельность в сочетании с пластовой характерна для мощных линзо- и лакколитовидных тел, имеющих многоступенчатое строение: они сложены из ряда горизонтов мощностью 10-15 м каждый с собственной системой вертикальной столбчатой отдельности. Высота столбов варьирует от 1 до 40 м, а сечение столбов в поперечнике от нескольких десятков сантиметров до 5-8 м. Сечение столба находится в тесной связи с положением в теле интрузии — в центральной части столбы толще и с зернистостью долерита — в средне- и крупнозернистых долеритах столбы толще, чем в мелкозернистых. Это указывает на зависимость толщины столбов от скорости остывания магматического тела. В мощных телах, где остывание шло медленнее, крупнее кристаллы минералов и толще столбы отдельности. Изгибы и наклоны столбов отдельности в гипабиссальных трапповых интрузиях наблюдаются так же, как и в эффузивах.

Отличие первичной трещиноватости силлов со столбчатой отдельностью от трещиноватости базальтов можно видеть по крайней мере в трех особенностях: 1) трещины гипабиссальных тел обычно залечены гидротермальными минералами — кальцитом и др.; 2) гексагональное сечение столбов не столь типично для интрузивных траппов; 3) внутри блоков отдельности имеется сеть трещин второй и третьей генерации, что особенно характерно для столбов с поперечником 3-5 м. Такие столбы отдельности не отмечаются в эффузивах, остывающих значительно быстрее пород интрузивной фации.

Поперечное сечение столбов имеет сложную форму. Трещины, ограничивающие столбы и глыбы, часто изогнуты. В горизонтальном направлении протяженность их невелика и составляет от десятых долей метра до 10-15 м. В вертикальном направлении трещины столбчатой отдельности прослеживаются на десятки метров. Однако они состоят из многих изогнутых и пересекающих трещин. Эти трещины полностью или частично отделяют от стенок чешуи и линзы долерита толщиной 1-5 см и длиной 10-50 см. Длина трещин в горизонтальном сечении часто превышает поперечное сечение столба, так что одна трещина служит ограничением для ряда соседних столбов. Это типично для интрузивных траппов и редко встречается в лавах. Благодаря повышенной длине трещин в долеритах чаще встречаются четырехлучевые пересечения, чем в лавах, и более распространена четырехгранная форма столбов, чем пяти- и шестигранная.

Последовательные генерации трещин внутри столбов отмечал А.П. Лебедев [1955] и подробно исследовал П. Холл [P. Hill, 1965] в Тасмании. По их данным и наблюдениям автора, внутри столбов отдельности видны радиальные и концентрические вертикальные трещины, которые расчленяют мощный столб с площадью поперечного сечения более 10 м² на несколько малых столбов (рис. 26). Трещины второй генерации — тонкие, изогнутые. Они следуют вдоль краев столбов и здесь особенно много-



Р и с. 36. Мелкие трещины внутри трапповых столбов
a, б, в, д – поперечное сечение столбов, *г* – продольное; *e* – расположение кристаллов пироксена у трещины (*a, б* – по А.П. Лебедеву [1955]; *д, e* – по Р. Хиллу [1965])

численны. Возможно, это связано с выявлением их выветриванием, которое особенно активно у широкой трещины первой генерации. Внутри столба уходят трещины, которые условно можно назвать радиальными, по А.П. Лебедеву, или криволинейными, по П. Хиллу. Отдать предпочтение той или иной генерализации статистически неоднородной структуры трудно. Теоретически более оправданной, исходя из симметрии поля напряжений, представляется гипотеза А.П. Лебедева о радиальном и концентрическом расположении тонких трещин внутри столба отдельности. Внутри блоков, отчлененных трещинами второй генерации, иногда встречается тончайшая сеть трещин третьей генерации. По форме она подобна предыдущей сети, но длина и ширина трещин почти на порядок меньше. В системе горизонтальных трещин, расчленяющих столбы отдельности на плитки и блоки высотой от 0,1 до 3 м, последовательные генерации не отмечаются.

По наблюдениям П. Хилла (рис. 35, *e*), кристаллы пироксена в долеритах ориентированы перпендикулярно мелким трещинам своими длинными осями. Видимо, образование трещин происходило до полного отвердевания породы. Есть указания на подобную же ориентировку кристаллов в базальтах.

Плитчатая отдельность, образованная преобладающими в массиве трещинами одной системы, параллельной контакту интрузии, сменяет столбчатую в зоне эндоконтакта мощностью от одного до нескольких метров. В этой же зоне, а также в зоне передового клина интрузии часто встречается глыбовая отдельность, образованная сетью коротких пересекающихся трещин хаотической ориентировки. Глыбовая отдельность долеритов аналогична таковой базальтов. Сходство распространяется даже на раскрытие трещин. В зоне глыбовой отдельности у контакта интрузии с вмещающими породами имеются открытые трещины и встречаются пустоты типа пещер. Образование пустот, видимо, связано с продвижением перед затвердевшей магмой газо-парового или жидкого водяного клина, раздвигающего вмещающие породы [Кузнецов, 1964]. При подобном механизме интрузий возможно образование подземных глыбовых скоплений типа "чингилов", описанных в базальтах.

Сфероидальную отдельность в интрузивных долеритах также можно объяснить образованием пустот в земной коре в зоне интрузии. Автору приходилось наблюдать блоки со скорлуповатой отдельностью в подошве силла у его переднего клина в устье р. Карапчанки на Ангаре. Блоки со скорлуповатой отдельностью находились среди глыб долерита неправильной формы. Как те, так и другие были слабо выветрены.

§ 4.3. Трещины габбро

Рассмотрев трещины эффузивов и гипабиссальных интрузивов основного состава, обратимся к глубинным интрузивным телам того же состава. Рассмотрим формацию дифференцированных габбровых и норитовых интрузий [Кузнецов, 1964]. Крупные интрузии этой формации похожи на дифференцированные, наиболее глубинные интрузии трапповой формации. Как и траппы, они сопровождаются гранитоидными породами – гранофирами или гранитами, залегающими в кровле тел основных пород. Близкими оказываются структурные условия и характер рудной минерализации тех и других. Главные отличия сводятся к размерам интрузивных тел и степени их дифференциации, которая зависит от скорости остывания и, в конечном счете, от глубины, на которой кристаллизуется магма. Отличия в размерах тел и скорости остывания самым существенным образом сказываются на различии внутренней структуры и трещиноватости основных горных пород двух сравниваемых формаций.

Формация дифференцированных габбровых и норитовых интрузий представлена пластовыми телами, залегающими в слабо дислоцированных толщах древних, архейских и протерозойских платформ. Размеры пластовых тел разнообразны. Их мощность от нескольких десятков до нескольких тысяч метров, но типичны для этой формации крупные тела, что отличает ее от трапповой формации.

В составе пород преобладают габбро, нориты и диабазы. Встречаются

пироксениты, перидотиты, дуниты и анортозиты. Все эти основные и ультраосновные породы являются продуктами глубокой дифференциации магмы в камере интрузии. В кровле интрузии иногда встречаются секущие тела кислого состава. Появление их Ю.А. Кузнецов связывает с плавлением вмещающих пород. Контактные изменения горных пород и их трещиноватости прослеживаются на большие расстояния.

Рассмотрим строение и трещиноватость одного из массивов формации дифференцированных габбровых и норитовых интрузий по материалам работ [Мазаник и Макаров, 1970; Алексеев, 1978]. Дифференцированный основной-ультраосновной массив Пильгуярви расположен в пределах центрального участка восточного рудного узла Печенгского рудного поля на Кольском полуострове. Он залегает среди пород туфогенно-осадочной толщи, приурочен к одной из грабен-синклиналей и ограничен на флангах внутриформационными разломами. Он имеет пластообразную форму и расположен субпараллельно слоям вмещающих пород (рис. 37). Угол падения кровли и подошвы массива $45-55^\circ$. Массив снизу вверх состоит из серпентинизированных перидотитов и серпентинитов (средняя мощность 140 м), пироксенитов и габброидов. Мощность последнего дифференциата составляет 175-415 м, что близко к 60% общей мощности интрузива. Зона ороговивания у контактов не превышает 10 м. Возраст массива — архей, около 1890 млн. лет.

Тектонические деформации массива вместе с вмещающими породами привели к формированию в нем разрывных нарушений и структуры типа флексуры.

В сети первичных трещин устанавливаются системы продольных трещин, вытянутых вдоль линейных структур пород (система *S* Клооса), поперечная система *Q*, перпендикулярная линейным структурам, и пластовые трещины системы *L*, как правило, параллельные нижнему контакту массива. Эта параллельность показывает, что развитие трещиноватости шло от нижнего контакта, с которым растрескивающаяся порода была, видимо, связана жестким раскристаллизованным массивом. В то же время выше зоны растрескивания еще находились подвижные более легкие дифференциаты магмы, которые отделяли зону растрескивания от верхнего контакта. Первичные трещины залечены жильными образованиями, генетически связанными с основной-ультраосновной магмой: габбро-пегматитами и дайками габбро-диабазов.

В сети трещин выделяются контракционные тектонические и гипергенные трещины. Контракционные трещины распределены равномерно по пространству массива. Они возникли в полностью раскристаллизованном, но не метаморфизованном массиве, судя по составу заполнителя. Поздние тектонические трещины формировались в условиях пластических деформаций. Трещиноватость распределена неравномерно и локализована у тектонических разрывов. Трещины образовались в метаморфизованном массиве. Трещины разгрузки и выветривания в зоне гипергенеза лишь омолаживают древнюю сеть трещин. Влияние гипергенеза прослеживается до глубины 30 м.

Интересно отметить различие первичной трещиноватости ультраосновных и основных пород в теле одного интрузива. Как и в Толстомысовской интрузии траппов (см. § 4.4), поздние дифференциаты, здесь габбро, отличаются по трещиноватости от ранних, ультраосновных (табл. 27). Системы трещин в габбро, перидотитах и пироксенитах одни и те же. Но в габбро трещины всех систем расположены более равномерно и более выдержаны по ориентировке. Расстояние между трещинами в габбро больше, чем в ультраосновных породах менее крупной зернистости. Все это говорит о том, что габбро кристаллизовались последними при установившемся и замедленном теплообмене интрузива с вмещающими породами. Их кристаллизация и растрескивание происходили после успокоения механических движений в раме. Ранее образовавшиеся ультраосновные породы обладают повышенной дисперсией трещиноватости, что свидетельствует о повышенной подвижности рамы. Интересно, что в центральной части массива, сложенной габбро, имеются монолитные блоки размером 8-14 м³. Здесь растрескивание происходило наиболее поздно и наиболее медленно. Аналог этой зоны массива Пильгуярви есть и в Толстомысовской трапповой интрузии на глубине 7 м от ее кровли. В то же время в центральной части интрузии имеются замкнутые зоны повышенной трещиноватости мощностью 10-15 м

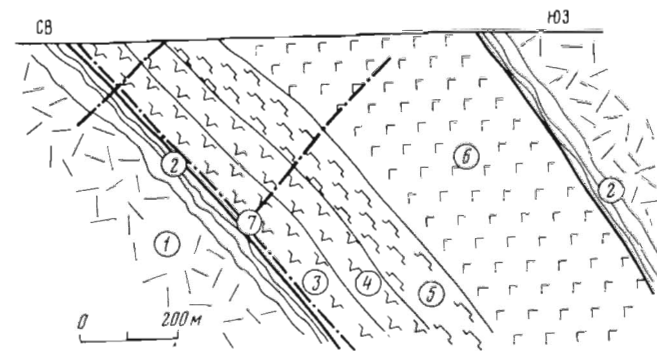


Рис. 37. Схематический геологический разрез массива Пильгуярви

1 — вмещающие вулканические породы; 2 — роговики; 3 — серпентиниты; 4 — серпентинизированные перидотиты; 5 — пироксениты; 6 — габбро; 7 — продольные и поперечные тектонические разрывы [Алексеев, 1978]

без заметного смещения по трещинам. Такие зоны имеются и в сибирских траппах, в частности они характерны для Падунского силла, на котором стоит Братская ГЭС. В траппах такие зоны описывают А.П. Лебедев [1955] и П. Хилл [1965].

Блочность горных пород массива Пильгуярви в среднем по массиву для сохранных и трещиноватых зон различна.

Для перидотитов и серпентинизированных пироксенитов средний расчетный объем блока 0,22-0,27 м³, а максимальный выход блоков объемом более 1,5 м³ от объема вскрыши 2,0-7,0%, для габбро соответственно 0,35 м³ и около 30%.

В зонах разрывных нарушений в массиве Пильгуярви трещины сгущаются в 1,5-2,0 раза. Появляются новые системы трещин. Трещиноватость ультраосновных пород в зоне флексуры перегиба интрузива отличается от трещиноватости вышеописанных зон более сложным характером. Изменяется ориентировка основных систем. Они поворачиваются вслед за изменением пространственного положения горных пород. Значительно сокращаются расстояния между трещинами. Они достигают значений 0,30; 0,47 и 0,31 м против 0,56; 0,53 и 1,20 м для тех же трех систем в сохранных зонах. У контакта в зоне флексуры появляются новые системы трещин. Число их достигает шести-семи. Таким образом, в массиве Пильгуярви наблюдается закономерность роста неоднородности сети трещин к контакту и к зонам тектонических деформаций.

Тектоническая трещиноватость габбро носит те же черты, что и трещиноватость ультраосновных пород, но проявлены они менее четко. Число систем повышается лишь до четырех-пяти против трех в сохранных зонах, а среднее расстояние между трещинами снижается до 0,45-0,50 м. Видимо, различия габбро и ультраосновных пород в зонах тектонического дробления унаследованы от сети первичных трещин. Иначе это объяснить трудно, так как различия горных пород по механическим свойствам незначительны.

В целом, сеть трещин в интрузии основного-ультраосновного состава имеет много общего с трещиноватостью батолитов Клооса и с трещиноватостью трапповых силлов.

Основные черты трещиноватости магматических пород. Сети трещин эффузивных и глубинных интрузивных тел существенно различны. В эффузивах преобладают полигональные, сфероидальные и хаотические сети трещин непрерывного или прерывистого типа. Системные сети встречаются как редкое исключение. Трещины часто открытые. В глубинных интрузивных телах преобладают системные сети трещин, как исключение

Таблица 27

Трещиноватость горных пород вие зон тектонического дробления

Горные породы	Номер системы трещин	Параметры систем трещин для горных пород		
		азимут	угол падения	среднее расстояние между трещинами, см
Перидотиты серпентинизированные, пироксениты	1	180-200	60-80	0,56
	2	35-60	35-60	0,53
	3	310	70	1,20
Габбро	1	215-230	30-60	0,61
	2	40-55	50-55	0,40
	3	315-320	68-80	1,40

встречаются хаотические. Сети первичных трещин прерывистые или разорванные. Трещины заполнены гидротермальными образованиями. Трещиноватость гипабиссальных тел разнообразна: на одних участках она сходна с трещиноватостью эффузивов, на других — с трещиноватостью глубинных горных пород.

Тектонические и гипергенные изменения сети трещин в связи с высокой прочностью горных пород происходят в значительной степени унаследованно. В магматических породах дизъюнктивные нарушения преобладают над пликативными. Складки лишь пологие. Обычно они осложняются разрывами. Основные черты тектонической трещиноватости магматических горных пород: прямолинейный характер зон повышенной трещиноватости, сгущение трещин одной системы, милонитизация и дробление горных пород по трещинам, наличие открытых трещин и связанная с ними большая водопроницаемость участков тектонической трещиноватости.

Положение зон с различным строением сети трещин в эффузивных и интрузивных массивах контролируется формой магматического тела и косвенно коррелировано с составом и структурой горных пород. Строение сети трещин изменяется от границ магматического тела внутрь. При удалении от контакта обычно трещины разреживаются, сеть по всем параметрам становится регулярнее.

Наблюдения последовательных генераций трещин в трапповых силлах подтверждают выводы о закономерной смене параметров трещин во временной последовательности, сделанные в предыдущей главе.

Главные отличия сетей трещин в магматических горных породах от сетей трещин осадочных пород: широкое распространение разорванных и прерывистых сетей трещин в глубинных интрузивных породах; большее, чем в осадочных породах, разнообразие сетей трещин, а именно, распространение хаотических сетей трещин и системных сетей с неортогональными системами; наличие первичной микротрещиноватости или делимости по скрытым трещинам. В осадочных породах сходная в механическом смысле делимость обуславливается кливажем, возникающим при тектонических деформациях.

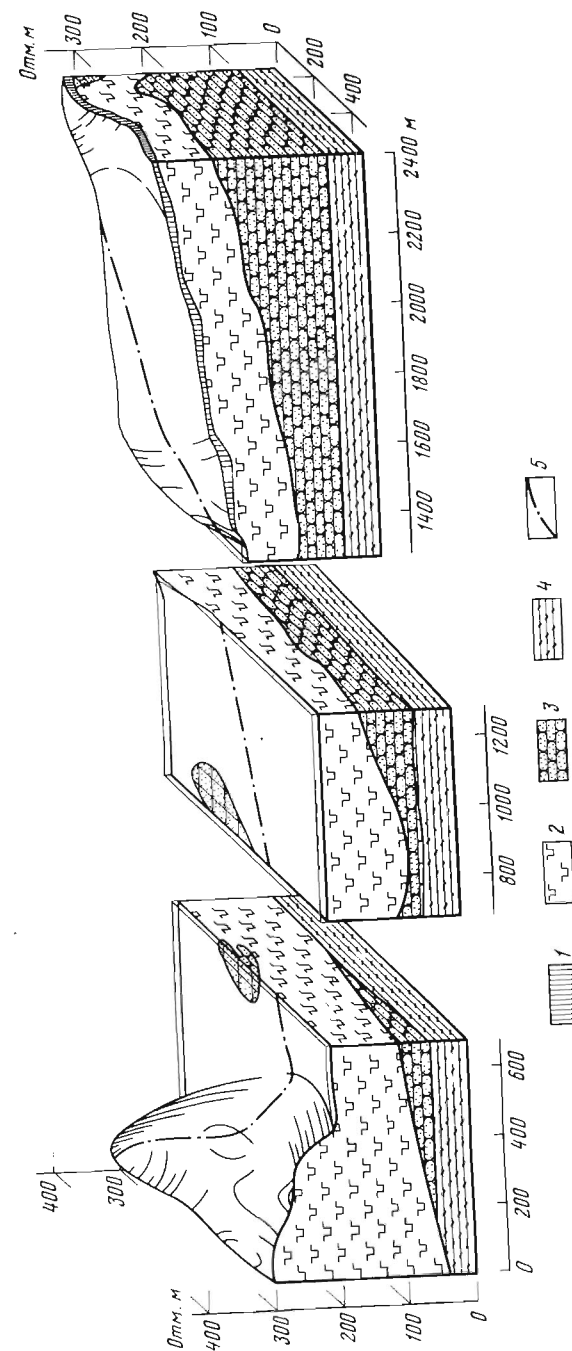


Рис. 38. Толстомысовский трапповый силл
1 - четвертичные отложения; 2 - долерит; 3 - песчаники; 4 - алевролиты; 5 - ось плотины

§ 4.4. Трещины Толстомысовского траппового силла

Многие закономерности, описанные в данной главе, могут быть иллюстрированы материалом исследования трещин Толстомысовского траппового силла.

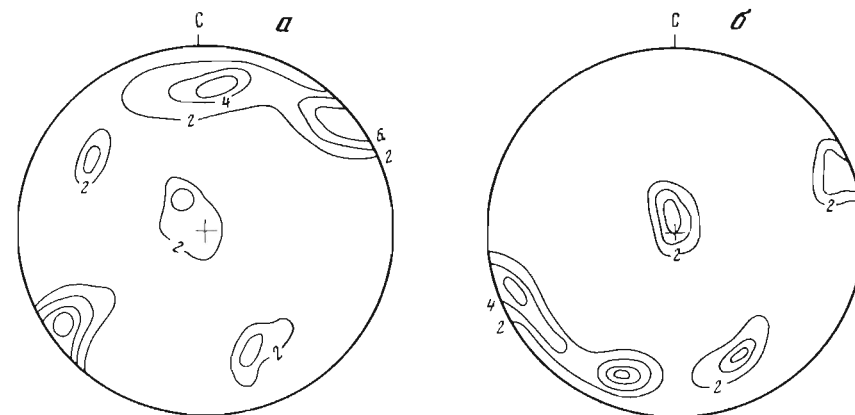
Геологическое строение. Толстомысовский трапповый силл обнажен в среднем течении р. Ангары. На поверхность выходит мощная трапповая интрузия триасового возраста, которая местами перекрыта осадочными породами тушамской и катской свит. В схематическом виде геологическое строение участка представлено на блок-диаграмме (рис. 38). Правобережье, русловая часть и левобережье сложены пластом долеритов переменной мощности 60–100 м. Кровля силла почти полностью обнажена рекой, при этом сами долериты размывом почти не затронуты. На левом берегу в пределах холма Толстый мыс находится участок вздутия интрузии. Мощность ее здесь превышает 250 м. Отпрепарированное эрозией вздутие представляет собой холм. Сравнительно плоская вершина холма располагается на отметках 100–120 м над рекой. Она осложнена в центральной части прогибом, в котором сохранились осадочные породы, а в северной части поднятием, достигающим отметки 140 м над урезом воды в реке.

Два из трех склонов вздутия отпрепарированы эрозией и представляют собой крутые склоны холма, обрывающиеся к реке. Третий, не менее крутой склон обращен к левому берегу и почти полностью скрыт под массивом осадочных пород, слагающим седловину между берегом и долеритовым холмом. Во все стороны от описанного вздутия, с которым связан подводящий канал интрузии, траппы распространяются в виде невыдержанного по мощности пласта, осложненного гораздо менее значительными утолщениями и пергибамми. В русле реки мощность долеритов уменьшается по косому направлению через реку от левого берега к правому и из нижнего бьефа в верхний. У левого берега в нижнем бьефе мощность 160 м, у правого берега в верхнем бьефе силл выклинивается. На правом берегу так же, как и в русле, подошва траппов поднимается в юго-восточном направлении. Максимальных отметок, превышающих урез воды в реке на 50 м, она достигает в юго-восточном углу описываемой площади. Здесь она сближается с кровлей настолько, что местами между ними остается всего несколько метров.

Петрография долеритов Толстомысовского силла подробно описана Г.Д. Феоктистовым [1961]. Они представляют собой кристаллическую зернистую темно-серую с зеленоватым оттенком или почти черную горную породу, состоящую главным образом из моноклинного пироксена и основного плагиоклаза. Размеры кристаллов варьируют от долей миллиметра до нескольких миллиметров, обычно же они не превышают 1 мм. Кристаллы различных минералов в породе расположены беспорядочно (массивная текстура), реже образуют скопления, придавая породе пятнистый вид. Кристаллы пироксенов заполняют промежутки между кристаллами плагиоклазов. При этом размеры кристаллов пироксенов либо равны размерам кристаллов плагиоклазов (офитовая структура), либо значительно превосходят их (пойкилоофитовая структура). Кроме названных главных породообразующих минералов в породе содержатся второстепенные минералы — оливин, кварц и калинатровый полевой шпат ("гранофир"), титаномагнетит, марказит и др. В долеритах Толстого мыса четко проявлена дифференциация. В них ясно выделяется верхняя зона, обогащенная гранофировым материалом, и нижняя зона, содержащая больше оливина (троктолитовые диабазы Г.Д. Феоктистова). Эти зоны разделяются зоной нормальных по составу долеритов. Такие же нормальные долериты залегают вдоль контакта траппов с осадочными породами. Только в непосредственной близости от контакта долериты представлены порфиоровыми и микропорфиоровыми разновидностями.

Благодаря указанной зональности представляется возможным реконструировать первоначальную форму интрузива по сохранности тех или иных зон. Эта реконструкция подтверждает высказанную выше мысль о том, что Толстомысовский трапповый силл лишь в небольшой степени затронут эрозией. Выветривание постепенно изменяет долериты, превращая их в конечном счете в "рухляк" или глину. По степени изменения пород зона выветривания разделена на зоны А, Б и В. Выветривание в траппах развито слабо. Оно проявляется главным образом в изменении сети трещин.

Сеть первичных трещин. Основными этапами растрескивания для траппов среднего Приангарья и, в частности, Толстомысовского силла были: а) первичное растрескивание, связанное по времени с остыванием интрузии; б) экзогенное растрескивание,



Р и с. 39. Круговые диаграммы трещиноватости траппов в пластовой части Толстомысовской интрузии в съемочных точках 46 (а) и 47 (б)
Изолинии плотности точек на диаграмме даны в процентах

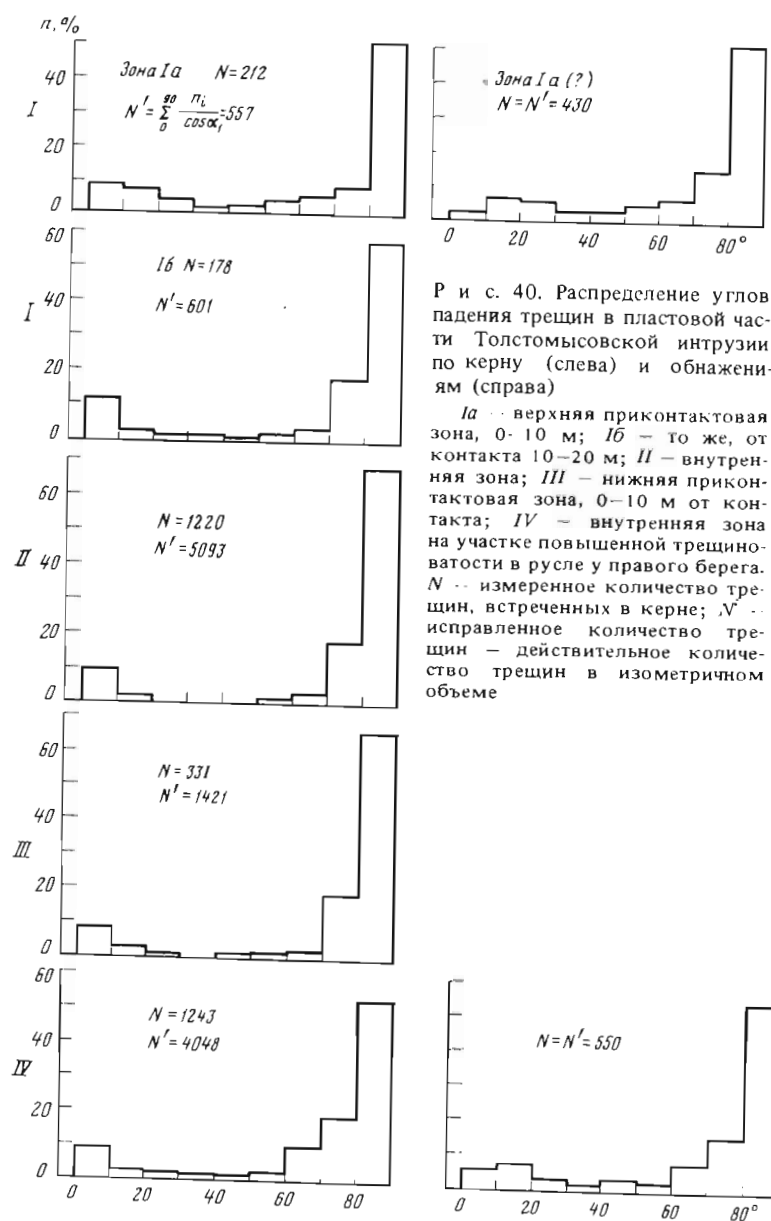
связанное с временем формирования современной денудационной поверхности. Исследования трещиноватости Толстомысовского силла и проведенные ранее исследования трещиноватости Падунского силла [Тиздель, 1962] показали, что тектоническое растрескивание здесь не проявилось, поскольку на платформе после внедрения интрузии господствовала спокойная тектоническая обстановка.

Основой для описания трещиноватости служат статистически обработанные результаты многочисленных измерений ориентировки - азимутов падения и углов падения трещин, расстояния между трещинами, их ширины, длины, шероховатости, а также описания их заполнителя. Всего обмерено 14 000 трещин. При этом выполнено 33 000 измерений.

Отличительной особенностью первичных трещин является заполнение их кальцием и хлоритом, которые отлагаются из гидротермальных растворов, генетически связанных с трапповой магмой. Присутствие в трещинах рассматриваемого силла гидротермальных минералов можно считать руководящим признаком для отнесения этих трещин к первичным. Выделенная по этому признаку совокупность трещин обладает кроме того другими специфическими особенностями.

Ориентировка первичных трещин в траппах Толстомысовского силла подчиняется основным закономерностям, характерным для трещиноватости траппов. В пластовой части интрузии резко преобладают вертикальные и горизонтальные трещины, образующие столбчатую и другие виды отдельности. На рис. 39 приведены круговые диаграммы трещиноватости для пластовой части интрузии. На них видны системы трещин с субвертикальными и субгоризонтальными углами падения. Это разделение трещин по углам падения неизменно прослеживается по всей пластовой части интрузии. По простиранию разделение трещин на системы значительно менее четко.

Разделение трещин по углам падения на две группы — субвертикальные и субгоризонтальные наиболее отчетливо во внутренней части интрузии, сложенной нормальными офитовыми и оливиновыми троктолитовыми долеритами. Здесь практически отсутствуют трещины с углами падения от 30 до 50° (рис. 40). Трещины с углами падения от 70 до 90° составляют около 85% от общего количества трещин. Около 12% составляют трещины с углами падения менее 30°. По мере приближения к контактам интрузии разнообразие углов падения трещин несколько нарастает. Так, на расстоянии 10–20 м от верхнего контакта, где залегают обычно гранофирные долериты, практически встречаются трещины с любыми углами падения. Доля субвертикальных и субгоризонтальных трещин несколько снижается. Трещины с углами падения от 70 до 90° составляют здесь 75% от общего числа трещин, т.е. на 10% меньше, чем во внутренней части интрузии. Еще большее разнообразие углов падения трещин отмечается



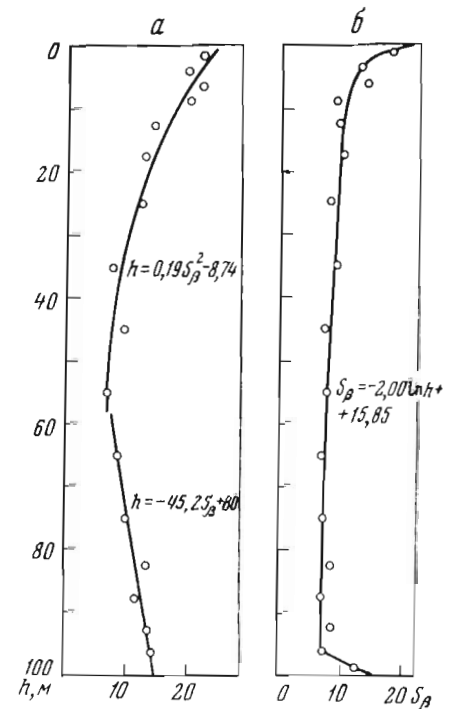
Р и с. 40. Распределение углов падения трещин в пластовой части Толстомысовской интрузии по керну (слева) и обнажениям (справа)

Ia — верхняя приконтактная зона, 0–10 м; Ib — то же, от контакта 10–20 м; II — внутренняя зона; III — нижняя приконтактная зона, 0–10 м от контакта; IV — внутренняя зона на участке повышенной трещиноватости в русле у правого берега. N — измеренное количество трещин, встреченных в керне; N' — исправленное количество трещин — действительное количество трещин в изометричном объеме

непосредственно у контакта (интервал 0–10 м) в тонко- и микрзернистых офитовых долеритах и долеритах-порфиритах. Здесь субвертикальные трещины с углами падения от 70 до 90° составляют около 60%, т.е. на 25% меньше, чем во внутренней части интрузии. По мере приближения к нижнему контакту разнообразие углов падения трещин тоже увеличивается, однако здесь это увеличение выражено значительно слабее.

Для более точной количественной оценки изменчивости углов падения трещин в разрезе силла было рассчитано стандартное отклонение углов падения трещин

Р и с. 41. Изменение в разрезе интрузии среднего квадратичного отклонения углов падения субгоризонтальных (а) и субвертикальных трещин (б); расстояние от верхнего контакта h, мощность силла 100 м



от математического ожидания. За математическое ожидание для системы субгоризонтальных трещин был принят угол падения $\beta = 0$, для субвертикальных трещин $\beta = 90^\circ$. Изменения стандартных отклонений с глубиной показаны на рис. 41. Отчетливо видна тенденция к уменьшению стандарта s_{β} по мере удаления от контакта. Характер изменений s_{β} для субвертикальных и субгоризонтальных трещин различен. По-разному идут изменения у верхнего и нижнего контактов. Изменения у верхнего контакта удачно аппроксимируются показательными и логарифмическими функциями.

Теснота связи для субвертикальных трещин оценивается корреляционным отношением $\eta_{s/h} = 0,63$. Теснота связи для субгоризонтальных трещин оценивается значением $\eta_{s/h} = 0,76$. Судя по графикам, влияние верхнего контакта на ориентировку трещин прослеживается почти до самого нижнего контакта и нарушается в связи с влиянием нижнего контакта лишь в 2,5–3,0 м от него. Для субгоризонтальных трещин указанная связь прослеживается до середины интрузивного пласта или несколько глубже.

Изменения s_{β} у нижнего контакта как для субгоризонтальных, так и для субвертикальных трещин менее значительны, чем изменения у верхнего контакта. Для субвертикальных трещин, как видно из графика, изменение настолько слабо, что не представляется возможным говорить обоснованно об аппроксимации его какой-либо определенной функцией. Для субгоризонтальных трещин изменения носят гораздо более четкий характер. Влияние нижнего контакта на ориентировку субгоризонтальных трещин прослеживается на 40–45 м от контакта. Убывание s_{β} по мере удаления от контакта носит линейный характер. Теснота связи s_{β} с h оценивается коэффициентом корреляции $r = 0,84$, отличным от нуля с надежностью $P = 0,99$.

Заканчивая рассмотрение углов падения трещин в разрезе пластовой части интрузии, можно отметить: 1) по углам падения трещины четко разделяются на субвертикальные и субгоризонтальные; 2) разброс углов падения, оцениваемый стандартным отклонением, является минимальным во внутренней части интрузии, по направлению к нижнему контакту он возрастает линейно; 3) влияние верхнего контакта на ориентировку трещин заметно сильнее, чем нижнего; 4) изменение ориентировки субвертикальных трещин у контактов происходит гораздо более резко, чем субгоризонтальных, во внутренней части интрузии ориентировка субвертикальных трещин гораздо более стабильна, чем субгоризонтальных.

Увеличение разнообразия углов падения трещин в пластовой части интрузии наблюдается не только в разрезе при перемещении из внутренней части интрузии к контактам, но и в плане при перемещении от средней части поля интрузии к его краям. При приближении к краевым частям интрузии усложняется форма интрузивного пласта, появляются изгибы и пережимы пласта. С этими изменениями формы интрузии связано некоторое усложнение ориентировки трещин. Распределение трещин по углам

падения в этой части интрузии показано на рис. 40, IV. Здесь, как и в других местах интрузивного пласта, преобладают субвертикальные и субгоризонтальные трещины, однако даже в удалении от контакта практически встречаются трещины любых направлений.

По простиранию субвертикальные трещины в пластовой части интрузии группируются в две взаимно перпендикулярные системы. При переходе от точки к точке в плане простирание этих систем несколько меняется. Господствует простирание субвертикальных трещин на СВ и ЮЗ. Трещины этих же направлений отмечены как главные при исследовании траппов в основании Вилюйской и Братской ГЭС. Их можно рассматривать как основной фон планетарных трещин, на котором появляются аномалии, связанные с местными особенностями поля напряжений. В Толстомысовском силле эти аномалии довольно многочисленны. Выдержанные по простиранию системы вертикальных трещин можно проследить в пределах отдельных участков интрузии.

Один из таких участков расположен в месте правобережного примыкания русловой плотины. Здесь субвертикальные трещины образуют две системы, одна из которых имеет азимут простирания $320-340^\circ$, а другая - азимут простирания около $60-80^\circ$. Эти системы трещин можно было наблюдать на бечевнике правого берега на протяжении примерно километра, а также по всей ширине русла Ангары в котлованах. Характерно, что на этом участке, по данным ВЭЗ и бурения, интрузивный пласт имеет выдержанное падение и простирание и не осложнен вздутиями и перегибами (рис. 39). Одна из систем вертикальных трещин ориентирована по падению пласта, другая вдоль его простирания. Эти системы в соответствии с номенклатурой Г. Клооса можно назвать продольной (S) и поперечной (Q). Следует полагать, что выдержанность простирания трещин является прямым следствием выдержанности положения пласта, благодаря которой на всем протяжении рассматриваемого участка в момент первичного растрескивания существовало сравнительно однородное анизотропное поле напряжений. На соседнем участке вверх по реке интрузивный пласт не имеет выдержанного положения в пространстве, он изогнут и осложнен перегибами. Здесь в настоящее время обнажаются более глубокие части интрузии, чем на рассмотренном участке. В съемочных точках, расположенных в 30-50 м друг от друга, простирание систем вертикальных трещин различно.

В пределах каждой отдельно взятой съемочной точки здесь же фиксируется значительно менее четкое разделение субвертикальных трещин по углам падения, чем на рассмотренном ранее участке.

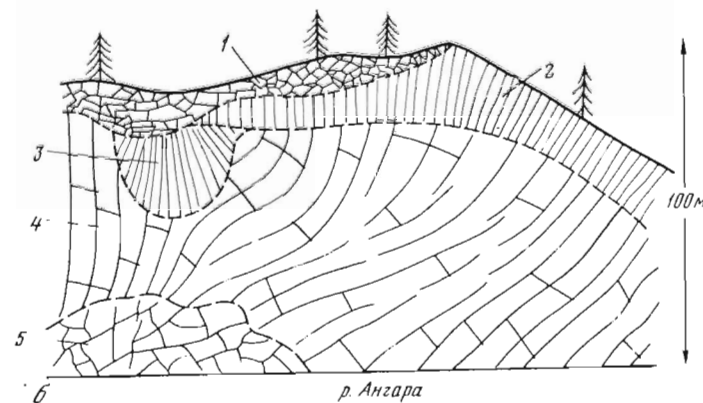
В куполе интрузии трещины расположены веерообразно, что характерно для траппов (рис. 42). У контакта сеть трещин хаотическая (рис. 43), образующая мелкую глыбовую отдельность, либо системная (рис. 44), образующая тонкую плитчатую отдельность. На расстоянии нескольких метров от контакта сеть трещин приобретает системную или полигональную форму. Сечение столбов увеличивается к центру купола. В центральной части купола трещины ориентированы хаотически. Системы трещин в обнажениях едва намечены. Если же они улавливаются в какой-либо точке, то в соседней точке отмечаются другие системы.

В зоне столбчатой отдельности выделяются две системы крутых трещин и трещина пологих. Во взаимном распределении систем трещин имеется тенденция к образованию прямых углов между плоскостями трещин. Блоки отдельности благодаря этому имеют форму, близкую к прямоугольной, как и в пластовой части интрузии. Системы трещин, ограничивающие блоки отдельности, определенным образом ориентированы относительно кровли интрузии. В непосредственной близости от контакта пологие трещины ориентированы параллельно кровле; по мере углубления внутрь интрузии угол падения их меняется. Они занимают положение промежуточное между горизонтальными и параллельными контакту. Одна из систем крутых трещин, которую можно условно считать продольной, имеет простирание, параллельное простиранию контакта, а падение - противоположное падению контакта. Эта система трещин занимает промежуточное положение между вертикалью и плоскостью, перпендикулярной контакту. Другая система крутых трещин простирается перпендикулярно контакту. Трещины этой системы условно можно назвать поперечными. Углы падения трещин системы обычно близки к вертикальным.

Приведенная схема трещиноватости куполовидной части интрузии является весьма упрощенной. В действительности картина распределения трещин значительно сложнее. Кроме главных систем трещин имеются обычно дополнительные системы. Во взаим-



а



Р и с. 42. Общий вид внутренней части куполовидного вздутия Толстомысовского силла

а - фотография; б - схема; 1 - глыбовая отдельность у контакта; 2 - мелко-столбчатая; 3 - веерообразная; 4 - крупностолбчатая; 5 - глыбовая центральной части куполовидного вздутия

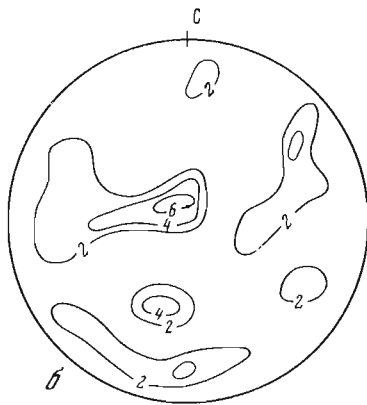
ном расположении систем трещин и положении их относительно контакта также постоянно наблюдаются значительные отклонения от приведенных закономерностей.

Частота трещин в траппах, как и ориентировка, изменяется при переходе от одной части интрузии к другой. Эти изменения подчиняются общим для траппов закономерностям. Расстояние между соседними пологими и субгоризонтальными трещинами изменяются, как и ориентировка трещин, по мере перехода от внутренних частей интрузивного пласта к периферии (рис. 45). Во внутренней части интрузивного пласта пологие трещины расположены относительно редко, в среднем через 0,5-0,6 м, у контактов они сгущаются в среднем вдвое. Сгущение трещин к контактам идет параллельно с изменением петрографического состава пород. Вследствие этого различные по петрографическому составу долериты обладают разной частотой трещин (табл. 28).

У нижнего контакта интрузии изменение частоты горизонтальных трещин идет линейно в зоне эндоконтакта, мощность которой составляет 20% от мощности силла. Теснота связи оценивается коэффициентом корреляции $r = 0,72$. Влияние верхнего



а



Р и с. 43. Хаотическая сеть трещин в центральной части куполовидного вздутия

а — фотография; б — диаграмма, изолинии плотности точек в процентах

контакта на частоту горизонтальных трещин прослеживается на глубину до 80 м, т.е. на 80% мощности силла. Здесь связь менее четкая. Мы аппроксимировали ее параболой. Теснота связи оценивается корреляционным отношением $\eta_a/h = 0,49$.

Изменение частоты субвертикальных трещин подчиняется несколько иным закономерностям. Прежде всего обратим внимание на очень малые расстояния между трещинами практически по всей мощности интрузии. Обычные для траппов сечения столбов

и блоков значительно больше. Проведено исследование на керне колонковых скважин, где выявлены все мелкие трещины второй и более поздних генераций, расположенные внутри трапповых столбов (см. рис. 36). Поэтому полученные значения расстояний между трещинами меньше обычных, видимых на обнажениях, где выделяются крупные трещины первой генерации.

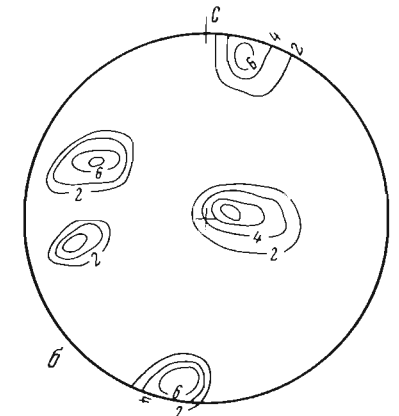
У нижнего и верхнего контакта субвертикальные трещины сгущены, как и субгоризонтальные. С удалением от нижнего контакта вплоть до 15–20 м трещины разреживаются. Далее в тело интрузии влияние нижнего контакта не распространяется. Во внутренней части интрузии в интервале глубин 30–80 м от верхнего контакта изменения частоты вертикальных трещин незначительны. У верхнего контакта зависимость частоты трещин от расстояния до контакта носит сложный характер. В пределах верхних 5 м трещины сближены. Это можно отнести как за счет влияния контакта, так и за счет выветривания, так как денудационная поверхность совпадает с контактом. Расстояния между трещинами в пределах верхних 5 м увеличиваются с глубиной и достигают на глубине 5–7 м максимального значения 44 см. Ниже расстояния между трещинами убывают по кривой типа гиперболы, что отражает особенности первичной трещиноватости.

Изменение дисперсии углов падения горизонтальных трещин, изменение расстояний между трещинами по мере удаления от контактов, различия трещиноватости в куполе и в пластовой части интрузии и другие закономерные изменения трещиноватости объясняются эволюцией напряжений в различных частях интрузии.



а

Р и с. 44. Системная сеть трещин у контакта в куполовидном вздутии



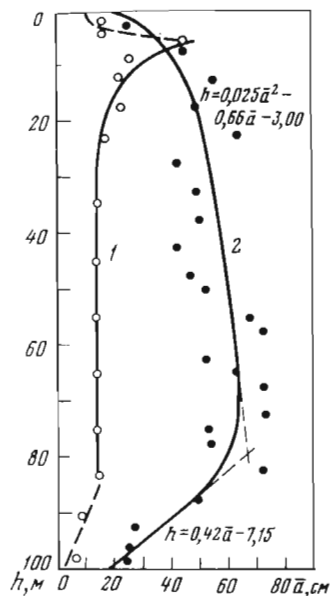
Исходя из морфологии сети первичных трещин Толстомысовской интрузии, можно предположить следующую схему первичного растрескивания.

Растрескивание начинается у обоих контактов сразу после кристаллизации порфировых микродolerитов в период кинематической и динамической активности магмы и рамы. Рост трещин у нижнего контакта идет медленнее, чем у верхнего, и, возможно, с некоторого момента вовсе прекращается. Трещины, растущие снизу, распространяются на нижние 15–20% мощности силла. Трещины, растущие сверху, пронизывают всю интрузию до встречи с трещинами, растущими снизу. Ранее для других силлов установлено, что рост горизонтальных трещин отстает от роста вертикальных. Это находит новое подтверждение. Горизонтальные трещины образуются в условиях менее однородных, чем вертикальные трещины, поэтому дисперсия параметров горизонтальных трещин больше, чем дисперсия параметров вертикальных трещин.

Кинематическая и динамическая активность верхнего и нижнего контактов существенно различна. Верхний контакт, видимо, был более подвижен. Он значительно сильнее и дольше, чем нижний, влияет на ход растрескивания. Отток теплоты от верхнего контакта интенсивнее.

Гипергенные изменения сети трещин. Последний этап растрескивания рассматриваемой трапповой интрузии, и вообще ангарских траппов, связан с выходом их на поверхность и, следовательно, со снятием гравитационной нагрузки, с выветриванием и нарушением устойчивости на склонах. В бортах долины и ее днище деформации проявляются по-разному, поэтому целесообразно рассмотреть их отдельно.

В траппах, слагающих борта долины, можно наблюдать трещины бортовой разгрузки, рвы отседания, оползни, т.е. все известные типы деформаций склонов, сложенных скальными породами. Развитию бортовой разгрузки благоприятствует специфика трещиноватости. В траппах, как отмечалось, преобладают первичные трещины, близкие к вертикальным и горизонтальным. В процессе разгрузки пород они расширяются, образуя полости, параллельные склону. Так, у бечевника в обрывах Падунского и



Р и с. 45. Изменение среднего расстояния между трещинами в разрезе пластовой части интрузии

h — расстояние от верхнего контакта, $h = 100$ м — положение нижнего контакта; 1 — вертикальные трещины, 2 — горизонтальные

Толстомысовского сужений, по наблюдениям в штольнях, на глубину 5–7 м вглубь склона вертикальные трещины, параллельные склону, расширены до нескольких сантиметров против 0,01–1 см в глубине массива. На большей глубине раскрытые трещины не встречены.

Подробное исследование зоны бортовой разгрузки выполнено в штольне № 1. Штольня пройдена на левом берегу в месте перехода от куполовидной части интрузии к пластовой части. По всей глубине штольни прослеживаются одни и те же системы трещин, положение которых соответствует положению первичных трещин. Дополнительных систем трещин при разгрузке не возникает. Наиболее четко системы трещин выделяются в приустьевой части штольни. По мере углубления разнообразие ориентировки несколько нарастает, что хорошо вяжется с представлениями о первичной трещиноватости куполовидного вздутия. Как было отмечено, при переходе от поверхности

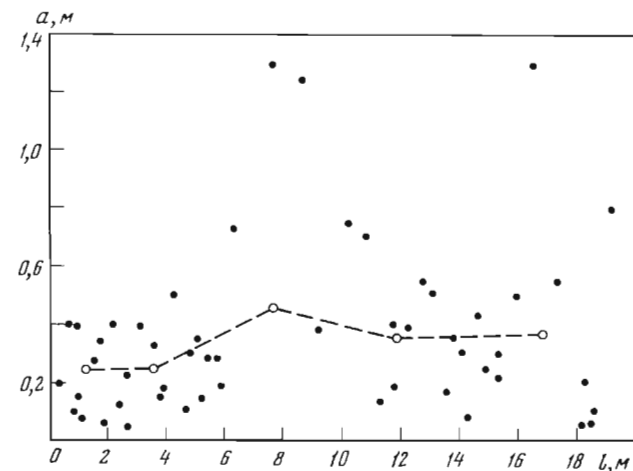
куполовидного вздутия к его внутренним частям разнообразие ориентировки трещин увеличивается. Штольня проходит именно таким образом, что приустьевая часть ее находится близ контакта. Забой же приближен к центральной части купола.

Расстояние между трещинами по глубине штольни не изменяется заметно ни в одной из систем (рис. 46). Ширина трещин подвержена большей изменчивости. В системе трещин, примерно параллельной борту долины, изменения ширины видны наиболее отчетливо (рис. 47). Средняя ширина трещин закономерно снижается по глубине штольни до 5 м, а далее остается примерно постоянной. Характерной чертой графика можно считать большое разнообразие ширины трещин в приустьевой части штольни. Изменение по интервалам выборочной дисперсии, характеризующей разброс точек, показано на специальном графике. Как можно увидеть, дисперсия ширины трещины закономерно снижается внутрь склона. Следовательно, разгрузка идет за счет все большего и большего расширения одних и тех же трещин, тогда как другие вообще не расширяются. Видимо, в данном случае количество первичных трещин превышает количество трещин, необходимых для разгрузки. Поэтому новые трещины не закладываются, и даже из существующих трещин не все расширяются. В других системах изменение ширины трещин у поверхности выражено значительно слабее (субвертикальные трещины) или совсем незаметно (пологие трещины).

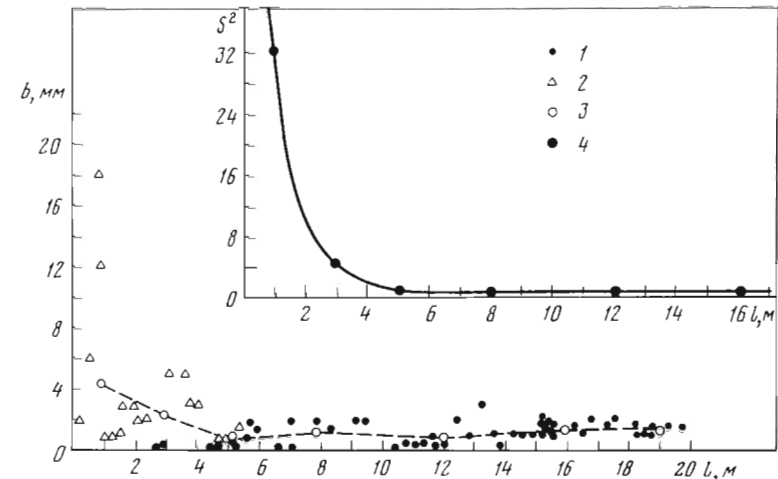
Т а б л и ц а 28

Частота пологих (угол падения от 0 до 20°) трещин в долеритах разного петрографического состава

Петрографические разности	h , м	Количество пологих трещин	a ср. м
Офитовые I	20	72	0,28
Гранофировые	180	341	0,53
Офитовые II	250	520	0,49
Гроктолитовые	354	611	0,58
Офитовые III	65	221	0,30
Всего	869	1775	—



Р и с. 46. Изменение расстояний между вертикальными трещинами, примерно параллельными склону по длине штольни



Р и с. 47. Изменение по длине штольни ширины трещины и ее дисперсии в системе примерно параллельной борту долины Ангары

1 — трещины без следов выветривания; 2 — со следами выветривания; 3 — средняя ширина трещины; 4 — дисперсия ширины

На зарисовке штольни показан заполнитель трещин и видно, что характер заполнения изменяется по мере приближения к поверхности в связи с развитием выветривания. На глубине заполнитель представлен исключительно кальцитом и хлоритом, что указывает на присутствие здесь лишь первичных трещин. В приустьевой части штольни эти, сравнительно легко выветриваемые минералы изменены, заменены и вынесены. Трещины приустьевой части заполнены суглинком, окислами железа, водой и воздухом. Трещины, несущие признаки выветривания, треугольниками выделены на графиках изменения ширины трещин по глубине штольни. Можно видеть, что выветривание по трещинам распространяется глубже, чем их расширение.

По трещинам, расширенным в процессе бортового отпора, в отдельных случаях развивается отседание. В траппах оно происходит так же, как в осадочных породах, для которых этот процесс подробно описал Н.И. Соколов [1961]. При отседании образуются отторженцы, параллельные склону, отделенные от него рвами шириной до 10 м и глубиной до 15 м. Такие рвы можно наблюдать на северном склоне г. Невон у одноименной деревни, в Бадарминском сужении, у дер. Воробьево и в других местах.

В Бадарминском сужении процессу отседания склонов помимо специфики трещиноватости траппов способствуют некоторые особенности геологического строения. Интрузивы траппов на этом участке имеют сравнительно малые мощности и полностью прорезаны рекой. В русле эрозией везде вскрыты вмещающие траппы терригенные породы каменноугольного возраста. В значительной части разреза эти породы настолько слабы, что не держат стенок колонковых скважин и ольпьяют. В этих условиях, когда нижняя часть борта долины сложена слабыми породами, а верхняя - пластами траппов, идет подмыв бортов и смещение траппов в сторону русла с разрывом сплошности интрузии по вертикальным первичным трещинами. В результате оба борта долины Ангары в Бадарминском сужении на 2-3 км в сторону от реки сложены грядами оползней, а русло вдвое уже, чем в остальных сужениях.

Н.И. Соколов [1961] называет такие оползни глыбовыми оползнями ангарского типа. Он отмечает их по долине Ангары и по долинам ее притоков Оки и Илима в осадочных породах. Отседание и оползание траппов, прорезанных рекой, отмеченное в Бадарминском сужении, не представляет собой исключительного явления. Его можно наблюдать по берегам Ангары в устье р. Каменной, р. Карапанки и в других местах.

Описанные нарушения в траппах приурочены к бортам долины. Вследствие эрозионной разгрузки возникают и деформации в дне долин. Изучение этих нарушений осложнено тем, что они, в большинстве своем, расположены под руслом и недоступны непосредственному наблюдению. Однако именно это местоположение делает их изучение особенно важным для гидротехнического строительства. Выделяются два типа деформаций разгрузки. Деформации первого типа захватывают всю мощность интрузивного пласта. Их описал Р.Р. Гиздель [1962]. Он связывает их образование с изломом пласта под влиянием упругого расширения подстилающих его пород. Деформации второго типа развиваются в верхних 30 м породы. Оба типа деформации в Братске ввиду малой мощности траппов в русле сильно переплетаются. Раздельно эти типы деформации легко рассмотреть на примере Толстомысовского силла.

Прежде всего о наличии зоны разгрузки с открытыми трещинами свидетельствует увеличение к поверхности водопроницаемости пород. Она прослеживается вполне четко. В зоне открытых трещин ориентировка трещин в сравнении с ориентировкой в частях интрузии, не затронутых разгрузкой, не меняется. Несколько изменяется частота субгоризонтальных трещин, т.е. частота трещин, параллельных поверхности эрозионного вреза. Частота субвертикальных трещин, т.е. трещин перпендикулярных поверхности вреза в зоне разгрузки, видимо, не увеличена. Как отмечалось, в связи с совпадением эрозионной поверхности с верхним контактом интрузии, трудно говорить о причине изменения густоты трещин с глубиной. Изменениям в донной зоне разгрузки, как и в бортовой зоне, подвержен заполнитель трещин. Вместо кальцита и других гидротермальных минералов, заполняющих все трещины вне зоны разгрузки и выветривания, у эрозионной поверхности трещины заполнены суглинком, песком, окислами железа, водой.

На дне реки прослеживались трещины длиной 10-50 м. Ширина трещин в системе северо-западного простирания изменялась от 1 до 5 см, в системе северо-восточного простирания достигала 70 см. Трещины были раскрыты на глубину до 0,5-1,5 м в значительной степени за счет выветривания и выноса мелкоплитчатых долеритов, образующихся при первичном растрескивании вдоль крупных первичных трещин первой генерации.

Рассмотрение трещиноватости траппов Толстомысовской интрузии и отчасти других интрузий района приводит к выводу, что их трещиноватость, наблюдаемая ныне, сложилась в ходе первичного растрескивания и отчасти изменена в процессе разгрузки. Основные черты трещиноватости траппов объясняются ходом первичного растрескивания и ходом экзогенных деформаций без привлечения представлений о тектонических деформациях траппов.

Трещиноватость силла по косвенным данным. Прямые методы измерения параметров трещин дают всестороннюю характеристику сетей трещин. Построенные на таких из-

мерениях модели трещиноватости пригодны для решения разных задач инженерной и структурной геологии. Однако слабая обнаженность, отсутствие горных выработок зачастую не позволяют провести в достаточном объеме измерения параметров трещин. Особенно трудно бывает получить истинную характеристику ширины трещин и пустотности массива из-за искажений, накладываемых выветриванием на естественных обнажениях и взрывами на искусственных. Поэтому наряду с прямыми измерениями трещин большую практическую ценность представляют определения трещиноватости косвенными методами: по поглощению воды стволом скважины, по скорости распространения упругих волн, по наблюдениям за направлением и скоростью подземных потоков, по гидрохимическим наблюдениям.

Косвенные методы исследования трещиноватости были применены при изучении Толстомысовского силла. Они позволили выявить и очертить зоны с увеличенным раскрытием трещин.

Нагнетаниями, а затем сейсмическим профилированием под руслом Ангары выявлена зона повышенной трещиноватости долеритов. Она характеризуется снижением скорости распространения упругих волн и повышением удельных водопоглощений до 10-100 л/мин при обычных значениях водопоглощений для траппов порядка 0,001 л/мин. Повышенная трещиноватость здесь вызвана раскрытием субвертикальных трещин до глубины 30-50 м и местными учащениями этих трещин. В направлении вверх по реке зона повышенной трещиноватости расширяется в связи с уменьшением мощности силла. Вниз по реке мощность силла растет (рис. 38) и зона повышенной трещиноватости выклинивается. Повышенная трещиноватость здесь связана с местом перегиба силла, участком снижения его мощности. Она вызвана изломом силла при эрозионной разгрузке. В зоне глубокой деформации разгрузки имеются отдельные линзообразные тела мелко раздробленных долеритов протяженностью 3-6 м шириной около 40-70 см. Такие участки характеризуются пониженными скоростями продольных волн и поэтому обнаруживаются при сейсмическом профилировании.

Помимо выявления отдельных трещиноватых зон косвенные методы позволяют оценить изменение трещиноватости по пространству массива. Обратимся к анализу результатов нагнетаний в колонковые скважины. Они позволяют определить обнаженную ширину зоны повышенной водопроницаемости у контакта интрузии. На графике (рис. 48) по оси ординат вверх отложено расстояние от контакта во вмещающие породы, а вниз - в сторону траппов. Вмещающие породы представлены песчаниками и алевролитами угленосной тунгусской серии. По оси абсцисс отложен показатель водопроницаемости в форме $\lg K_{\Phi}$. Коэффициенты фильтрации взяты по данным одиночных позонных откачек из колонковых скважин, а также по данным одиночных нагнетаний.

Как видно на графике, водопроницаемость пород имеет максимальное значение у контакта и постепенно снижается по направлению внутрь интрузивного тела и внутрь массива осадочных пород, стремясь при этом к определенным значениям, характерным для неизмененных осадочных и изверженных пород. В приконтактной части водопроницаемость характеризуется средним геометрическим значением $K_{\Phi} = 0,7$ м/сут. В сторону осадочных пород она снижается на протяжении 20 м до значения порядка $K_{\Phi} = 0,1$ м/сут и на протяжении следующих 20 м до значений порядка $K_{\Phi} = 0,05$ м/сут. В сторону изверженных пород водопроницаемость снижается на протяжении 15-20 м до величины $K_{\Phi} \approx 0,002$ м/сут и далее остается постоянной. Теснота связи $\lg K_{\Phi}$ с расстоянием от контакта характеризуется по 30 точкам корреляционным отношением $\eta = 0,51$ для осадочных пород и для траппов по 40 точкам корреляционным отношением $\eta = 0,85$. Надежность отличия η от нуля в обоих случаях превышает $P = 0,99$.

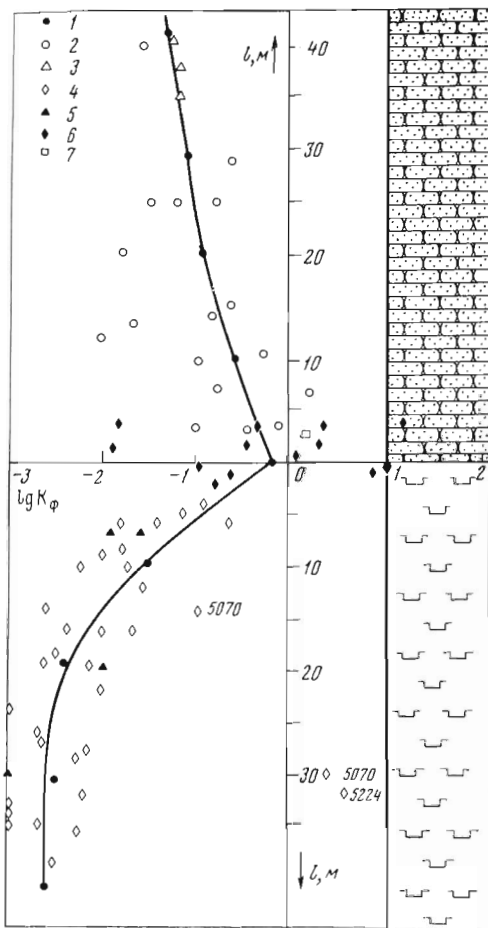
Связь средних показателей водопроницаемости с расстоянием от контакта может быть аппроксимирована уравнениями следующего вида:

$$\lg K_{\Phi} = -1,3 \ln(h + 30) + 4,21,$$

для траппов

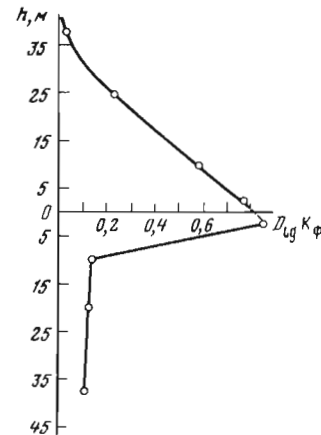
$$\lg K_{\Phi} = -0,88 \ln h + 0,52.$$

Судя по степени корреляции, водопроницаемость вмещающих пород хотя и уменьшается в сторону от траппов, слабо зависит от расстояния до контакта. Для траппов же увеличение водопроницаемости у контакта - явление почти повсеместное. В целом по графику можно заключить, что у контакта трапповой интрузии имеется зона по-



Р и с. 48. Изменение водопроницаемости по глубине у контакта траппов с осадочными породами
1 - средние значения K_f по интервалам глубины; 2 - индивидуальные результаты; 3 - в осадочных породах близ нижнего контакта интрузии; 4 - в траппах близ нижнего контакта; 5 - то же, близ верхнего контакта интрузии; 6 - в интервалах, захватывающих осадочные породы и траппы - нижний контакт; 7 - то же, верхний контакт

Р и с. 49. Дисперсия водопроницаемости у контакта



вышенной водопроницаемости. Можно определить ширину этой зоны при любой заданной водопроницаемости с необходимой степенью вероятности. Так, зона с коэффициентом фильтрации $K_f \geq 0,1$ м/сут составляет в среднем около 20 м, а с коэффициентом фильтрации порядка 1,0 м/сут около 4 м.

В основном график построен по данным, полученным у нижнего контакта пластового тела. На график нанесены также результаты опытов, проведенных у верхнего контакта, где не исключено влияние выветривания. Результаты опытов, проведенных в зоне выветривания, на график не наносились. По совпадению полей распределения точек для верхнего и для нижнего контактов можно заключить, что условия водопроницаемости у обоих контактов сходны между собой.

На рис. 49 приведен график изменения дисперсии $lg K_f$. Как видно, в осадочных породах от контакта вглубь массива дисперсия линейно снижается вплоть до 25-30 м от контакта. В траппах в 10-40 м от контакта дисперсия водопроницаемости остается примерно постоянной. Особняком лежит лишь точка, характеризующая интервал 5-0 м от контакта. Она лежит на линии графика для осадочных пород. Изменение дисперсии $lg K_f$ в экзоконтакте может быть объяснено следующим образом. Повышенная водопроницаемость пород экзоконтакта связана с тем, что они потревожены активной магмой. Возмущения распространялись от контакта, по мере удаления от

которого они и затухали. Характерно, что первые порции раскристаллизованной магмы (интервал 0-5) подвергались динамическому воздействию со стороны основной массы расплава совместно с вмещающими породами. Основная масса интрузии кристаллизовалась уже в более спокойной динамической обстановке. Соответственно здесь менее значительны изменения дисперсии водопроницаемости.

В зоне выветривания и разгрузки необходимо определить, как это сделано для приконтактной зоны, мощность зоны, в которой изменена водопроницаемость, и характер изменения водопроницаемости. Статистическим путем эти задачи могут быть решены на основе анализа однородной совокупности результатов опытов. Возьмем для анализа результаты опытно-фильтрационных работ, проведенных в одной породе и в одинаковых условиях выветривания: совокупность результатов, полученных под руслом реки, где выветриваются долериты внутренней части пластового тела. Водопроницаемость незатронутой выветриванием породы под руслом не является постоянной. Она изменяется по разным причинам таким образом, что на отдельных участках водопроницаемость невыветрелых пород больше, чем водопроницаемость выветрелых на других и наоборот. Если осреднять столь неоднородную совокупность, то, вероятно, изменение водопроницаемости под влиянием выветривания будет затухать при обобщении. Чтобы при такой неоднородности выявить влияние выветривания на водопроницаемость, следует анализировать не показатель водопроницаемости (q или K), как это делалось при рассмотрении приконтактной зоны, а изменение водопроницаемости под влиянием выветривания. Изменение водопроницаемости можно оценить отношением K/K_{cp} , где K - коэффициент фильтрации, полученный при отдельных одиночных откачках из колонковой скважины, а K_{cp} - среднее значение коэффициента фильтрации для невыветрелых пород по данным той же скважины. Аналогично можно применить q/q_{cp} , где q - удельное водопоглощение в л/мин в отдельном интервале скважины, а q_{cp} - то же в среднем по скважине для невыветрелых пород.

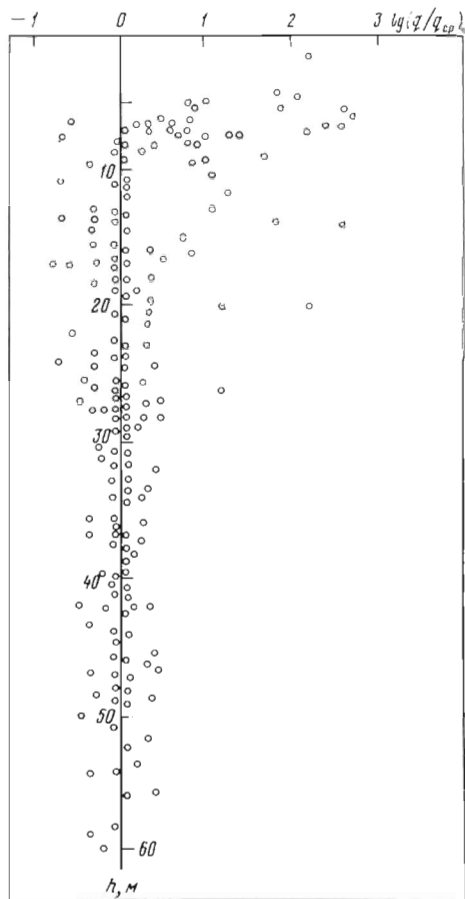
Изменение водопроницаемости по глубине от эрозионной поверхности показано на рис. 50. Здесь по оси ординат отложена глубина в м, а по оси абсцисс показатель изменения водопроницаемости, выбранный выше. Этот показатель нанесен в логарифмическом масштабе, поскольку в этой форме он имеет распределение, наиболее близкое к нормальному. Рассматривая поле распределения, можно видеть, что большинство экспериментальных точек группируется близ $lg(q/q_{cp}) = 0$, т.е. обычно $q \sim q_{cp}$. Следовательно, можно констатировать по графику в целом очень слабое влияние разгрузки и выветривания на изменение водопроницаемости в пределах рассматриваемого участка. Однако в верхней части графика наблюдаются значительные отклонения отдельных значений от $lg(q/q_{cp}) = 0$. В одних случаях удельное водопоглощение увеличивается в 1000 раз вследствие раскрытия трещин, в других уменьшается почти в 100 раз вследствие их коагуляции. В целом в верхней части графика среднее значение $lg(q/q_{cp}) > 0$. Это указывает на увеличение водопроницаемости под влиянием выветривания. Однако рассев точек в этой части графика настолько велик, что связь водопроницаемости с глубиной невелика. Коэффициент корреляции, подсчитанный на основе 190 испытаний, составляет 0,33.

Связь может быть аппроксимирована уравнением вида $lg(q/q_{cp}) = -a \ln(h+b) + c$, где h - расстояние от эрозионной поверхности, a, b, c - некоторые положительные числа.

Рассев точек неодинаков для разных глубин. Измененные формы распределения с глубиной видно на графике изменения дисперсии с глубиной (рис. 51). Здесь по оси абсцисс отложена дисперсия индивидуальных значений $lg(q/q_{cp})$, подсчитанная по отдельным интервалам глубины, а по оси ординат h - глубина в м. Точки на графике располагаются так, что образуют ломаную линию из двух отрезков. В интервале глубин от 0 до 30 м лежит отрезок с уравнением $s^2 = 1 - 0,03 h$.

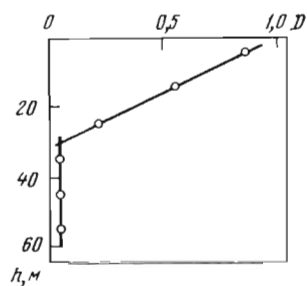
В интервале от 30 до 60 м лежит отрезок графика с уравнением $s^2 = 0,05$. Постоянство дисперсии ниже 30 м указывает на неизменность здесь условий эксперимента. Можно сделать вывод, что ниже 30 м влияние разгрузки и выветривания не распространяется. Выше 30 м условия эксперимента, как можно видеть по графику, изменяются: по мере приближения к дневной поверхности с постоянным приращением возрастает неоднородность условий. Максимально неоднородные условия наблюдаются у поверхности траппов непосредственно под аллювием, мощность которого до 1,0 м.

Рассмотренные зоны повышенной водопроницаемости у контакта и в зоне выветри-



Р и с. 50. Изменение показателя водопроницаемости $\lg(q/q_{cp})$ с глубиной под руслом Ангары

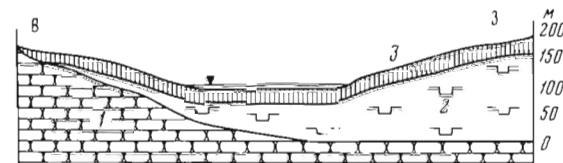
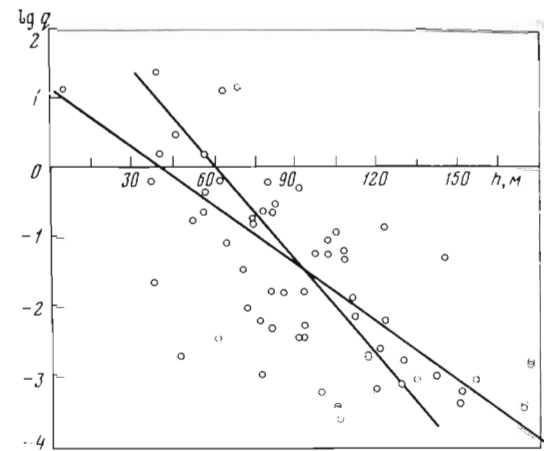
Р и с. 51. Изменение дисперсии D показателя водопроницаемости $\lg(q/q_{cp})$ с глубиной под руслом Ангары



вания представляют собой обычное явление. Приконтактовые изменения трещиноватости в той или иной форме проявляются во всех магматических породах, а раскрытие и кольматация трещин в зоне гипергенеза свойственна всем породам, вероятно, без исключения. В Толстомысовском силле благодаря его сложной структуре удалось выявить еще одну закономерность, которая, по-видимому, впервые отмечается в магматических горных породах. Установлена связь водопроницаемости и, следовательно, раскрытия трещин с мощностью силла (рис. 52).

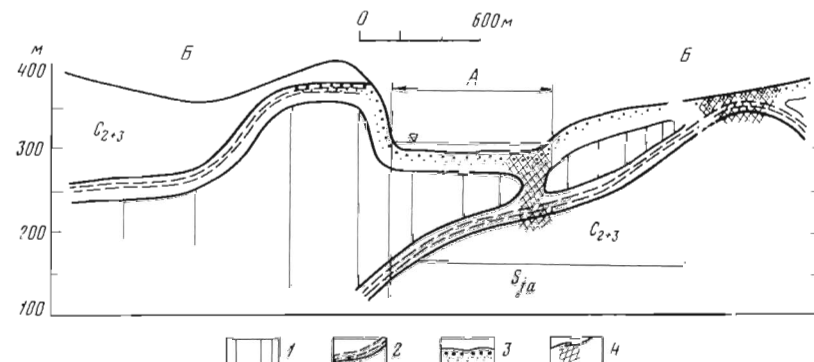
Как можно видеть, поле распределения точек несколько вытянуто слева направо и одновременно сверху вниз. Это свидетельствует о наличии зависимости случайной величины $\lg q_{cp}$ от мощности интрузии. Теснота этой связи характеризуется коэффициентом корреляции $r = 0,80$. Значение r отлично от нуля с надежностью $P = 0,99$.

Увеличение водопроницаемости по мере убывания мощности интрузии косвенно можно выявить по распределению верховодки на траппах. Верховодка скапливается только там, где интрузия имеет большую мощность. Например, на вершине куполовидного вздутия линза верховодки сохраняется круглый год. Куполовидное вздутие Толстого мыса представляет собой отдельно стоящий холм. Верховодка на нем может питаться лишь за счет инфильтрации. Принимая это питание равным норме осадков (~ 360 мм в год), можно рассчитать, что при градиенте потока из линзы верховодки близ $I = 1$, коэффициент фильтрации $K = 0,001$ является достаточным, чтобы верховодка могла существовать круглый год. Фактически питание составляет небольшую



Р и с. 52. Схематический геологический разрез, иллюстрирующий изменение мощности трапповой интрузии, и график изменения водопроницаемости траппов в зависимости от мощности

1 - вмещающие интрузию осадочные породы; 2 - интрузия траппов; 3 - зона разгрузки и выветривания, в пределах которой выполнено опробование



Р и с. 53. Зоны в сети трещин Толстомысовского траппового силла

1 - внутренняя часть силла, не затронутая приконтактовыми и гипергенными изменениями сети трещин; 2 - эндоконтакт интрузии с зонами расширения и учащения трещин; 3 - зона гипергенеза, характеризующаяся расширением и частичным заполнением трещин; 4 - зоны глубоких деформаций траппов разрывного характера, вызванных разуплотнением массива при разгрузке; А - русловой участок; Б - береговые участки

долю от нормы осадков, так как большую часть года грунт над верховодкой проморожен и рельеф благоприятствует стоку осадков. Следовательно, фактически в среднем по вздутию $K_{\Phi} < 0,001$ м/сут. Путем экстраполяции графика (см. рис. 52) для этой части интрузии можно получить $K_{\Phi} = 1 \cdot 10^{-6}$ м/сут.

Наличие в русле обособленной зоны повышенной водопроницаемости, пронизывающей интрузию, отчетливо проявляется на карте химизма подземных вод. Оказываясь, в траппах повсеместно воды ультрапресные и только там, где выделяется зона глубокой экзогенной деформации, подземные воды в траппах имеют минерализацию до 2 г/л и состав, близкий к составу вод, заключенных в подтрапповых осадочных породах. Таким образом, здесь на фоне водоупорного интрузивного пласта фиксируется зона разгрузки. Эта зона фиксируется там же на карте птезоизогипс подтраппового водоносного горизонта, так как с ней связана крупная естественная депрессия.

Таким образом, косвенные исследования трещиноватости подтверждают результаты прямых измерений параметров сети трещин: в теле силла выделяется несколько зон с различной трещиноватостью (рис. 53).

Итак, сеть трещин в Толстомысовском трапповом силле имеет строгие, характерные для трапповых тел. Сеть трещин образовалась в два этапа. На первом этапе происходило относительно равномерное растрескивание массива по всему объему вследствие контракционного сжатия. Параметры этого процесса и сети трещин закономерно и постепенно изменялись в зависимости от формы, мощности интрузии и скорости ее остывания. На втором этапе произошло унаследованное развитие сети трещин. Расширились наиболее длинные и широкие трещины. На участках пережима интрузивного пласта, где трещины были первоначально учащены из-за близости контактов, наметились деформации типа разрывов. Они выражаются в увеличении раскрытия трещин в отдельных зонах, прямолинейных на разрезе и в плане.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СЕТЕЙ ТРЕЩИН ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МАКРОСТРУКТУРЫ МАССИВА

ПОЛЕВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИН

§ 5.1. Цели и методы исследования трещин

Сети трещин в массивах горных пород исследуются, во-первых, для оценки механических свойств массива или толщи пород с целью прогноза устойчивости пород в подземных горных выработках, откосах открытых выемок, для прогноза притоков к выработкам, деформируемости оснований сооружений и решения других задач гидрогеомеханики. В этом случае исследованиями трещин должна быть установлена геометрическая модель сети трещин, параметры модели несколько различны для конкретных инженерных задач.

Во-вторых, исследования трещин проводятся для решения различных геолого-структурных задач: выявления разрывных нарушений и оценки их параметров, восстановления плана полей напряжений, существовавших или существующих в массиве, и т.п. Решение структурных задач выполняется также на основе геометрической модели сети трещин. В этом случае первостепенное значение имеют параметры ориентировки трещин: угол и азимут падения, хотя характеристики шероховатости, длины и густоты трещин также используются.

Следовательно, задачи как гидрогеомеханики, так и структурной геологии требуют геометрической модели сети трещин. Такая модель может быть получена при геологической съемке. В литературе описаны геометрические модели сетей трещин и разрывов различного масштаба. Мелкомасштабные модели составлены по космо- и аэрофотоснимкам, крупномасштабные на основе специальной наземной съемки трещиноватости, иногда с применением фототеодолитных методов.

При всем различии задач, для решения которых используется структурная модель сети трещин, есть такие общие требования к модели, которые необходимо выполнять всегда. Основу всякой геометрической модели сети трещин составляет характеристика ориентировки трещин, даваемая в виде азимута падения α и угла падения трещин β . Далее, в общую модель входят параметры: ширина трещин b , длина трещин l , расстояние между трещинами в системе a . Это основные параметры модели. Кроме них для решения отдельных конкретных задач модель должна включать, например, характеристики шероховатости стенок трещин, состава, сжимаемости, водопроницаемости заполнителя трещин.

Геометрические параметры сети трещин оцениваются отдельно для каждого обнажения, для каждой однородной по трещиноватости точки массива. Совместный анализ наблюдений, выполненных в различных точках, позволяет построить разрезы и карты для оценки изменений трещиноватос-

ти по массиву. На картах и разрезах оценивается макроструктура сети трещин. Благодаря этому модель сети трещин всегда увязана со строением более крупных геологических структур, с которыми трещины связаны генетически. Такая увязка не только делает модель сети трещин более понятной, логически стройной, но и расширяет представление о крупных структурах: позволяет судить о положении тектонических разрывов, осей складок, контакта интрузии и т.п.

Прямой задачей исследования сети трещин называется построение количественной модели сети на основе прямых измерений параметров трещин в массиве. Эта модель используется для механических расчетов или уточнения структуры массива, т.е. определения свойств формы и размеров его элементов, превышающих на несколько порядков размеры макротрещин. Задача построения гипотетической решетки трещин массива на основе модели структур низших порядков считается соответственно обратной задачей изучения трещиноватости.

Решение обратной задачи в связи со значительной случайной изменчивостью решетки трещин при современных методах изысканий и уровне знаний не может быть достаточно точным, пригодным для конкретного проектирования. Оно может быть использовано только при составлении генерального плана строительного объекта или при планировании изысканий и геологической разведки.

Исследования макроструктуры сети трещин, т.е. изменений степени трещиноватости по массиву, производятся при геологической и инженерно-геологической разведке различными косвенными методами.

В ходе разведки проводятся измерения скоростей распространения упругих волн, определения удельных водопоглощений, которые позволяют косвенно судить о трещиноватости различных частей массива. Косвенные характеристики используются для оценки свойств массива на основе корреляционных связей [Голодковская, Шаумян, 1975], а также для районирования массива [Инженерно-геологические исследования при разведке месторождений, 1975] по степени трещиноватости. Для выделения зон повышенной трещиноватости на основании результатов нагнетаний используются статистические методы обобщения точечных наблюдений, а также наблюдения за химическим составом и режимом подземных вод.

§ 5.2. Геологическая крупномасштабная съемка сетей трещин

Крупномасштабная геологическая съемка трещиноватости основана на непосредственных измерениях параметров трещин в искусственных или естественных обнажениях.

Принципы исследования трещиноватости при крупномасштабной инженерно-геологической съемке сформулированы М.В. Рацем [1963], получили развитие в наших совместных работах и сейчас предлагаются в следующем виде.

1. В соответствии с необходимостью цифрового выражения инженерно-геологических и гидрогеологических прогнозов необходимо количественное изучение трещиноватости.

2. Многообразие явления трещиноватости и формы расчетных моделей, для которых собирается материал, требуют определения ряда параметров

трещин. Ограничиться каким-либо одним обобщенным параметром трещиноватости невозможно.

3. Главенствующая роль крупных трещин в прогнозируемых процессах требует в соответствии с принципом унаследованности ввести правило: чем крупнее трещина, тем детальнее она изучается. Микротрещины, входящие в образец горной породы, как правило, не подлежат изучению. Макротрещиноватость изучается выборочным методом, который сочетает в себе приемы инженерно-геологической съемки с приемами составления и обработки выборок методами математической статистики. Мегатрещины и тектонические разрывы изучаются индивидуально. Для оценки некоторых из них проходят специальные горные выработки и скважины.

4. Генетический анализ трещиноватости необходим на всех этапах исследования, так как он служит основой экстраполяции и интерполяции результатов исследования.

Количество трещин, документируемых в пределах участка массива, однородного по трещиноватости, зависит от задачи исследования и дисперсии параметров трещин. Оно колеблется в широких пределах от 100 до 1000 трещин, снижаясь до минимума на участках с простым строением сетей трещин (3 системы одного генетического типа) и возрастая до максимума в зонах тектонического дробления и выветривания.

Как и всякая съемка, работа по изучению трещиноватости начинается с планирования объемов по геологической карте. В ходе планирования оценивается необходимое количество съемочных точек, предполагаемое количество индивидуальных измерений по каждому параметру трещиноватости и намечаются ключевые обнажения, подлежащие документации. Тщательно изучаются материалы по району исследования и задачи исследования. Основное внимание при рассмотрении геологических материалов уделяется литологическому составу пород, тектонической структуре и геологической истории изучаемого участка.

При рассмотрении задач исследования выявляются параметры свойств массивов, существенные для проектирования горных или строительных работ и определяется список параметров трещиноватости, подлежащих тщательному исследованию. Например, при оценке проницаемости из общего набора параметров как важнейший выдвигается ширина трещин. При оценке устойчивости откосов этот параметр имеет второстепенное значение. Оценивается также необходимая глубина, на которую распространяется исследование, и локализация детальных работ по площади.

При выборе точек документации трещиноватости для решения структурных задач типа оценки положения разрыва или складки необходимо исходить из расчета 5–10 точек на участок разрыва или крыла с выдержанными элементами залегания. В каждой точке измерения выполняются в среднем на двух сотнях трещин. Такая работа бригадой из двух-трех человек может быть выполнена за неделю.

При исследовании трещиноватости для оценки коэффициента фильтрации, модуля деформации, угла откоса одна точка документации трещиноватости может дать материал для расчета одного значения исследуемого свойства массива.

Размещение точек на участке должно быть выполнено так, чтобы были

описаны все геолого-структурные участки, все породы в пределах этих участков и зоны с различной степенью экзогенных изменений.

Главное в полевой работе по съемке трещиноватости – массовые измерения параметров трещиноватости в съемочных точках и горных выработках. Массовые измерения удобно производить двум или трем исполнителям, один из которых ведет запись по форме, пригодной для обработки на ЭВМ. В соответствии с принципом, установленным в работе [Нейштадт, 1957], необходимо измерять все трещины в пределах выделенной части обнажения. Общее количество трещин, измеряемых на обнажении, должно составлять 100–400 шт. при условии обмера 10–40 трещин в каждой системе. Минимальным количеством измерений можно обойтись только в простейших случаях, когда в массиве имеется 3–4 системы с малым разбросом параметров.

Работа на обнажении складывается из описания обнажения, массовых измерений параметров трещиноватости и зарисовки. Описание обнажений обычное, как при геологической съемке. Особое внимание обращается на описание трещиноватости и формы и размеров естественных блоков отдельности. Последнее важно для дальнейших интерпретации и корректировки расчетов частоты трещин. Обязательно измеряются элементы ориентировки обнажения или отдельных его частей, элементы залегания слоев, полосчатости изверженных пород и другие элементы структуры массива; измерения производятся несколько раз с тем, чтобы получить достаточное представление об изменчивости этих величин. Изменчивость ориентировки слоев и других параметров макроструктуры в пределах одного обнажения допустима не более, чем в пределах 10° . При большей изменчивости необходимо уменьшить размер обнажений. Подробно описываются такие элементы морфологии трещин, как извилистость, шероховатость поверхности, зеркала скольжения. После этого выполняются массовые измерения параметров трещиноватости. Работа на обнажении завершается фотографированием, а для ряда инженерных работ также и зарисовкой.

Необходимо также иметь в виду, что дальнейшая обработка результатов массовых измерений обычно основывается на неизменности тех или иных индивидуальных значений параметров в пределах обнажения. Поэтому в случае закономерного изменения каких-либо параметров, например сгущения трещин по ходу замеров, обнажение следует разбить на несколько частей так, чтобы внутри каждой изменчивость была незначительной. На каждой из выделенных частей ставится отдельная съемочная точка, в которой производятся измерения всех параметров трещиноватости.

Измерение трещин каждой системы производится в следующем порядке. Сначала горным компасом измеряется ориентировка трещин. Для повышения точности и ускорения измерений вместе с горным компасом удобно использовать алюминиевую или медную пластинку размером в обложку полевой книжки. Пластинка всовывается в трещины или накладывается на поверхность трещины, как аппроксимирующая плоскость. Когда число измерений достаточно, переходят к измерениям остальных параметров складным метром или стальной линейкой.

Расстояние между соседними трещинами и их ширина измеряются поряд для всех трещин данной системы, выходящих на поверхность обнажений, начиная от некой произвольной точки; ширина первой трещины, рас-

стояние между первой и второй; ширина второй трещины, расстояние между второй и третьей и т.д. Протяженность измеряется параллельно с измерением ширины и частоты. Расстояние между соседними трещинами желательно мерить по перпендикуляру к плоскости трещин, чтобы избежать введения тригонометрических поправок за влияние экспозиции обнажения на результат. В большинстве случаев вследствие естественной ступенчатости обнажений это не представляет трудности.

Ширина трещин измеряется с помощью металлической слесарной линейки и лупы. Линейка накладывается на трещину. Через лупу снимается отсчет. Для тонких трещин за эталон принимается не расстояние между штрихами на линейке, а ширина штрихов. Их ширина обычно 0,18 мм. Использование слесарного щупа для измерения ширины не эффективно, так как шероховатость препятствует внедрению щупа. Кроме того, для измерения одной трещины нужно производить перебор щупов. Наиболее точные измерения ширины можно получить с фотографии трещины при увеличении негатива в камеральных условиях. Измерение удобно проводить на экране, что избавляет от фотопечати и позволяет во много раз увеличить изображение.

Шероховатость стенки трещины используется при оценке прочности и деформируемости массива. Измерения шероховатости проводятся при инженерно-геологической съемке сетей трещин. Параметры для характеристики шероховатости еще окончательно не выбраны, а методы их оценки еще окончательно не оформились. Шероховатость характеризуется высотой выступов [Ломизе, 1951; Louis, 1968; Руппенейт, 1975], наклоном выступов [Газиев, 1977; Могилевская, 1980], отношением длины прямой и ломаной [Жиленков, 1975]. Первым детальное исследование шероховатости стенок трещин для определения модуля деформации массива выполнил Б.Д. Зеленский [1967]. Он разработал метод матриц, основанный на изучении негативных отпечатков рельефа стенок трещин. Матрицы можно изготавливать из гипса, парафина, вальцмассы или других материалов. Матрицы снимаются с эталонных площадок, выбранных согласно предварительной инженерно-геологической классификации трещин. Б.Д. Зеленский использовал матрицы размером $20 \times 20 \text{ см}^2$, $50 \times 50 \text{ см}^2$ и $100 \times 100 \text{ см}^2$.

Перед отливкой матрицы поверхность стенки трещины смазывают очень тонким слоем жидкого минерального масла. Поверхность гипсовых матриц заливают слоем черной мастики, состоящей из эпоксидной смолы, пластификатора, красителя, например графита, и отвердителя. На обратной стороне матрицы отмечают направление падения трещины. Матрица доставляется для изучения шероховатости в лабораторию, распиливается на полосы перпендикулярно поверхности трещины. В полосах по контакту гипса и смолы составляется профиль трещины по ряду сечений с точностью до 0,001 мм. С такого профиля, как с природы, могут быть сняты любые необходимые по условию задачи параметры шероховатости. В НИИ оснований и подземных сооружений Госстроя СССР для снятия профиля шероховатости поверхностей в лабораторных условиях применен профилограф с подвижной иглой [Руппенейт, 1975], который позволяет построить профиль с точностью до 0,01 мм.

Обе названные методики требуют доставлять в лабораторию слепки или непосредственно блоки с трещинами, что сложно и исключает необходи-

мую массовость измерений. Выгодно отличается от них методика С.Е. Моги-левской [Рекомендации..., 1980]. Для получения профилограммы поверхности трещины непосредственно в поле предложен новый прибор – иглоскоп. Основная его часть состоит из множества игл, зажатых в плоский ряд между двумя планками с резиновым покрытием. Иглы можно освобождать и закреплять, регулируя зазор между планками. Для получения профилограммы ряд игл устанавливается перпендикулярно стенке трещины, иглы опускаются на шероховатую поверхность, планки сжимаются. Сняв прибор с трещины, по концам игл на бумаге копируют профиль шероховатой поверхности. Иглоскоп можно устанавливать на горизонтальных и вертикальных стенках. Длина получаемого профиля около метра. По одной поверхности можно снять несколько параллельных профилей, как это делается и методом матриц. При измерениях с помощью иглоскопа точность копирования профиля составляет $0,1 \pm 0,05$ мм в зависимости от диаметра используемых игл. С профилограммы снимаются параметры шероховатости, в частности наклон и высота выступов.

Документация горных выработок мало чем отличается от документации обнажений. Здесь, по возможности, выполняются все те операции, которые выполняются на обнажении. Однако работы в горных выработках имеют некоторые особенности. Здесь обычно не удается фиксировать длину трещин, зато удается наблюдать минимально искаженные разгрузкой и выветриванием ширину и частоту трещин. Эти параметры трещиноватости, как показывают исследования, наиболее подвержены изменениям в зоне выветривания и разгрузки. Поэтому тщательное изучение их в глубоких горных выработках необходимо для дополнения материала, собранного на обнажениях. Отметим, что расстояние между трещинами следует измерять по всей длине выработки лишь для систем, пересекаемых горной выработкой. Для систем, следующих вдоль горной выработки, измерения расстояний между трещинами целесообразно проводить в сечениях, отстоящих друг от друга примерно на $3l$, где l – средняя длина трещин.

В практике изысканий встречаются случаи, когда горные выработки в силу их очень большой длины и площади не могут быть описаны полностью. В этих случаях целесообразно описывать их выборочно, на отдельных представительных участках. От работы на обнажениях такая работа отличается лишь тем, что зачастую невозможно спланировать заранее размещение точек в выработке исходя из геологических условий и нужно задаться определенным шагом для размещения точек наблюдения, либо вести измерения вдоль ломаной линии¹.

Кроме морфологических типов трещин, выделяемых на обнажениях, в горных выработках необходимо выделять и отдельно описывать искусственные трещины взрыва. Они обычно располагаются веером у шпуров, но могут и отходить от них на несколько десятков сантиметров. Чтобы не ограничиваться описанием только видимых трещин и получить представление о микротрещиноватости пород, следует с площадок, на которых детально описывается трещиноватость, брать образцы для изготовления шлифов. Методика оценки трещиноватости горных пород по шлифам детально разработана во ВНИГРИ [Методика..., 1969].

¹ Метод документации горных выработок по ломаной линии разработан А.В. Количко и применяется в САО Гидропроекта.

§ 5.3. Точность измерения параметров трещин при полевых геологических исследованиях

Параметры трещин, измеряемые на обнажениях и в горных выработках, используются для вычисления модуля деформации, коэффициента фильтрации и решения других задач. Поэтому исследовалась точность фиксации трещин на обнажении [Точность..., 1975; Ропса, Chaivre, 1977; Чернышев, 1979]. Выполнены тысячи сопоставительных измерений, которые позволили оценить погрешности измерения различных параметров трещин, ошибки методического характера, связанные, например, с неправильной оценкой длины трещины геологом, и ошибки аналогии, возникающие при интерполяции результатов наблюдений. При планировании эксперимента принято, что полевые измерения трещиноватости могут быть отягощены ошибками трех видов: метрологической, методической и ошибкой аналогии. Ошибка измерения вызвана неточностью прибора и другими факторами, не связанными с геологической структурой измеряемой сети трещин. Напротив, последующие ошибки возникают в процессе схематизации исполнителем реальной геологической структуры сети трещин. Удобно условно различать ошибку схематизации отдельной трещины и ошибку схематизации совокупности трещин. Первую назовем условно методической ошибкой. При измерении ориентировки трещины она возникает, когда шероховатая поверхность трещины аппроксимируется плоскостью. При измерении ширины трещин эта ошибка связана со схематизацией сложной формы пространства между двумя стенками трещин и заменой его расстоянием между параллельными плоскостями. При измерении расстояний между трещинами в системе методическая ошибка возникает за счет выбора соседней трещины, условно параллельной рассматриваемой. При измерении длины трещины методическая ошибка возникает за счет представления извилистой в плане трещины в виде прямой или ломаной линии. Ошибка аналогии связана с обычным геологическим приемом, применяемым при всех полевых исследованиях: допущением аналогии между измеряемым объектом и рядом находящимися объектами того же происхождения и строения.

Количество пар сопоставительных измерений для исследования ошибок различного вида приведено в табл. 29.

Ориентировка трещин. Проверка точности измерений ориентировки горным компасом выполнена в лабораторных условиях. Ошибка, возникающая при выборе места измерения на поверхности трещины, при этом не учитывалась.

Для лабораторного исследования алюминиевая пластина, применяемая в полевых условиях и моделирующая поверхность трещины, была жестко укреплена на трубе теодолита. Изменяя положение пластины, два геолога независимо друг от друга двумя зеркальными горными компасами выполнили измерения углов и азимутов падения. Одновременно и независимо от этих измерений по лимбам теодолита фиксировались с точностью до $1'$ значения угла и азимута падения плоскости пластины. Всего проведено около 800 измерений углов и азимутов падения. По этим данным вычислены стандартные ошибки измерения, которые оказались невелики как для углов, так и для азимутов падения.

Считается, что измерение ориентировки становится менее точным при

Т а б л и ц а 29
Количество пар измерений

Ошибки	Количество измерений параметров трещин			
	ориентировка, α, β	ширина, b	расстояния между трещинами, a	длина, l
Метрологическая	800	111		--
Метрологическая и методическая	35	750	136	10
Метрологическая, методическая и аналогии	250	55	161	101

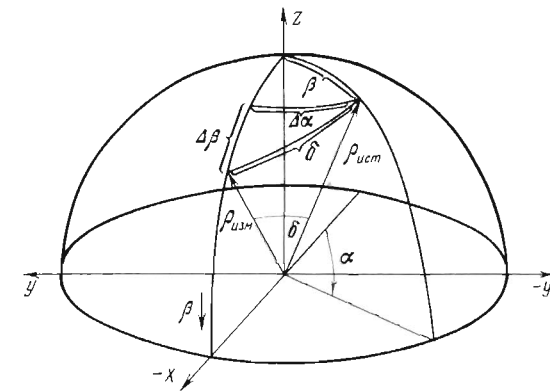
уменьшению угла падения. Это заблуждение. С математических позиций следует признать, что ориентировка представляет собой двумерную величину и в статистическом смысле характеризуется двумерным распределением. Раздельное рассмотрение ошибок измерения угла и азимута падения приводит к распространенному недоразумению о низкой точности определения ориентировки при малых углах падения и вообще о тесной связи точности измерения ориентировки поверхности горным компасом с величиной измеряемого угла падения.

Можно показать достаточно строго математически, что ошибка измерения ориентировки при малых углах не зависит от ошибки измерения азимута. Введем следующие понятия.

1. Ориентировкой плоскости называется положение ее в пространстве относительно координатных осей X, Y, Z (рис. 54), где X направлена на север, Y -- на восток, Z -- в зенит. Положение плоскости, как известно из аналитической геометрии, может быть задано вектором \vec{p} -- перпендикуляром к плоскости. Вектор определен, если известны: а) угол α от начала отсчета до проекции вектора на горизонтальную плоскость X, Y ; б) угол β в вертикальной плоскости $\vec{p}Z$ между вертикалью Z и вектором \vec{p} . В геологии принято называть α -- азимутом падения, β -- углом падения.

2) Ошибкой измерения положения плоскости в пространстве следует считать угол δ между истинным положением $\vec{p}_{ист}$ и измеренным положением $\vec{p}_{изм}$. Для определения этой ошибки необходимо провести плоскость через векторы $\vec{p}_{ист}$ и $\vec{p}_{изм}$ и в этой плоскости измерить угол δ . В инженерных задачах определяется угол между плоскостью трещины и плоскостью откоса. Очевидно, что названный выше угол δ -- ошибка измерения искомого в этой задаче угла. Так же дело обстоит в задачах тензорной теории проницаемости, структурной геологии и др.

С позиций аналитической геометрии факт независимости ошибки δ от ошибки $\Delta\alpha$ при малых β можно доказать так. Покажем, что угол δ неограниченно убывает при убывании ошибок измерения азимута падения и угла падения, которые обозначены соответственно $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$. Для этого достаточно показать, что $\cos\delta \rightarrow 1$, когда $\Delta\alpha \rightarrow 0$ и $\Delta\beta \rightarrow 0$. Покажем также, что $\cos\delta \rightarrow 1$ при условии $\Delta\beta \rightarrow 0$ и $\beta \rightarrow 0$ независимо от способа изменения $\Delta\alpha$.



Р и с. 54. Ошибка измерения ориентировки трещин δ и ее составляющие $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ на координатной сфере

Если удастся доказать последнее положение, то можно будет утверждать, что при уменьшении угла падения до нуля ошибка измерения ориентировки не зависит от ошибки измерения азимута. Следовательно, тем самым будет доказано, что при уменьшении угла падения до нуля и одновременном возрастании ошибки измерения азимута падения ошибка измерения положения плоскости в пространстве не возрастает.

Косинус угла между двумя векторами единичной длины $\{x_1, y_1, z_1\}$ и $\{x_2, y_2, z_2\}$ в прямоугольной системе координат записывается следующим образом: $\cos\delta = x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2$.

При расположении осей, как на рис. 54, выражение прямоугольных координат через углы α и β имеет вид:

$$x_i = \sin\beta_i \cos\alpha_i; y_i = \sin\alpha_i \sin\beta_i; z_i = \cos\beta_i; i = 1, 2.$$

Поэтому можно записать $\cos\delta = \sin\beta_1 \cos\alpha_1 \sin\beta_2 \cos\alpha_2 + \sin\beta_1 \sin\alpha_1 \sin\beta_2 \sin\alpha_2 + \cos\beta_1 \cos\beta_2$, где $\beta_2 = \beta_1 + \Delta\beta$; $\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta\alpha$; β_1 и α_1 -- координаты первого вектора на рис. 54; β_2 и α_2 -- координаты второго вектора на том же рисунке. Первый вектор считаем истинным, а второй измеренным значением одной и той же величины. После преобразований

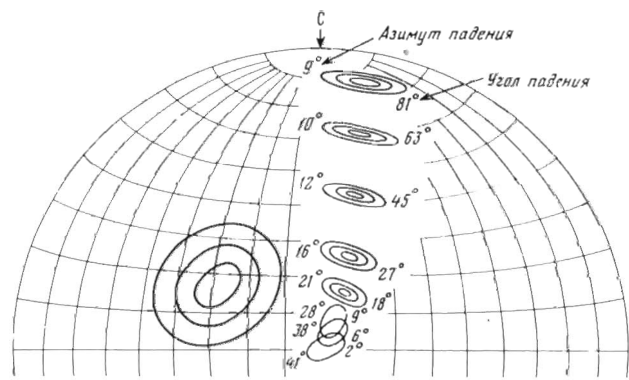
$$\cos\delta = 2 \sin\beta_1 \sin(\beta_1 + \Delta\beta) \cos^2(\Delta\alpha/2) + \cos(2\beta_1 + \Delta\beta).$$

Рассматривая равенство при условии $\Delta\beta \rightarrow 0$ и $\Delta\alpha \rightarrow 0$, можно записать $\cos\delta \rightarrow 2\sin^2\beta_1 + \cos 2\beta_1 = 2\sin^2\beta_1 + \cos^2\beta_1 - \sin^2\beta_1 = 1$.

Следовательно, при уменьшении до нуля ошибок измерения угла и азимута падения к нулю стремится также ошибка измерения положения плоскости в пространстве.

Рассматривая это же равенство при условии $\Delta\beta \rightarrow 0$ и $\beta \rightarrow 0$, можно записать $\cos\delta \rightarrow 0 + \cos 0 = 1$.

Таким образом, при стремлении угла падения плоскости к нулю, ошибка измерения положения плоскости перестает зависеть от $\Delta\alpha$. Чтобы оценить ошибку измерения ориентировки в соответствии с принятым определением, результаты лабораторного эксперимента с теодолитом нанес-



Р и с. 55. Двумерные распределения ошибок измерения ориентировки трещин на сетке В. Шмидта

Цифрами даны математические ожидания измеряемых величин. Изолинии соответствуют значениям ошибки σ , 2σ и 3σ . Слева для сравнения дано природное распределение ориентировки трещин напластования в травертине г. Машук

ны на круговую диаграмму трещиноватости (рис. 55) в виде двумерных распределений ошибки. Они лежат в различных частях диаграммы и характеризуют различные условия измерений. Изолинии проведены через интервал, равный стандартному отклонению. Каждое распределение характеризуется одним стандартным отклонением, связанным с ошибкой измерения угла падения β и другим стандартным отклонением, связанным с ошибкой измерения азимута падения α . Для измерения ошибок центр распределения и экспериментальная точка приводились на один меридиан. Ошибка измерялась как длина дуги в градусной мере. Стандартные ошибки, вычисленные для осей эллипсов рассеяния, приведены в табл. 30.

Параллельные измерения ориентировки трещин с целью оценки методической ошибки были выполнены на обнажении палеогеновых известняков в среднем течении р. Вахша (Таджикская ССР). Двумя геологами были сделаны два ряда измерений ориентировки одних и тех же трещин (табл. 31).

Квалификация исполнителей существенно влияет на точность измерений. В табл. 32 приведены результаты измерений исполнителей одинаковой квалификации и единого стиля, который выработан на протяжении ряда лет совместной полевой работы. В табл. 34, напротив, сопоставляются результаты измерений исполнителей с разным опытом работы (студент и опытный геолог). Измерения выполнены на одном, ограниченном по площади, обнажении в разные дни. Общее количество измерений в каждой серии по 200. Всего на обнажении в зоне, доступной для измерения, не менее 2000 трещин. Таким образом, серии измерений перекрываются только частично. Как видно из сравнения, результаты измерений обоих исполнителей близки и, как правило, различаются статистически незначимо. Следовательно, съемка трещиноватости не требует значительной специальной подготовки геолога.

Ширина трещин в горных породах измеряется для расчета пустотности, водопроницаемости, деформируемости и т.д. Измерения выполняются слесарным щупом, металлической линейкой через лупу или путем фотографирования

Таблица 30

Стандартные ошибки измерения положения трещины горным компасом при различных углах

Угол падения, β , град	2	6	9	18	27	35	45	55	63	81
Стандартные ошибки, град	s_{α}	0,8	1,2	1,3	2,1	2,7	—	3,0	—	3,2
	s_{β}	1,6	1,6	1,5	1,5	1,3	1,0	0,9	0,8	0,8
Число измерений		100	100	160	100	140	40	80	20	80

Таблица 31

Оценка положения центра системы трещин двумя геологами

Ряд измерений	Объем выборки	Среднее значение азимута падения и стандартная ошибка, град	Среднее значение углов падения и стандартная ошибка, град
1	35	75,5±5,3	62,0±4,0
2	35	73,0±5,3	64,0±3,5
1	50	63,7±2,5	62,6±1,2
2	56	68,3±1,7	61,6±1,1

Таблица 32

Оценка положения центров систем по измерениям с ошибкой аналогии

Ряд измерений	Объем выборки	Среднее значение азимута падения и стандартная ошибка, град	Среднее значение угла падения и стандартная ошибка, град	Ряд измерений	Объем выборки	Среднее значение азимута падения и стандартная ошибка, град	Среднее значение угла падения и стандартная ошибка, град
1	20	21±0,6	35±0,6	1	16	267±2,5	66±1,0
2	20	21±0,7	37±0,7	2	20	266±2,2	66±2,2
1	83	119±0,8	79±0,8	1	19	357±1,5	76±2,0
2	80	116±0,7	84±0,7	2	10	3±3,0	74±3,0
1	22	153±2,0	51±2,0	1	33	209±1,5	51±2,0
2	17	150±3,0	62±2,0	2	31	209±1,5	57±1,5

Таблица 33

Оценка точности измерения ширины трещин методом фотографирования

Номер образца	Среднее значение ширины трещин, мм, по измерениям	
	радиоиндикаторным методом	на специальных фотоснимках
1	0,34	0,24±0,024
2	0,30	0,26±0,034
3	0,29	0,30±0,040

Таблица 34

Результаты измерения ширины трещин разными исполнителями

Номер штольни	Номер трещины	Ширина трещины, мм	
		1	2
777	17	20,0–45,0	12,0–36,0
	19	0,5–1,5	0,4–4,0
	25	0,5–1,5	0,4–1,1
	52	2,0–10,0	3,0–9,0
763	4	0,0–8,0	0,2–1,7
	17	0,2–3,0	0,2–1,7
	20	0,0–3,0	0,2–1,2
	37	0,0–1,5	0,2–2,0
	3	0,5–10,0	0,1–1,2
	26	0,0–3,0	0,4–4,1
	80	10,0–15,0	27,0–174,0
	41	0,1–1,5	0,1–0,8
	53	0,1–0,2	0,3–1,2
	45	0,1–2,0	0,1–3,7

рования трещины с масштабной линейкой и последующим сильным увеличением.

Ошибка измерения с помощью линейки и лупы исследована в лабораторных условиях. В качестве модели трещины был принят зазор между лапками штангенциркуля. Он измерялся с помощью металлической линейки через лупу, а затем по нониусу. Выполнено 111 сопоставительных измерений. Стандартная ошибка составила 0,06 мм.

Методическая ошибка, связанная со схематизацией отдельной трещины, исследована на керне гранитов. В лабораторных условиях измерения ширины трещин выполнены двумя способами. Во-первых, полный объем трещины оценивался по кривой разбавления радиоактивного индикатора. Отсюда по площади трещины получали среднюю ширину. Затем образцы керна были разрезаны алмазной пилой. Полученные срезы трещин сфотографированы. Ширина трещин измерялась с увеличением в 8–10 раз. Общее количество измерений ширины составило 725. Оба способа дали близкие результаты, которые в двух случаях статистически неразличимы. Абсолютная величина ошибки не превышает 0,1 мм (табл. 33).

Другое исследование методической ошибки определения ширины трещин выполнено в штольне на участке Кольмской ГЭС. Документация штольни с зарисовкой проведена экспедицией Ленгидропроекта. Ширина трещин измерялась слесарным шупом. В журнале занесены максимальные и минимальные значения ширины (табл. 34). Позже другими исполнителями были опознаны и измерены трещины, указанные на зарисовке.

Результаты этих измерений имеют лишь случайные расхождения. Вывод подтверждает достоверность измерений в обеих сериях.

Расстояния между трещинами. Измерения расстояний между трещинами в системе выполняются по перпендикуляру к поверхности трещины с помощью складного метра. Измеряются отрезки от 2–5 см до 2–5 м длиной. Ошибка при измерении таких величин незначительна. Чтобы показать это, воспользуемся материалами по параллельному определению расстояний между одними и теми же трещинами в алеволитах палеогена (Таджикская ССР) на обнажении и на стереопаре фотоснимков, снятых с расстояния 5 м. Полученные обоими способами распределения расстояний статис-

тически неразличимы. Измерения на обнажении дали среднее 26,0 см и стандартное отклонение 15,4 см. Соответствующие параметры распределения по измерениям на фотографиях 26,0 и 15,5 см. Стандартная ошибка измерения отдельной трещины в рассматриваемом случае по данным 136 измерений оказалась равной 1,44 см, чему соответствует коэффициент вариации 5,5%.

Кроме того, по критерию Пирсона (χ^2) сравнивались две другие выборки из одной системы и с одного обнажения, объемом в 161 трещину каждая. При составлении этих выборок идентичности объектов измерения не добивались. Таким образом, в этих рядах измерения наряду с другими ошибками присутствует ошибка аналогии. Несмотря на это, вероятность принадлежности выборок к одной совокупности оказалась 0,888.

Длина трещин. Измерения длины трещин, видимо, могут отличаться лишь за счет выбора места окончания следов трещины на обнажении и ошибки отсчета по линейке (рулетке). Эти ошибки не могут быть велики.

В подтверждение приведем материал по измерению длины трещин на том же обнажении, где измерялось расстояние между трещинами. На фотографии и обнажении измерена длина 101 трещины. При этом нельзя утверждать, что в обоих случаях измерялись одни и те же трещины, но безусловна их принадлежность к одной системе. По измерениям на обнажении средняя длина трещин 322,0 см и стандартное отклонение длины 310,4 см. По измерениям на фотографии те же параметры распределения оказались соответственно 347,0 см и 293,6 см. Сравнение выборок по критерию Пирсона показало, что они с вероятностью 0,675 принадлежат к одной совокупности.

Была также оценена ошибка измерений длины за счет шероховатости и извилистости трещин в плане. На образцах мрамора линейкой измерена длина 10 трещин. Эти же трещины были измерены на увеличенных фотографиях по методу ВНИИГА (измерения в поляризованном свете). Сравнение результатов этих сопоставительных измерений показало, что за счет увеличения длины трещин, связанного с шероховатостью и извилистостью трещин в плане, ошибка составляет 5,5%, естественно, в сторону уменьшения абсолютного значения длины.

Проведенное исследование показало, что погрешности измерения параметров трещин невелики в сравнении с методическими и интерполяционными ошибками. Погрешности измерения длины и расстояния между трещинами в обычных условиях составляет около 5%. Ширина трещин измеряется относительно менее точно. Во внутренних частях массива горных пород, где средние значения ширины не превышают 0,5 мм, относительная погрешность имеет величину 30–50%. В зонах повышенной трещиноватости, где ширина трещин значительно больше, относительная погрешность измерения ширины снижается до 10%. Отдельные широкие трещины, которые определяют процессы фильтрации деформирования и другие, измеряются с высокой точностью.

Погрешности измерений азимута и угла падения (см. рис. 54), рассматриваемые отдельно, вопреки распространенному мнению, не характеризуют точность определения положения трещины в пространстве. Только совместное рассмотрение погрешностей измерения двух углов позволяет оценить ошибку измерения ориентировки трещины. Математически строгое рассмотрение двумерного распределения погрешности приводит к заключению, что точность оценки положения плоскости трещины в пространстве не зависит от угла ее падения и характеризуется стандартным отклонением единичного измерения не более 2–3° (см. рис. 55).

Велики или малы ошибки измерения, можно оценить только сравнивая их со стандартным отклонением природных распределений измеряемого параметра [Ребрик, Чернышев, 1968]. В большинстве случаев ошибки измерения параметров трещин, выявленные здесь, в несколько раз меньше,

чем стандарты природного распределения (см. гл. 3). Однако редко можно сказать, что ошибка измерения параметра трещины на порядок меньше стандарта природного распределения. Поэтому в целом точность измерения параметров трещин в горных породах при инженерно-геологических изысканиях можно характеризовать как удовлетворительную. Дальнейшее повышение точности измерений за счет совершенствования методов и приборов может привести к некоторому снижению необходимого количества измерений параметров трещиноватости при изысканиях. Приборы необходимы главным образом для автоматизации трудоемкого процесса массовых измерений.

§ 5.4. Фотогеодезические и скважинные методы документации трещин

Для документации сети трещин на недоступных обнажениях, в бортах карьеров и котлованов применяются геодезические методы [Фамицын, Федоренко, 1970; Vieten, 1970; Moog, 1974; Preuss, 1974]. Выполняются стереофотограмметрические съемки фототеодолитами и малоформатными камерами с последующей обработкой снимков на специальных приборах типа стереометрографа, стереокомпаратора, стереоафтографа и др. При обработке снимков удается получить достаточно полную характеристику сети трещин. Для отдельных крупных трещин с видимой плоскостью стенки удается получить азимут и угол падения [Vieten, 1970]. С точностью, близкой к точности непосредственных измерений, удается снять со снимков длину и частоту трещин, оконтурить зоны повышенной трещиноватости. Решение этих задач требует учета перспективы и относительной ориентировки обнажения, трещин и базисной линии. Поэтому задачи решаются только путем ряда специальных построений.

По опыту Б.М. Фамицына и В.С. Федоренко [1970], на снимках может быть установлена ширина трещин с точностью порядка 0,1 мм на фотоизображении. Это означает, что при съемках в масштабе 1:100 можно измерить ширину трещин более 1 см. Такую точность нельзя признать удовлетворительной для инженерных расчетов деформируемости, прочности, водопроницаемости массива. Однако для инженерно-геологического районирования массива такая точность фиксации ширины пригодна. Съемки, выполненные Б.М. Фамицыным и В.С. Федоренко с расстояния до 100 м, позволили им получить коэффициенты трещинной пустотности, близкие к натурным.

Фотогеодезическая документация сетей трещин представляет собой сложный вид работ, требующий высокой квалификации исполнителей и специальной аппаратуры для съемки и камеральной обработки материалов. Затраты времени и средств не компенсируются повышением точности фиксации трещин. Применение фотогеодезических методов целесообразно при съемке недоступных обнажений или дефиците времени на полевые работы для переноса основных объемов работ в камеральные условия.

Описание трещиноватости по данным бурения обладает рядом особенностей. Оно может быть произведено путем обзора или фотографирования стенок скважины, либо путем описания керна. Сравнивая керн и стенки скважин, отметим, что в керне наблюдаются как естественные, так и искусственные трещины. По трещинам керн разваливается, вследствие чего ширину трещин по керну определить совершенно невозможно. При враше-

нии снаряда керн по трещинам истирается и искажаются углы пересечения трещин с горизонтом. В неориентированном керне невозможно определить азимут падения трещин. В противоположность этому в стенке скважины трещины сохраняют все параметры неискаженными или малоискаженными. Но они труднодоступны, обзор стенок скважин может быть сделан лишь с применением сложных оптических приборов.

Опыт показывает, что при выходе керна 95–100% в крепких породах типа кварцевых порфиров или траплов по керну могут быть надежно оценены положение плоскости трещин в пространстве и расстояние между трещинами в системе. Однако ввиду истирания и дробления керна, параметры трещиноватости, измеренные на керне, всякий раз могут быть отнесены к массиву лишь после проверки соответствия их параметрам, определенным на обнажениях или в горных выработках большого диаметра. Особенно перспективным исследование трещиноватости на керне представляется в условиях алмазного бурения и использования керноскопов и кернометров. В глинистых породах ориентированный керн для исследования трещиноватости может быть получен забивным бурением [Егоров, 1981]. Рекомендации по документации керна имеются в работе [Методика изучения трещиноватости, 1969].

Для фиксации трещин в поле используются методы фотограмметрии [Мартынов и Волярович, 1969; Vieten, 1970].

Глава 6

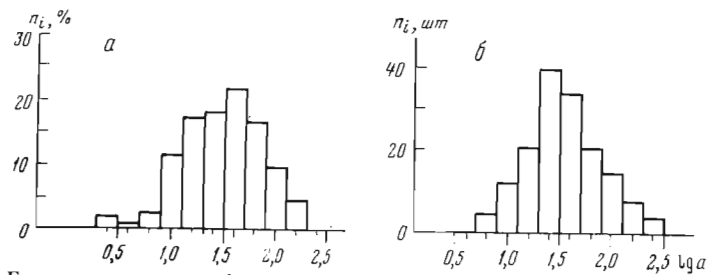
КАМЕРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИН

§ 6.1. Методы графической обработки измерений одномерных параметров

Несмотря на широкое распространение машинной обработки статистической геологической информации, в частности по структурным исследованиям, графические методы сохраняют свое значение. Они пока необходимы в полевых условиях для контроля и планирования дальнейших исследований по ходу работ. Они незаменимы в учебной практике благодаря наглядности и доступности, а также при исследованиях малого объема, когда затраты на программирование превосходят затраты на графические построения.

Графическая обработка рядов наблюдений одномерных величин проводится с помощью построения гистограмм, роз-диаграмм и интегральных кривых распределения.

Гистограмма строится по результатам измерений одной случайной величины в пределах обнажения или горной выработки, где измеряемая величина подвержена только случайным изменениям. При строгом математическом подходе гипотеза о случайности может быть проверена с помощью специальных критериев, описанных в курсах математической статистики и теории вероятностей [Венцель, 1964 и др.]. Для построения гистограммы (рис. 56) по оси абсцисс откладывают значения измеренной



Р и с. 56. Гистограммы логарифмов расстояний между трещинами в трапах Толстовской интрузии для горизонтальной системы трещин

а – по обнажениям; *б* – по керну скважины, пробуренной рядом с обнажением

случайной величины. В нашем примере это расстояние между трещинами. Оно случайно изменяется от нескольких сантиметров до 3–5 м. Чтобы отчетливо была видна шкала в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазоне, пришлось прибегнуть к логарифмированию случайной величины. По оси абсцисс отложены все значения случайной величины от минимального до максимального. Ось разбита на равные интервалы – разряды – так, чтобы в каждый попадало в среднем не менее 10 измерений. При этом в отдельных разрядах может оказаться по 1–2 измерения, а в других по несколько десятков. Практика показывает, что целесообразно выбирать число разрядов в пределах 10–20 шт.

Далее для построения гистограммы следует разнести цифровой ряд по разрядам. Практически, читая ряд, ставят точку в том разряде, куда попадает очередное измерение. Подсчитывается количество точек в каждом разряде. Над разрядом строится прямоугольник, высотой равный количеству точек в определенном масштабе. Масштаб по оси ординат может быть записан количеством точек (рис. 56, *б*), или в процентах точек в данном разряде от общего количества (рис. 56, *а*), или в долях единицы.

Гистограмма наглядно изображает результаты измерений. С ее помощью можно решить ряд статистических задач: быстро найти моду распределения (наиболее часто встречающееся значение), среднее арифметическое, проверить гипотезу о сходстве эмпирического распределения с той или иной теоретической моделью, сравнить два эмпирических распределения между собой и убедиться в наличии неслучайного различия между ними. Не будем рассматривать методы решения этих задач, так как они изложены в соответствующих математических руководствах. Гистограммы, приведенные в качестве примера, построены М.И. Погребским и автором для проверки сходства измерений расстояний между трещинами на керне скважины и рядом на обнажении. Статистические критерии не указывают на присутствие систематических различий между двумя рядами измерений. Это позволяет при анализе частоты трещин наряду с данными по обнажениям использовать данные по скважинам колонкового бурения с высоким выходом керна.

Полигон распределений (см. рис. 31, *а*) представляет собой график, подобный гистограмме. Отличие его в том, что вертикальные отрезки, равные количеству точек в разряде, проводятся из середины интервала, а не на границах, как в гистограмме. Вершины отрезков, проведенные по оси интер-

вала, соединяются ломаной линией. Использование той или иной из двух графических форм зависит от вкуса и привычки исследователя.

Роза-диаграмма представляет собой принципиально такой же график, как полигон распределения, только построенный не в прямоугольной, декартовой, системе координат, а в полярной. Роза-диаграмма строится по ряду измерений случайной величины, выражаемой в градусной мере одним числом. Строго говоря, это число может характеризовать только положение прямой в некоторой заданной плоскости. Это, например, может быть направление штрихов скольжения на поверхности стенки трещины, отсчитываемое от направления падения трещины, азимут простирания осей складок и др. Розы-диаграммы для характеристики расположения трещин применяются редко, когда удастся измерить только один угол из двух необходимых для характеристики пространственного положения трещины.

Для построения розы-диаграммы область изменения случайной величины, обычно от 0 до 180°, разбивается на разряды так, чтобы в каждом оказалось в среднем не менее 10 измерений. Далее из центра диаграммы в направлении, равном середине интервала, проводится радиальный отрезок. Длина отрезка пропорциональна количеству точек, попадающих в данный интервал. Вершины отрезков соединяются прямыми. Получается многоугольник, замкнутый в центре диаграммы.

С розой-диаграммой геометрически сходна векторная диаграмма (рис. 57), которая строится также в полярных координатах (ρ , α). Угловая величина α и здесь чаще всего азимут простирания некоторого направления. Скалярная величина ρ – характеристика скорости, силы или другой векторной величины по данному направлению. На рисунке $\rho = 1/V_p$, где V_p – скорость распространения продольных ультразвуковых волн в массиве горных пород. Количество измерений и частота повторяемости отдельных значений на векторной диаграмме не отражаются. Поэтому такая диаграмма не является способом выражения статистического материала. С ее помощью нельзя стандартными приемами решить статистические задачи, перечисленные при описании гистограммы. Например, степень совпадения векторной диаграммы для скорости распространения ультразвуковых колебаний $1/V_p$ и розы простирания трещин на рис. 57 можно оценить только на глаз.

Все описанные графики изображают распределение случайной величины в дифференциальной форме, т.е. путем разбиения множества результатов измерения на разряды с изображением каждого разряда отдельно. Кроме дифференциальной, есть интегральная форма представления кривой распределения. Она часто применяется при анализе зернового состава песков. Применяется эта форма и при обработке параметров трещин.

Чтобы построить интегральную кривую распределения (рис. 58), вся совокупность результатов измерения записывается в ряд по возрастанию или убыванию значений, т.е. ранжируется. Для каждого значения по формуле $p = i(N + 1)$ подсчитывается p – частота встречи в данном ряду величин, равных рассматриваемой или меньших ее. В формуле i – порядковый номер случайного значения в ранжированном ряду; N – количество членов ряда.

На графике по оси ординат откладываются значения случайной величины, а по оси абсцисс частоты от 0 до 1 или от 0 до 100%. На график нано-

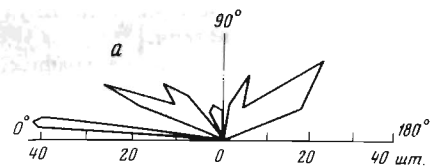


Рис. 57. Роза-диаграмма трещиноватости (а) и векторная диаграмма показателя распространения ультразвуковых колебаний (б) для известняков района Ингури ГЭС [Сейсмические методы. . . 1969].

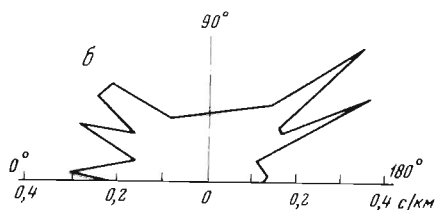


Рис. 58. Интегральные кривые распределения логарифмов коэффициентов фильтрации на вероятностной бумаге

Выборки: а — неоднородная; б — однородная (траппы Толстомысовской интрузии)

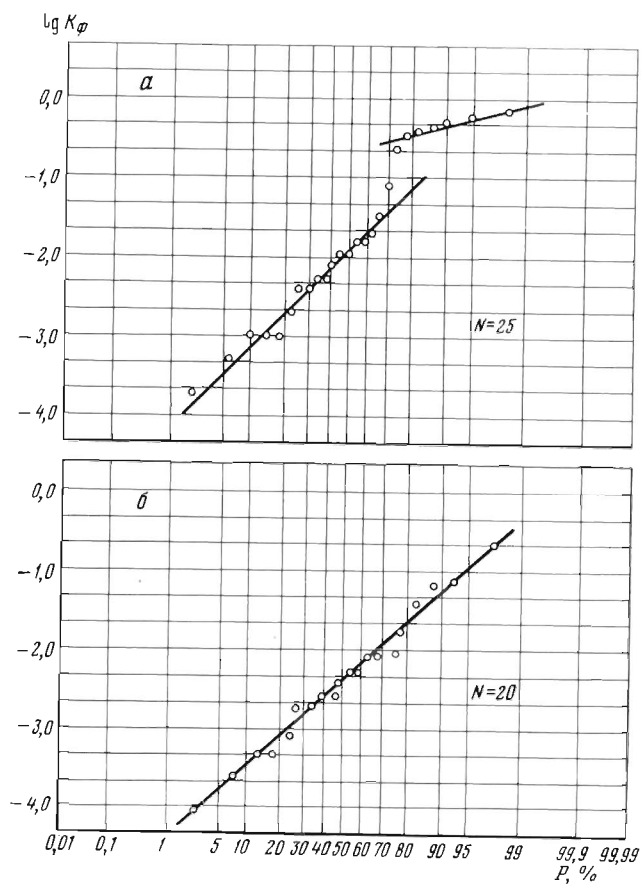


Таблица 35

Значения коэффициента z_p для расчета среднего квадратического отклонения

$P, \%$	0,01	0,10	1,0	5,0	10,0	20,0	50,0
	99,99	99,9	99,0	95,0	90,0	80,0	50,0
z_p	$\pm 3,72$	$\pm 3,09$	$\pm 2,33$	$\pm 1,67$	$\pm 1,28$	$\pm 0,84$	0

сится столько точек, сколько их имеется в ряду. По точкам проводится ломаная или гладкая кривая, которая аппроксимирует зависимость значения случайной величины от частоты встречаемости. Это интегральная кривая распределения исследуемой случайной величины. В нашем примере — это распределение коэффициента фильтрации траппов в Толстомысовской интрузии. На рис. 58 ось абсцисс разбита на неравные интервалы. Масштаб изменяется вдоль оси так, чтобы интегральная кривая нормального распределения случайной величины на графике превратилась в прямую линию. Нормальное распределение, носящее имя Гаусса, часто встречается в природе. Как показано в гл. 3, для параметров трещин типично нормальное или логнормальное распределение в зависимости от происхождения трещин. Поэтому при обработке рядов измерений длины, ширины, частоты трещин удобно пользоваться масштабом, приведенным на рис. 58. Бланки с такой разграфкой называются вероятностной бумагой.

На вероятностной бумаге графически приближенно решаются некоторые часто встречающиеся статистические задачи.

I. По форме графика можно судить об отличии ряда полевых измерений от нормального распределения. Если точки располагаются случайным образом около прямой справа и слева от нее, то распределение в данной выборке не отличается от нормального.

II. Для такого распределения с графика можно снять среднее значение и среднее квадратическое отклонение. Среднее есть значение случайной величины при частоте p равной 50%. Среднее квадратическое отклонение находится по формуле $s = (x_p - \bar{x}) / z_p$, где s — среднее квадратическое отклонение; x_p — значение случайной величины при заданной частоте p ; z_p — коэффициент, зависящий от p и находимый по табл. 35.

III. Пользуясь графиком на вероятностной бумаге, можно определить доверительные значения случайной величины на любом уровне надежности. Например, по рис. 58, б с надежностью 90% индивидуальные значения коэффициента фильтрации не менее 0,001 м/сут и не более 0,1 м/сут. На уровне надежности 95% доверительный интервал принимает значения 0,0003 — 0,4 м/сут.

IV. По форме графика можно судить о статистической однородности выборки. Если точки на графике ложатся в форме ломаной, то можно предположить статистическую неоднородность выборки, т.е. присутствие в ней измерений, представляющих существенно различные по рассматриваемому признаку участки. График 58, а, построенный по результатам откачек воды из одиночных скважин в трещиноватой зоне разгрузки траппового силла, показал неоднородность выборки. В выборке выявилось две совокупности, отличающиеся как по абсолютным значениям, так и по средним квадратическим отклонениям. Каждая из них аппроксимируется своим отрезком прямой. Большинство точек составляет совокупность с малыми абсолютными значениями и малой дисперсией. Сеть точек с максимальными значениями образует совокупность с большой дисперсией. Величину дисперсии можно на глаз оценить по наклону графика: чем меньше наклон, тем больше дисперсия. Мы определили местоположение шести точек на разрезе и убедились, что они получены на одном

участке, который был определен как зона глубокой гипергенной деформации трап-ов типа разрывного нарушения. Графики, построенные отдельно для каждой из двух совокупностей, дают прямую линию без существенных изгибов и изломов, что указывает на статистическую однородность каждого из двух выделенных рядов и однородность трещиноватости разделенных таким образом участков. До статистического анализа участки не разделялись, так как на фоне большого разброса значений $\lg K_{\Phi}$ появление больших значений казалось случайным. Дальнейшие исследования подтвердили аномалию в структуре сети трещин.

§ 6.2. Проекция сферической координатной сетки, применяемые для построения структурных диаграмм

Для графической обработки рядов измерений ориентировки трещин используются сферические координаты, точнее их проекция на плоскость.

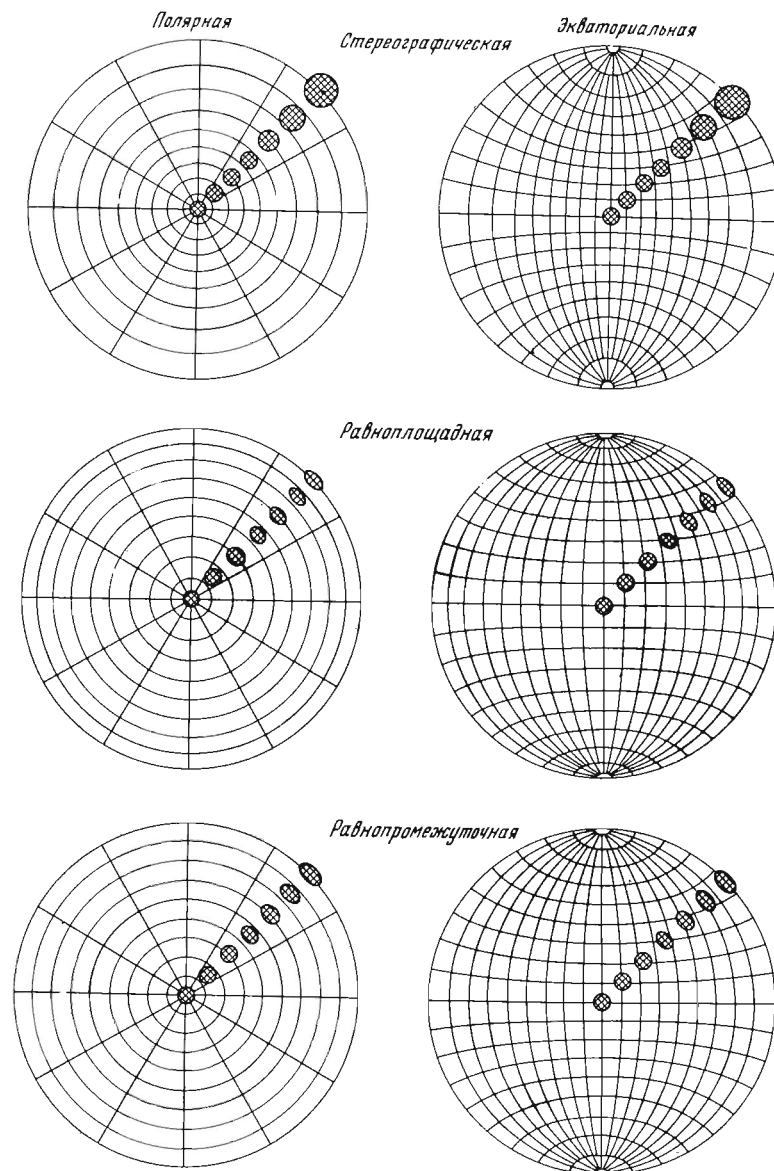
Идеальная система сферических координат мыслится на поверхности сферы. След от плоскости, проведенной через центр сферы, называется большим кругом. Точки на поверхности сферы, равноудаленные от большого круга, называются полюсами сферы. Каждому большому кругу, или экватору, соответствуют два полюса. Они находятся как точки пересечения со сферой перпендикуляра к плоскости большого круга, проведенного через центр сферы.

Для определения положения точки на сфере используются сферические системы координат. Для построения на сфере системы координат закрепляются в качестве полюсов две диаметрально противоположные точки, проводится соответствующий большой круг, или экватор. Большие круги, проходящие через полюсы, называются меридианами. Один из меридианов принимается за начало отсчета. Положение остальных определено углом между плоскостью начального меридиана и плоскостью данного меридиана. Положение точки на сфере определяется двумя углами: долготой α , измеряемой между нулевым меридианом и меридианом точки, и широтой β , измеряемой дугой меридиана от экватора до данной точки. Понятно, что широта изменяется от 0 до 90° , а долгота от 0 до 360° .

Для удобства отсчета широты на сфере наносятся параллели – круговые сечения сферы плоскостями, параллельными экватору. Все точки параллелей имеют одинаковую широту. Совокупность меридианов и параллелей, проведенных через определенный интервал, составляет сетку сферических координат. Проекция сетки сферических координат на плоскость называется картографической сеткой.

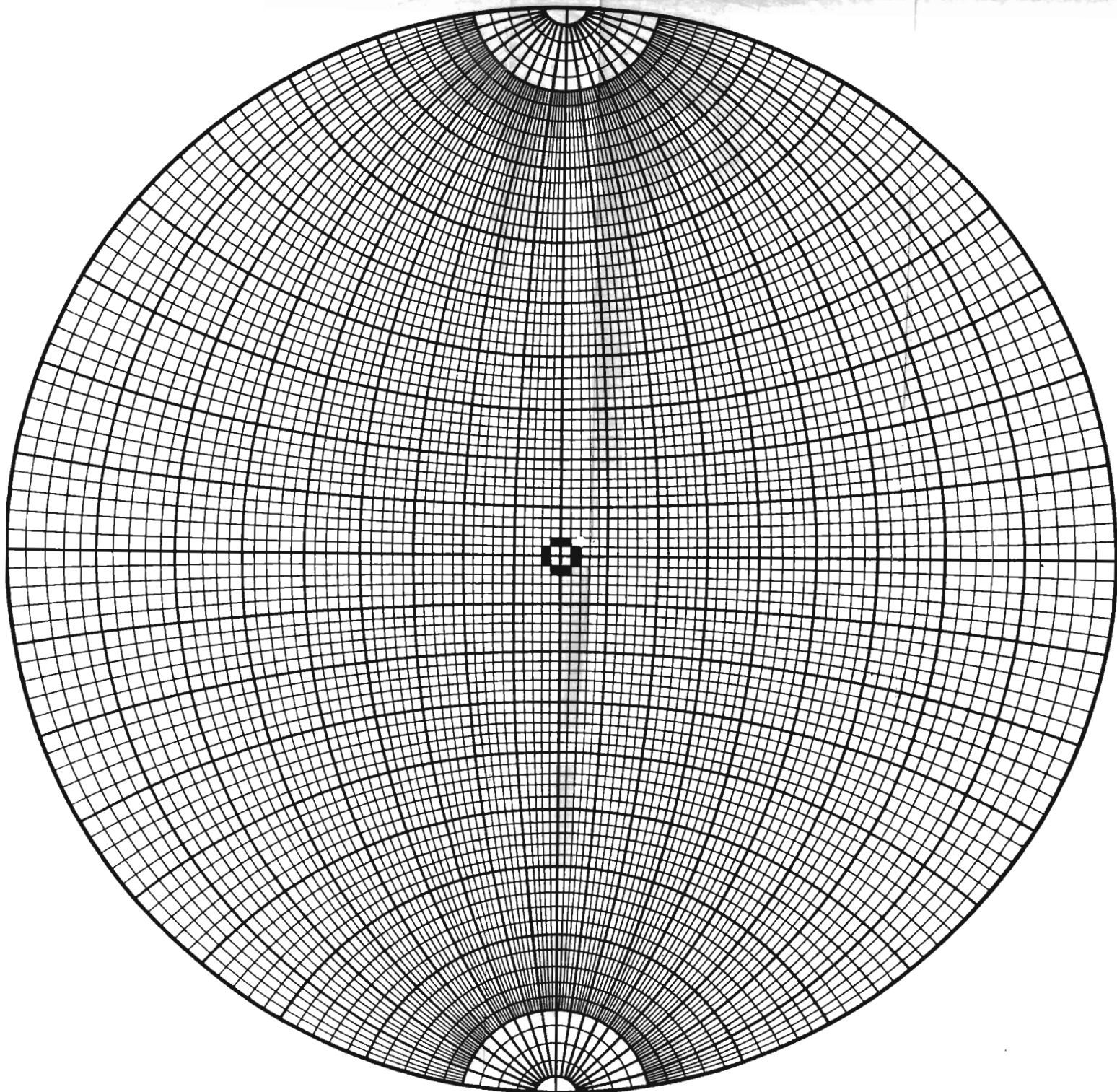
Проекцией будем называть всякое изображение сферы на плоскости, в котором каждой точке M_0 сферы соответствует точка M на плоскости. Перемещению точки M_0 на сфере по меридиану будет соответствовать перемещение точки M на плоскости по линии, являющейся проекцией меридиана. Перемещению точки M по любой другой линии на сфере можно поставить в соответствие перемещение по некоторой линии проекции. Обобщая, можно сказать, что точке, линии или фигуре на сфере соответствует геометрически определенная точка, линия или фигура на проекции сферы.

При изображении сферической поверхности на плоскости неизбежны искажения. Характер искажения зависит от выбранного способа переноса сферы на плоскость. Величина искажений при всех способах переноса не одинакова в различных частях проекции.

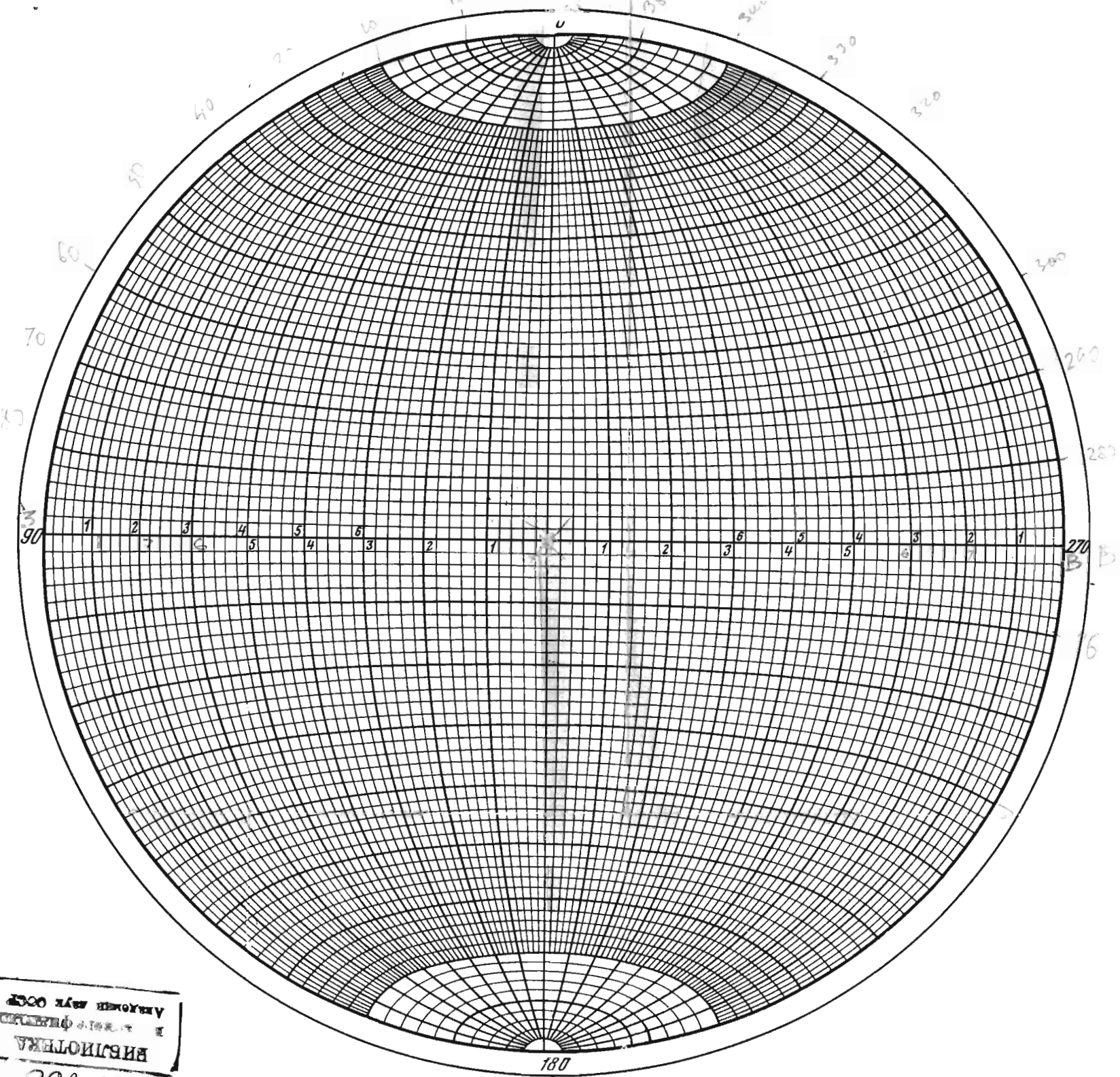


Р и с. 59. Экваториальные и полярные картографические сетки (по А.Б. Вистелиусу [1958])

Штриховкой обозначена проекция круга единичного радиуса, спроектированного из различных частей сферы на плоскость



Р и с. 60. Экваториальная сетка равноугольной проекции (сетка Вульфа)



Р и с. 61. Экваториальная сетка равноплощадной проекции (сетка Шмидта)

ВЫПУСК
 И. П. ФИЛИППОВ
 Ученый сотрудник

188886

В практике исследования структуры сетей трещин используются азимутальные проекции сферических координат в виде полярной и экваториальной сеток (рис. 59). Как в полярной, так и в экваториальной сетке используются проекции полусферы. Причем в отечественных работах принята проекция верхней полусферы, а в зарубежных чаще используются проекции нижней полусферы [Adler et al., 1961]. Полярной сеткой называется такая сетка, в центре которой находится точка полюса, а экватор изображен внешней окружностью сетки. Меридианы на этой сетке изображены радиальными линиями, а параллели – окружностями. В экваториальной сетке полюса размещаются на внешней окружности сетки, а экватор изображен диаметральной прямой, перпендикулярной прямой, соединяющей полюса.

Математическая идея построения азимутальных проекций заключается в следующем. Для полярной азимутальной проекции долгота α на плоскости всегда равна долготе на сфере α_0 . Иначе, углы между меридианами на полярной проекции изображаются без искажений. Неизбежные искажения касаются только широтного положения точки. Широта β на картографической сетке изображается расстоянием ρ от центра сетки до проекции точки: $\rho = f(\beta)$. Вид этой функции может быть различным. Каждому виду функции соответствует свой тип проекции. В геологии при структурном анализе применяется три типа азимутальных проекций: равноугольная, или стереографическая, введенная в кристаллографию Г.В. Вульфом, равновеликая, или равноплощадная, введенная в структурную геологию В. Шмидтом, и равнопромежуточная. А.Б. Вистелиус [1958] доказывает преимущества в задачах структурной геологии равнопромежуточной сетки, предложенной В.В. Каврайским.

Для построения равноугольной или стереографической проекции (рис. 60, вкл.) функции придан вид: $\rho = ktg v/2$, k – расстояние от центра сферы до плоскости, на которую проектируется сфера; v – полярное расстояние; $v = 90^\circ - \beta$.

В равноугольной сетке Вульфа коэффициент принят равным радиусу сферы. При таком задании функции получено, что углы между кривыми в каждой точке проекции равны углам на сфере. Благодаря этому круги на сфере изображаются в виде кругов на проекции. Искажение касается площади фигур. Если площадь круга в центре проекции (рис. 60) равна площади на сфере, то на внешнем контуре сетки площадь на проекции в 4 раза больше фигуры, проектируемой со сферы. Сетка Вульфа с равноугольной проекцией удобна для измерения углов между точками, построения сечений координатной сферы плоскостью или конусом, например, конусом трения в задаче расчета устойчивости блока в откосе. Она неудобна и не применяется для статистической обработки массовых измерений ориентировок трещин, так как плотность точек на проекции находится в сильной зависимости от координат точек.

Для равноплощадной проекции (рис. 61, вкл.) основное уравнение принимает вид $\rho = 2R \sin (v/2)$, R – радиус сферы. В этой проекции достигается равенство площадей фигур на сфере и на проекции, но при переносе со сферы на проекцию искажаются углы и длины дуг. Вследствие этого круги на равноплощадной проекции изображаются в виде эллипсов, за исключением круга в центре сетки. На периферии сетки оси эллипса, изо-

бражающего круг, относятся как 1/2. Поэтому сложные по форме фигуры на краях сетки искажаются и зрительно могут сильно отличаться от подобных им фигур, изображенных в центре.

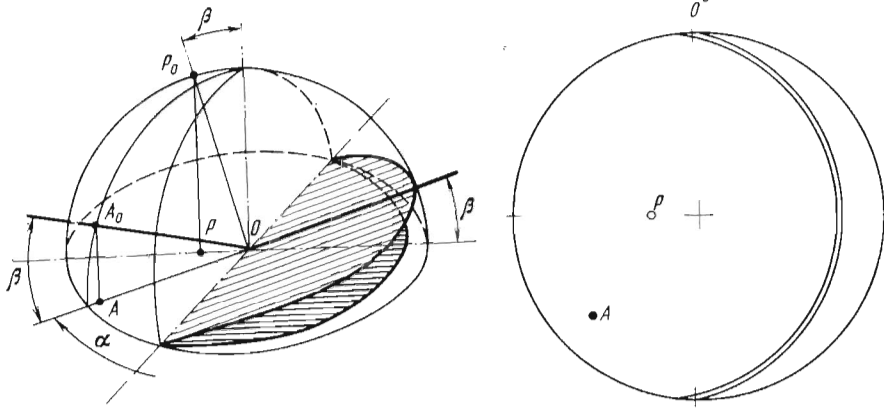
Сетка равноплощадной азимутальной проекции предложена В. Шмидтом для построения структурных диаграмм трещиноватости. Основное ее достоинство – сохранение плотности распределения точек, нанесенных на сферу, также и на проекции. Эта особенность сетки позволяет строить по ней простым графическим приемом изолинии равной плотности точек.

Из двух рассмотренных проекций одна сильно искажает углы, но не искажает площади. Другая сильно искажает площади, но не искажает углы и форму фигур. Снизить степень искажения как площадей, так и углов удается на равнопромежуточной проекции. Однако на этой проекции искажаются углы и площади одновременно. Она, несомненно, имеет преимущества при визуальной оценке сходства фигур, полученных в разных частях диаграммы. Однако применение ее для подсчета плотностей точек по методу Шмидта приведет к систематическому занижению плотности на периферийных участках диаграммы. При подсчете плотности с помощью трафаретов А.В. Пронина или О. Браича [Вистелиус, 1958] конкретный вид сетки не имеет значения и можно пользоваться равнопромежуточной проекцией. В этом случае она обладает известным преимуществом и потому рекомендуется для машинной обработки материала (§ 7.5).

§ 6.3. Изображение прямой линии и плоскости на круговой диаграмме, построение диаграммы

В практическом анализе структуры сети трещин и связанной с ней макроструктуры массива ряд объектов представляется в виде плоскости. Это трещины, разрывы, поверхности слоев, обнажений и некоторые другие. Некоторые объекты исследования представляются в качестве линий, например, оси складок, направления перемещения по разрывам и другие. Рассмотрим способы изображения линии и плоскости на круговой диаграмме.

Вначале представим себе изображение прямой линии и плоскости на координатной сфере (рис. 62, 63). Рассмотрим прямую линию, наклоненную под углом β к горизонту и поднимающуюся в направлении азимута α . Азимут α имеет не сама линия, а ее проекция на горизонтальную плоскость. Выберем положение координатной сферы так, чтобы линия проходила через центр сферы. Линия пересечет сферу в точке A_0 . Принимая плоскость экватора сферы за горизонтальную, отложим в этой плоскости азимут направления подъема линии от начала отсчета. Проведем через полученную точку плоскость меридиана и в этой плоскости отложим угол β , так получим точку A_0 . Чтобы перенести точку A_0 на проекцию сферы, необходимо на экваториальной плоскости от центра диаграммы отложить по радиусу в направлении α расстояние ρ . На рисунке $\rho = OA$. Величина ρ определяется уравнением типа $\rho = f(\beta)$. Однако в практических случаях при наличии готовой сетки нет надобности обращаться к уравнению, так как на сетке радиус разбит на интервалы в масштабе β . Поэтому для отыскания точки A достаточно отсчитать от большого круга к центру диаграммы отрезок, равный β . Другого способа изображения точки на диаграмме быть не может.



Р и с. 62. Изображения точки и плоскости на координатной сфере и их проекции на экваториальную плоскость

Р и с. 63. Вид сверху на экваториальную плоскость (рис. 62)

Плоскость на диаграмме изображается двумя способами. Первый способ – изображение плоскости линией – окружностью, дугой окружности или, в пределе, прямой линией. Так изображены меридианы и параллели на картографической сетке. Второй способ – изображение точкой. Пересечение плоскости с координатной сферой дает дугу окружности. Для построения проекции плоскости в виде линии необходимо на картографической сетке провести меридиан, который отстоит от большого круга на величину β в масштабе картографической сетки. Как уже отмечалось, масштаб зависит от способа построения картографической сетки и всегда указывается на радиусе сетки.

Изображение плоскости точкой выполняется посредством перпендикуляра, восстанавливаемого к плоскости из центра координатной сферы. Перпендикуляр пересекается со сферой в точке p_0 ; проекция p этой точки на экваториальную плоскость является точным и однозначным изображением плоскости на картографической сетке. Изображение плоскости точкой компактно. Оно позволяет на одной диаграмме изобразить несколько сотен различно ориентированных плоскостей, поэтому этот способ принят при построении круговой диаграммы трещиноватости.

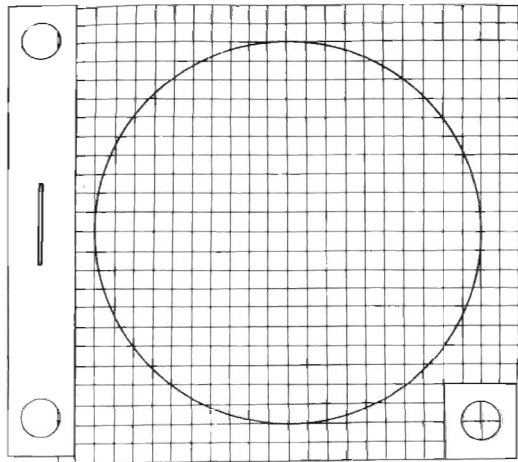
Построение круговой диаграммы трещиноватости. Практически круговая диаграмма трещиноватости строится так. При наличии готовой экваториальной сетки Шмидта (см. рис. 61) один из полюсов ее принимается за начало отсчета азимута – 0° , север. По часовой стрелке равномерно размечаются все азимуты так, что у пересечения экватора с окружностью диаграммы в правой части листа азимут 90° , в левой 270° , в нижней части диаграммы 180° . По северному радиусу диаграммы размечается масштаб для углов падения от 0 до 90° . Заметим, что величина градусного деления на радиусе сетки уменьшается от центра к большому кругу диаграммы.

Диаграмма строится на кальке или другом прозрачном листе. Он укрепляется в центре диаграммы, например, булавкой, и свободно вращается. На кальку наносят круг, равный большому кругу сетки. Штрихом "С" на

окружности отмечают начало отсчета и перед работой совмещают его с точкой "0" на большом круге сетки. Затем на кальку наносят точки, изображающие измеренные значения ориентировки трещин. Для этого из таблицы берут первую пару значений: азимут и угол падения трещин. Вращением кальки совмещают штрих С с заданным значением азимута на большом круге сетки. Не смещая кальки, на северном радиусе сетки отыскивают значение угла падения, равное заданному. Найденную на радиусе точку помечают на кальке внутри круга. Если теперь вернуть кальку в исходное положение, т.е. совместить начала отсчетов на кальке и сетке, то можно убедиться, что точка заняла на диаграмме требуемое положение. Например, если азимут падения трещины $\alpha = 180^\circ$, а угол падения $\beta = 90^\circ$, то точка окажется в южном полюсе экваториальной сетки в соответствии с падением трещины на юг. Таким же образом строится все множество точек на диаграмме, соответствующее множеству измерений элементов залегания трещин. В результате получается точечная круговая диаграмма трещиноватости. Практически удобно строить точечную диаграмму под диктовку.

Для удобства сравнения материала по разным обнажениям на основе точечной диаграммы строится диаграмма в изолиниях. Для этого калька с точками закрепляется на сетке, разграфленной на квадраты (рис. 64). Длина стороны квадрата равна $0,1R$. На сетку накладывается вырезанный в картонной рамке кружок с диаметром $0,2R$. На рисунке кружок показан в углу сетки. Центр кружка совмещается с пересечением сетки. Подсчитывается количество точек в кружке и записывается на кальке в точке пересечения линий сетки. Кружок смещается на соседнее пересечение. Вновь подсчитывается количество точек и вновь записывается. При этом скольжении кружка по диаграмме точки неоднократно попадают в подсчет. Цель подсчета выявить количество точек на 1% площади диаграммы в пределах каждого квадрата сетки. Площадь накладываемого отверстия равна 1% площади диаграммы. Сложности с подсчетом квадрата плотности возникают у края круговой диаграммы. В маленьком скользящем кружке появляется контур диаграммы. Площадь для подсчета становится меньше 1% площади диаграммы.

Чтобы компенсировать недостаток площади диаграммы в наложенном кружочке, используется специальная пластина с двумя кружочками. Центры этих кружочков удалены на расстояние $2R$. Диаметр каждого кружочка $0,2R$. Пластина на рисунке показана у края сетки. Середина пластины совмещается с центром диаграммы. При этом оба кружочка только частично покрывают диаграмму. Подсчет ведется в обоих кружочках, а запись суммы только в одном кружочке: в том, центр которого совпадает с пересечением сетки внутри диаграммы. По окончании подсчета против всех пересечений квадратной сетки записано количество точек, приходящихся на 1% площади круга. Зная общее количество точек измерения, нетрудно эти цифры привести в относительную плотность точек в процентах числа точек на 1% площади диаграммы. Для этого необходимо поделить число, записанное в узле квадратной сетки, на 0,01 от общего количества измерений. При идеально равномерном распределении точек по площади во всех узлах получилась бы цифра 1%. Но уже в силу случайности процесса растрескивания практически так никогда не бывает.



Р и с. 64. Трафареты для подсчета плотности точек на круговой диаграмме по методу Шмидта

На диаграмме обычно выявляются участки с повышенными плотностями точек. Они могут быть выявлены путем построения изолиний плотности методом обычной интерполяции. При интерполяции и проведении изолиний необходимо иметь в виду, что фигуры, прилежащие к краю диаграммы, имеют продолжение на диаметрально противоположном краю. Всякая изо-

линия не обрывается у края диаграммы, а продолжается из точки, расположенной на большом круге симметрично относительно центра диаграммы. Круговые диаграммы в точках приведены на рис. 5, в изолиниях на рис. 14, 18 и др.

§ 6.4. Обработка результатов измерений с помощью ЭВМ

При массовых измерениях параметров трещин в множестве точек окончательная камеральная обработка материала проводится на электронных вычислительных машинах для сокращения времени на обработку [Adler, 1969; Computer..., 1970; Иванова, Чернышев, 1974; Газиев, Тиден, 1979]. Машинная обработка нацелена на те же результаты, которые традиционно получались при графической обработке. Для составления программ алгоритмизированы процедуры, обычно выполнявшиеся графически. Эти процедуры: 1) построение круговой диаграммы трещиноватости, включая подсчет плотности распределения точек на диаграмме, выделение систем трещин; 2) подсчет статистик для систем трещин; 3) вычисление обобщенных характеристик трещиноватости: пустотности и блочности. В процессе алгоритмизации устранены некоторые неточности, свойственные традиционным методам ручной обработки. Всему процессу придана большая логическая стройность в сравнении с принятой графо-аналитической системой камеральной обработки.

Разработки методов применения ЭВМ для обработки измерений параметров трещин ведутся за рубежом, где они связаны с исследованиями в структурной геологии [Computer..., 1970]. Ввиду использования в зарубежных работах специальных языков программирования, в частности, GELI, зарубежный опыт может быть использован весьма ограниченно.

Цель обработки результатов массовых измерений параметров трещиноватости состоит в определении генеральных направлений трещин, отыскании для этих направлений средних густоты, ширины, длины трещин, в построении главных обобщенных параметров решетки трещин — пустотности и блочности.

В обработку поступают сведения о решетке трещин в отдельных точках естественных или искусственных (шурфы, штольни, шахты, дорожные выемки, котлованы) обнажений. Для каждой точки массива, подлежащей комплексной инженерно-геологической характеристике, измеряется на 200 трещинах угол падения и азимут падения, выделяются в поле 3–5 главных систем трещин и для каждой из них измеряется по 30–50 значений расстояний между трещинами, раскрытий и длин трещин. Материал поступает от геолога, выполняющего полевую документацию в виде таблиц, и набивается для машинной обработки на стандартные 80-колоновые перфокарты (ГОСТ 6198–64). Совокупное количество измерений обычно составляет от нескольких тысяч до сотни тысяч штук.

Первая операция обработки — построение круговой диаграммы трещиноватости. В сложившейся геологической и инженерно-геологической практике диаграмма обычно строится на сетке В. Шмидта по его методу. Метод и трафарет Шмидта, предложенные в 30-х годах, сыграли значительную роль в структурных исследованиях, однако они обладают рядом недостатков. Автором для машинной обработки, в соответствии с рекомендациями А.Б. Вистелиуса [1958], принята в качестве системы координат равнопромежуточная проекция сферы (сетка Каврайского) и трафарет Браича для подсчета плотности точек. Поступающая в машину информация состоит из 200–1000 пар измерений азимута падения и угла падения трещины. После расчета на круге, разбитом на 200 частей, отвечающим равноплощадным элементам координатной полусферы, машины выпечатывают 200 цифр. Каждая из них обозначает плотность трещин направления, ограниченного контурами ячейки трафарета Браича в процентах точек на 1% площади круга. Для сравнения на рис. 65 приведены круговые диаграммы по данным 200 измерений, построенные вручную и с помощью ЭВМ.

Для выделенных в процессе полевых работ систем трещин в камеральный период вычисляется среднее расстояние между трещинами, дисперсия и стандартное отклонение расстояния между трещинами. Вычисления производятся для каждой системы трещин отдельно. Автоматизация этого процесса не вызывает затруднений. Точно так же для каждой системы вычисляются среднее, дисперсия, стандарт ширины и длины трещин.

Полученные средние значения расстояния между трещинами и ширины трещин по системам используются для вычисления пустотности массива Π в точке наблюдения. Получаемая в результате величина представляет собой отношение объема трещин к объему массива, выраженное в процентах. Пустотность, как классификационная характеристика массива горных пород, была предложена Л.И. Нейштадт [1957]. Подсчет плоскостной пустотности в форме предложенного коэффициента КТП широко вошел в отечественную практику изысканий. В зарубежной практике этот показатель трещиноватости, видимо, не используется. КТП Л.И. Нейштадт характеризует пустотность в плоском сечении массива. Для перенесения его на объем необходимо либо вводить поправку, вычисляемую из статистических соображений в зависимости от угла пересечения трещин с плоскостью обнажения, либо, проще, воспользоваться формулой М.В. Раца [1962] для объемной трещинной пустотности:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i + b_i} .$$

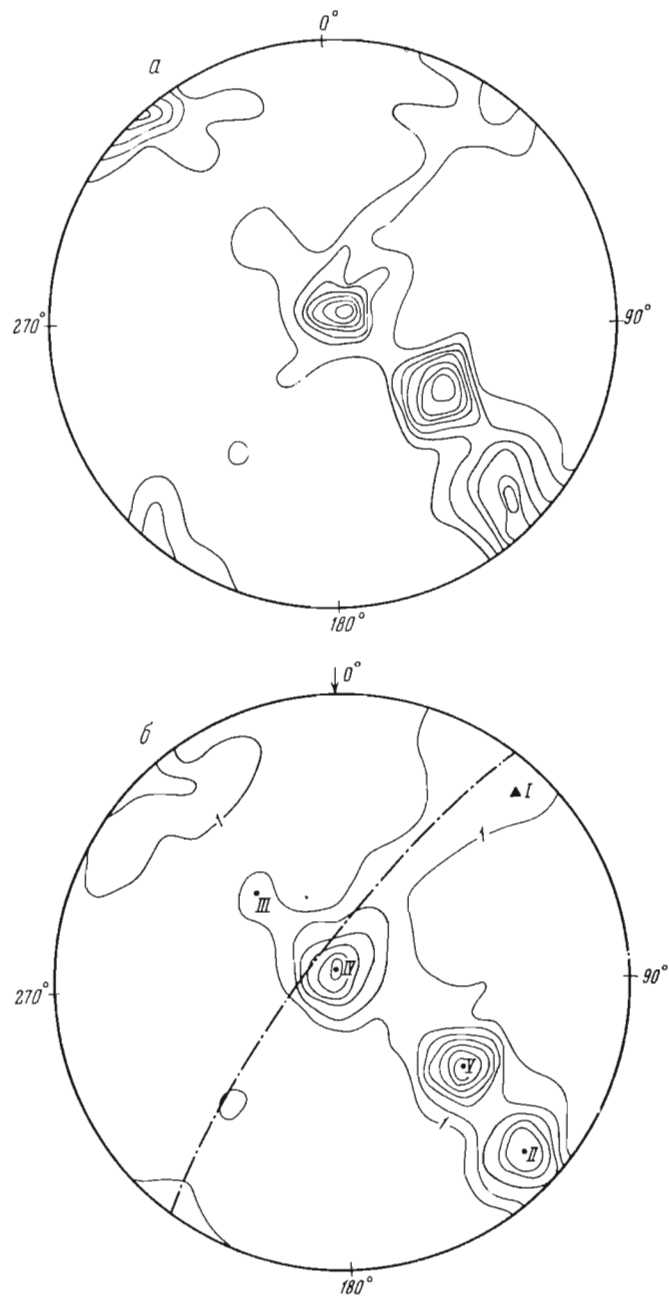


Рис. 65. Круговые диаграммы трещиноватости
 а — на сетке Каврайского, построенная с помощью ЭВМ; б — на сетке Шмидта, построенная по методу Шмидта

В это простое, предназначенное для ручной обработки материала, выражение не включены слагаемые второго и третьего порядка малости, учитывающие пересечение трещин. При больших b и малых a , когда $\Pi > 0,05$ из-за отсутствия этих слагаемых допускается систематическая положительная ошибка. Вычисляемое значение оказывается больше фактического. Эта ошибка составляет несколько процентов от результата и тем более, чем больше ширина трещин. С учетом пересечений трещин пустотность массива равна сумме пустотностей по системам за вычетом пустотности пересечений каждой двух систем плюс пустотность от совместного пересечения каждой трех систем. Вероятность пересечения в одной точке более чем трех трещин считаем равной нулю. Для этих условий полная формула объемной трещинной пустотности массива с пятью (или менее) системами трещин

$$\Pi = \sum_{j=1}^5 \Pi_j - \Pi_1 \Pi_2 - \Pi_3 \sum_{j=1}^2 \Pi_j - \Pi_4 \sum_{j=1}^3 \Pi_j - \Pi_5 \sum_{j=1}^4 \Pi_j + 2 [\Pi_1 \Pi_2 \Pi_3 + \Pi_4 (\Pi_1 \Pi_2 + \Pi_2 \Pi_3 + \Pi_1 \Pi_3) + \Pi_5 (\Pi_1 \Pi_2 + \Pi_1 \Pi_3 + \Pi_2 \Pi_3 \Pi_1 \Pi_4 + \Pi_2 \Pi_4 + \Pi_3 \Pi_4)],$$

где $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_j$ — пустотность за счет отдельных систем трещин с номерами 1, 2, 3, 4 и 5.

Вклад каждой отдельной системы в общую пустотность массива $\Pi_j = b_j / (b_j + a_j)$, b_j — средняя ширина трещин системы; a_j — среднее расстояние между трещинами.

Блочность горных пород в массиве наряду с пустотностью рассматривается как важнейший классификационный показатель массива трещиноватых пород. По своему значению для характеристики трещиноватых пород они соответствуют гранулометрическому составу и пористости для зернистых грунтов. Как пористость и гранулометрический состав при известной влажности позволяют судить о свойствах зернистого грунта, так пустотность и блочность совместно определяют ориентировочные значения показателей свойств скальных массивов. Ранее приведена таблица классификации массивов горных пород по пустотности и блочности с указанием модуля деформации и коэффициента фильтрации массива пород каждого класса [Рац и Чернышев, 1970]. Блочность может быть определена различными способами, рассмотренными, в частности, в работе С.Ф. Канаева [1972]. Один из наиболее удачных способов предложен А.В. Количко [1966]. При небольшой затрате времени на полевые работы, без специальных исследований, только на основании обычного обмера трещиноватости на обнажениях способ Количко позволяет получить распределение блоков породы в массиве по объему в виде гистограммы, совпадающей с гистограммой, получаемой по результатам обмера блоков в отвале после взрыва.

Принцип Количко был использован для расчета блочности на ЭВМ. В авторском изложении метод Количко, как и метод построения круговых диаграмм Шмидта, основан на графической процедуре. По Количко, поле графика разбивается на полигоны со сторонами, равными измеренным в натуре расстояниям между трещинами в соответствующем масштабе. Подсчитывается площадь полигонов. Каждое полученное значение умножается на среднюю мощность слоя и таким образом получается совокупность

объемов блоков, по которой строится гистограмма и эмпирически оцениваются моменты распределения размера блоков в массиве. Искомое распределение является функцией распределений расстояний трещин в системах. При графическом отыскании функции распределения блоков допускается несколько погрешностей, отчасти неизбежных в силу графического способа реализации метода.

1. Распределение расстояний между трещинами в одной из систем, называемой системой трещин напластования, условно сводится к постоянной величине, приравняваемой среднему. Допущение необходимо ввиду двумерности площади чертежа. Оно ведет к искажению искомого распределения, в частности, к снижению его дисперсии. Сильно снижается количество очень больших и малых блоков за счет увеличения количества средних. Ошибка невелика при исследовании слоистых толщ с малой дисперсией мощности слоев. Для изверженных, а также осадочных пород с большой дисперсией мощности слоев ошибка может быть значительной.

2. При графическом анализе в силу случайности сопоставления расстояний между трещинами из разных систем образуются блоки с соотношением сторон 10:1 и более. Если такие блоки могут существовать в массиве, то в отвале они будут разбиваться на более мелкие. Графический метод не учитывает дробления блоков и поэтому его следует считать методом оценки блочности в массиве. Для определения блочности в отвале необходима дополнительная операция дробления блоков.

При составлении программы для оценки блочности на ЭВМ мы сочли целесообразным устранить названные погрешности. Смысл программы сводится к моделированию выборки блоков с объемами V_1, V_2, \dots, V_n . Объем каждого i -го блока $V_i = f(a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}; \varphi_{i-11}, \varphi_{i-12}, \varphi_{i-13})$.

В явном виде объем тетраэдра запишется как произведение площади сечения, перпендикулярного одному из ребер, на высоту. Площадь сечения, перпендикулярного ребру, образованному пересечением систем 1 и 2, это площадь параллелограмма с углом при вершине, равном углу между плоскостями трещин 1 и 2. Высота — расстояние между трещинами системы 3 с поправкой за угол пересечения упомянутого ребра с системой 3. Объемы блоков всегда могут быть записаны из элементарных геометрических соображений. Когда углы между системами отличаются от прямого, эта запись становится громоздкой. Практически, как показывает исследование реальных сетей трещин (см. гл. 2), всегда имеется пара ортогональных систем. Им даются номера 1 и 2. Тогда $V_i = a_{i1}a_{i2}a_{i3}/\sin \varphi_{i-11}, a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}$ — расстояния между i -й и $(i+1)$ -й трещинами в системах соответственно 1, 2 и 3, см; φ_{i-11} — угол между ребром пересечения систем 1 и 2 и системой 3, град.

Общее количество блоков, получаемых после перебора всех введенных в расчет состояний a_1, a_2 и a_3 равен произведению $n_1 n_2 n_3$ количества расстояний, измеренных в первой, второй и третьей системах. При таком порядке действия каждый из рядов выступает как последовательность случайных величин и исправляется первая погрешность графической процедуры. При этом количество членов моделируемой на ЭВМ выборки увеличивается по отношению к выборке, составляемой графически, во столько раз, сколько трещин измерено в первой системе, ранее условно названной системой напластования, т.е. обычно в 30–50 раз. Таким образом форми-

Таблица 36

Распределение блоков (в %) по объему, определяемое различными методами

Метод оценки блочности	Объем блоков, м ³				
	0–0,02	0,02–0,05	0,05–0,07	0,07–0,09	0,09–0,11
I	66,2	16,5	11,8	3,9	1,6
II	63,0	14,0	15,0	4,0	4,0
III	71,8	15,4	5,0	2,6	2,6

Примечание. I — измерение в отвале после опытного взрыва; II — оценка по параметрам трещиноватости графически; III — оценка по параметрам трещиноватости на ЭВМ.

Таблица 36 (окончание)

Метод оценки блочности	Объем блоков, м ³					
	0,11–0,13	0,13–0,15	0,15–0,19	0,19–0,21	0,21–0,35	0,35–0,37
I	0	0	0	0	0	0
II	0	0	0	0	0	0
III	0	0	0	1,3	0	1,3

руется матрица порядка $n \times 4$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & V_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & V_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & V_n \end{pmatrix},$$

где для простоты расстояния между трещинами обозначены теми же индексами и каждая строка матрицы представляет один шаг указанной процедуры.

Для исправления второй погрешности в каждой строке матрицы ищем a_{\max} и a_{\min} и вычисляем отношение a_{\max}/a_{\min} . Для установления предельных величин этого отношения проверяется условие $a_{\max}/a_{\min} \leq F$, F — максимальное соотношение ребер, при котором блок не разламывается на части при отделении его от массива.

Составляем вектор-строку из значений V_i следующим образом. Если для соответствующей строки матрицы последнее условие выполнено, то соответствующее значение V_i заносим в строку. Если условие не выполнено, то вычисляется $V'_i = V_i/F^k$, где $F^k = [a_{\max}/F a_{\min}]$. Здесь квадратными скобками обозначено ближайшее целое отношения. В этом случае в вектор-строку F' раз заносится значение V'_i .

Для построения гистограммы определяются частоты попадания объемов V_i в заданные интервалы. Вычисляются также соответствующие заданным по V_k границам граничные веса $V_k \gamma_{об}$ и граничные поперечники блока $\sqrt[3]{V_k}$.

Таблица 37

Блочность горных пород в массиве

№ интервала	Интервалы			Распределение блоков по интервалам (% шт.) в съемных точках			
	по поперечникам блоков, см	по объемам блоков, см ³	масса блока, кг	453	466	457	452
1	0–5	0–125	0,2	0	17,1	0	0
2	5–10	125–1 000	1,5	36,7	45,1	5,7	33,3
3	10–15	1 000–3 375	5,9	50,5	34,3	14,3	36,4
4	15–20	3 375–8 000	15,3	13,3	2,9	25,7	27,3
5	20–23,3	8 000–12 625	27,8	0	0	14,3	3
6	23,3–30	12 625–27 000	53,5	0	0	28,6	0
7	30–35	27 000–42 875	94,3	0	0	5,7	0
8	35–40	42 875–64 000	144,3	0	0	2,9	0
9	40–45	64 000–91 125	209,4	0	0	2,9	0
10	45–50	91 125–125 000	291,8	0	0	0	0

Примеры результатов счета по программе "Блоки" приведены в табл. 36 и 37, где показано сопоставление машинной обработки с ручной обработкой, по Количко, и измерениями блочности в отвале после опытного взрыва. В табл. 36 даны материалы по известнякам, обнаженным в р-не Нурекской ГЭС. Измерения блочности после опытного взрыва выполнены геологами экспедиции САО Гидропроекта. Измерение трещиноватости – полевым отрядом ПНИИИС. В табл. 37 показан опыт применения программы для оценки блочности пород на участке ГОКа Эрденет в МНР, где автором совместно с Н.М. Хайме и М.И. Погребиским проведена инженерно-геологическая съемка.

Приведенные здесь результаты проверки и последующий опыт применения программы в ПНИИИС и других организациях показал, что применение ЭВМ для обработки материалов исследования трещиноватости приводит к значительной экономии времени на камеральную обработку без потери качества результатов.

Глава 7

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Сеть трещин в каждом массиве обладает конкретными параметрами ориентировки, частоты, ширины и длины трещин. Прямые измерения этих параметров позволяют построить структурную модель сети трещин для отдельных ключевых точек массива и проследить изменение параметров от одной точки к другой по пространству массива. Модель, построенная по результатам прямых измерений геометрических параметров, позволяет решить многие практические и научные задачи. Однако прямые измерения трещин часто бывают невозможны из-за отсутствия обнажений, недостатка горных

выработок или времени. Поэтому наряду с методами непосредственного измерения геометрии трещин развиваются методы дистанционного исследования трещиноватости, основанные на связях параметров трещин с различными свойствами массивов. Это методы опосредствованной или косвенной оценки трещиноватости.

Такая оценка всегда связана с потерей информации. Трещины влияют фактически на все свойства массива. Трудно найти процесс, который протекал бы в массиве без зависимости от его трещиноватости. Поэтому косвенных методов определения может быть и уже предложено очень много. Однако ни один процесс и, пожалуй, ни одно свойство массива не определяются каким-то одним параметром сети трещин. Они находятся в сложной зависимости от многих параметров как трещин, так и горных пород. Косвенные методы не позволяют выявить влияние отдельных параметров структурной модели сети трещин и определить эти параметры. Они в большинстве своем дают относительную оценку степени трещиноватости для различных точек (участков) или различных направлений в массиве. Результаты косвенных оценок трещиноватости широко используются при районировании массива и на основе корреляции зависимостей применяются для оценки водопроницаемости и других свойств массива.

Наиболее распространенные косвенные методы определения трещиноватости в массиве основаны на измерениях поглощения воды или воздуха трещиноватым массивом и на измерении скорости упругих волн. Главное их достоинство – характеристика трещиноватости в глубине массива, недоступной для непосредственного наблюдения.

§ 7.1. Геофизические методы

Обнаружение и прослеживание зон повышенной трещиноватости, определение направления систем трещин и пустотности массива выполняется сейсморазведочными, электроразведочными методами, методами эманиционной и углекислотной съемки и магнитометрии, применяемыми обязательно в комплексе с непосредственным измерением трещин в скважинах, горных выработках и на обнажениях. Наибольший эффект при изучении трещиноватых зон дает комплексирование геофизических методов не только с инженерно-геологическими, но и между собой.

Сейсмические методы используются для определения интенсивности трещиноватости и изменения ее по различным направлениям [Методика изучения трещиноватости..., 1969; Сейсмоакустические методы..., 1969]. Методика оценки мелкой трещиноватости принципиально сходна с методикой исследования и трассирования зон тектонических нарушений. Для определения направления основных систем трещин в массиве используются упругие колебания, длина волн которых имеет порядок расстояния между трещинами. Практически работа ведется на ультразвуковых частотах от 10 до 20 кгц. Измерения производятся на коротких по отношению к неоднородностям базах.

В качестве примера эффективной оценки систем трещин сейсмоакустическим методом можно привести результаты исследований А.И. Савича по Ингури ГЭС. В моноциально залегающей толще нижнемеловых известняков на р. Ингури в западной Грузии породы характеризуются интенсивной тектонической трещиноватостью системного типа. Геологическими методами выделено шесть систем трещин, генетически

связанных со складкой и разрывами, имеющимися на участке. Наиболее крупное в пределах основания плотины разрывное нарушение – правобережное взбросо-сдвиг с крутым положением плоскости разрыва. Ширина трещин значительная. Около 40% трещин имеют ширину более 1 см, а 25 трещин – более 10 см. Трещины заполнены глинистой брекчией, глиной или залечены кальцитом. Удельное водопоглощение крайне неоднородное. На фоне преимущественно низких значений встречаются зоны повышенного и высокого водопоглощения, обусловленного интенсивной трещиноватостью. Для определения направлений систем трещин выполнены ультразвуковые наблюдения на отдельных площадках с базой измерений 25–30 см. Получены скорости продольных волн V_p для 10–16 различных направлений. Значения скоростей резко, в 3 раза, меняются по направлениям (рис. 57). Скорости, очевидно, возрастают для направлений вдоль трещин и зон дробления, когда волны распространяются по “слоям” относительно сохраненных пород. В этом случае скорости достигают 6 км/с. Для направлений поперек зон дробления и трещин скорости невелики и составляют 2,0–2,5 км/с. Интерпретация векторной диаграммы подтверждается сравнением с розой простирания трещин.

На том же объекте А.И. Савичем на основании измерения скоростей распространения низкочастотных колебаний определена пустотность массива. Параллельно с сеймопрофилированием выполнена детальная инженерно-геологическая съемка. По данным сейморазведки пустотность оказалась 4,5–0,45%. По данным непосредственных измерений 3,0–0,3%. Если учесть, что сейсмоакустические измерения относятся к внутренним частям массива, а геологические – к обнаженным породам на стенках штолен, где трещины расширены, то следует признать, что по данным сейсмики пустотность массива завышена не менее, чем в 2 раза. Однако для ориентировочной оценки пустотности такие ошибки допустимы. Пустотность в массиве для разных участков различна не менее, чем на порядок, поэтому сеймопрофилирование успешно используется для районирования массива по степени трещиноватости.

Сеймопрофилирование с целью выделения зон повышенной трещиноватости в известняках каменноугольного возраста на территории Москвы выполнено сотрудниками МГУ [Ляховицкий, Моргун, Чертков, 1981]. Известняки на исследованном участке трещиноватые и закарстованные. В отдельных зонах по скважинам полости составляют от 6 до 13% объемов толщи. Частично они заполнены доломитовой мукой, обломками карбонатных пород и песком. Работы выполнялись методом преломленных волн на высокочастотной фильтрации (70–100 гц). Граничная скорость по кровле карбонатных пород составила от 2,6 до 4,1 км/с. Зоны повышенной трещиноватости выделялись по следующим признакам: а) понижение граничной скорости относительно среднего значения для района; б) изменение характера волновой картины в последующей части записи, например, исчезновение обменных волн типа *PSP*; в) уменьшение амплитуды и кажущейся частоты колебаний; г) осложнение формы записи преломленной волны из-за интерференционных явлений. Основным признаком для выделения зон считалась граничная скорость, которая характеризует верхние 20 м толщи известняков. По результатам исследований удалось на плане выделить участки с качественно различной трещиноватостью.

Таким образом, сейморазведочные методы позволяют получить качественные ориентировочные оценки изменения трещиноватости по направлениям и в плане, т.е. оценить неоднородность и анизотропию массива, вызывающие трещиноватость.

Комплекс геофизических методов для подтверждения и прослеживания под четвертичными отложениями разрывных нарушений и зон повышенной трещиноватости, выделенных при инженерно-геологической съемке, применен нами при сейсмическом районировании промышленного района Эрденета в МНР [Сейсмическое районирование..., 1980]¹. В комплекс были включены эманационная съемка, сейморазведка, электроразведка и магниторазведка. Инженерно-геологические работы проводились методами дешиф-

рования аэроснимков, аэровизуальных и наземных маршрутных наблюдений, документации трещин на обнажениях, колонкового бурения.

Район сложен гранодиоритами, гранитами, порфирами и другими магматическими породами, находящимися в сложных взаимоотношениях, в значительной степени метаморфизованными и разбитыми разрывами. Многие разрывы с амплитудами в сотни и тысячи метров формировались в кайнозое, остаются активными в современную эпоху и хорошо выражены геоморфологически. Землетрясения в районе исследования достигают 10 баллов, непосредственно на территории ГОКа и города $I_0 = 8$ баллов. Имеются сеймотектонические дислокации, хорошо выраженные в рельефе как в рыхлых, так и в скальных породах. Наиболее молодые из них связаны с Могодским землетрясением 1967 г.

Сейморазведочные исследования выполнялись сейморазведочной станцией типа СМР-24 с регистрацией сигналов на ферромагнитную пленку и последующим воспроизведением их на бумаге с помощью перописца. Частотный диапазон сквозного тракта равен 20–100 Гц.

При наблюдениях использовался метод преломленных волн (МПВ) в модификации непрерывного сейсмического профилирования вдоль разведочных линий или сеймозондирования в отдельных пунктах. Последние, как правило, возле скважин. Реализовалась корреляционно увязанная система наблюдений с получением встречных и нагоняющих годографов. В качестве датчиков использовались 24 сеймоприемника С-120 или С-130, смонтированные на косе длиной 46 м. Расстояние между сеймоприемниками 2 м. На каждой стоянке регистрация велась из четырех пунктов удара, при этом получались встречные и нагоняющие годографы на расстояниях 0–46 и 46–92 м от пункта удара, т.е. максимальная длина годографов достигала 92 м. Возбуждение упругих колебаний производилось ударами молота весом 8–10 кг в деревянную подставку, вкопанную в грунт. На территории г. Эрденета проведены работы на отрезке профиля с расстоянием между сеймоприемниками 5 м, максимальной длиной годографа 230 м и с помощью ударной установки. Работы велась до начала строительства.

Большая часть сейморазведочного материала получена при наблюдениях по схеме *ZZ*: вертикально направленные удары и вертикально ориентированные сеймоприемники. Примерно 20–30% профилей и зондирований дублировались наблюдениями по схеме *YY*: горизонтально направленные удары и горизонтально ориентированные сеймоприемники. Совместные наблюдения по схемам *ZZ* и *YY* позволяют надежно выделять на записях как продольные, так и поперечные волны.

Обработка сейморазведочного материала заключалась в построении по сеймограммам годографов и в определении по этим годографам граничных скоростей и границ. Для определения средних скоростей в отдельных слоях или в толще наносов в целом проводились специальные исследования в скважинах и шурфах.

Линии сейморазведочных профилей на площадках строительства совпадали с отдельными профилями, по которым проводилось бурение или проходка горных выработок. Сейморазведочные работы были выполнены в виде системы профилей как на основных участках проектируемого строительства, так и вне площадок для выяснения геологических условий на межплощадочных пространствах в пределах контура съемки. Отдельные сеймозондирования, каротажные исследования и измерения средних скоростей проведены на большинстве скважин. Опытные сейморазведочные работы выполнены также на сейсмодислокациях в районе Эрденета, Могоин-гола и Могода. В среднем на 1 км² разведанной площади, покрытой съемкой, приходилось 0,5 пог. км профилей сейморазведочных исследований. На строительных площадках на каждый 1 км² площади приходилось до 2–4 пог. км профилей.

Электроразведка. На электроразведочных работах использовался стандартный электрострелочный компенсатор ЭСК-1, предназначенный для проведения электроразведки на постоянном токе. Применялись следующие модификации электроразведки – метод вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), электропрофилирование симметричным и несимметричным установками.

ВЭЗ использовались для расчленения толщи пород на геоэлектрические слои и картирование кровли скальных пород. Максимальные размеры установки ВЭЗ достигали 500–1000 м, иногда до 2000 м. Такие размеры позволяли изучать разрез на глубину до 100 м. Точки ВЭЗ располагались, как правило, вдоль буровых разведочных линий, расстояния между точками по профилю составляли 25–30 м. Поскольку скважины

¹ Геофизическими работами руководил И.Г. Миддель.

располагались через 100-200 м вдоль профиля, а их глубина не превышала 10-20 м и часто не достигала кровли скальных пород, данные ВЭЗ позволяли получать ценную информацию о разрезе. Параметрические электротзондирования выполнены на всех скважинах, пробуренных до глубины 100 м.

Интерпретация кривых ВЭЗ осуществлялась по палеткам А.М. Пылаева с использованием электрических характеристик слоев, полученных по данным параметрических кривых на скважинах.

Электропрофилирование симметричными и несимметричными установками проводилось на отдельных участках для обнаружения и картирования зон трещиноватости и дробления в скальных породах, а также над обнаруженными дислокациями типа задержанных рвов для выяснения их природы. Профилирование проводилось на двух-трех разосах. Работы носили детальный характер, поэтому расстояния между точками электропрофилирования по профилю варьировали от 1 до 10 м. На графиках ρ_k симметричного и комбинированного профилирования выделялись зоны максимумов, которые, как правило, были приурочены к зонам трещиноватости и дробления вблизи поверхности, где заполнителем межтрещинного пространства служил воздух (рис. 66).

Эманационная съемка. Образование эманационных аномалий связано с процессами активного выделения газовых эманаций в окружающую среду. Это физически сложное явление, в основе которого согласно современным представлениям лежит процесс α -распада изотопов радия, тория и актиния. Миграция образующихся эманаций в породах объясняется процессами диффузии и конвекции. До недавнего времени предполагалось, что эманационные аномалии имеют место в отложениях, перекрывающих радиоактивные рудные тела или зоны крупных разломов, причем мощность перекрывающих отложений не должна превышать 8-10 м. При этом существенное значение могут иметь лишь радоновые эманации: период полураспада радона 3,82 сут, торона -- 54,5 с, актинона -- 3,9 с, торий и актиний распадаются очень быстро и их миграционная способность очень слабо выражена. Подобные соображения не могут объяснить образования сильных эманационных аномалий, преимущественно торона, в покровных отложениях большой мощности (до сотен метров) при отсутствии в них крупных разломов, радиоактивных руд, конвективных струй и тому подобного.

По предположению, подтвержденному практическими исследованиями в районе Донбасса, а также лабораторными испытаниями, причина возникновения подобных аномалий состоит в том, что современные средне- и мелкоамплитудные движения вызывают резкое повышение содержания радиоактивных эманаций в почве [Горбушина, Рябоштан, 1974]. Причем эманации выделяются из самих перекрывающих отложений. В настоящее время существует версия о наличии пространственной и временной связи между эманационными аномалиями и зонами современных тектонических движений.

Современные тектонические движения приводят к образованию новых и оживлению старых тектонических нарушений в массиве. Обнаружение подобных нарушений под толщей перекрывающих отложений чрезвычайно сложно, тем не менее эманационная съемка в комплексе с другими геофизическими методами позволяет решать эту задачу.

Эманационная съемка заключалась в отборе проб воздуха из грунта с глубины 50-70 см с последующим анализом их в ионизационной камере. Расстояния между точками по профилю составляли 5-10 м, профили размещались вкрест предполагаемым нарушениям. Съемка производилась эманометрами типа М-6 и "Радон". Поскольку нас интересовали лишь относительные изменения содержания эманаций, результаты выражались непосредственно в числе импульсов в минуту. Эманационный фон в районе Эрденета составляет 100-120 имп/мин.

Аномалии, которые можно объяснить влиянием геодинамически активных зон, превышают фоновые содержания в 3-5 раз. Аномалии носят преимущественно торо-

Рис. 66. Электрический профиль поперек сейсмодислокаций

1 - AMN ∞ АО-ВО-32; 2 - ∞ MNB [Сейсмическое районирование..., 1980]

новый характер. Об этом свидетельствует факт уменьшения в течение первых 2-3 мин интенсивности эманаций в 2-3 раза.

Интенсивность аномалий, по видимому, связана также с состоянием зоны нарушения в каждый момент. Исследования, проведенные нами в Эрденете по одним и тем же линиям, свидетельствуют об изменении во времени интенсивности эманаций в аномальных точках. В связи с этим выявилась необходимость проведения двух-трехкратных измерений содержания эманаций по одним и тем же профилям. Лишь в том случае, когда в различное время на одних и тех же точках вне зависимости от фона ионизационной камеры и других аппаратурных причин фиксировались аномальные содержания эманаций, такие аномалии фиксировались с точки зрения их возможной связи с зонами тектонических нарушений.

Для контроля за работой манометров, для увязки значений интенсивности эманаций при работе с различными ионизационными камерами наблюдения начинались и кончались в одной и той же контрольной точке.

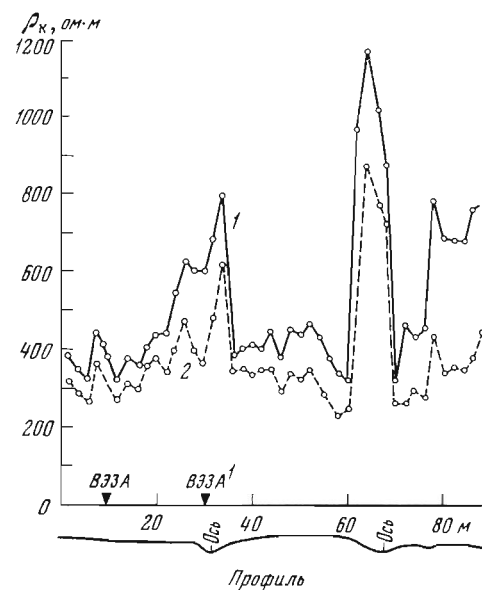
Магниторазведка была включена в комплекс геофизических исследований с целью более надежного картирования, обнаружения и прослеживания зон тектонических нарушений. Магниторазведочные работы проводились в опытном порядке по тем же профилям, по которым проводились электропрофилирование и эманационная съемка. Эти профили обычно пересекали зоны тектонических нарушений, ранее выделенные по геологическим и геоморфологическим признакам.

Магниторазведочные работы проводились с помощью магнитометра М-27, позволяющего измерять вертикальную составляющую магнитного поля. Цена деления шкалы магнитометра - 10 гамм. Наблюдения начинались и кончались на постоянном контрольном пункте (КП), установленном на базе, а в процессе работ на каждом из участков использовались временные КП. Расстояние между точками измерений на различных участках изменялось от одного до десяти метров.

Совместный анализ графиков ΔZ , ρ_k и графиков изменения интенсивности радиоактивных эманаций позволяет с большой степенью вероятности судить о минералогическом составе и степени нарушенности коренных пород, особенно в местах их выхода на поверхность.

Основное внимание было уделено геофизической проверке наличия в толще пород нарушений, первоначально выделенных по данным геологической съемки. Исследования были сосредоточены в районе уже нанесенных на план зон разрывов, дробления и смещения в основном в скальных породах, а также на участках развития сейсмодислокаций типа задержанных рвов, замеченных визуально.

Применялось комбинированное и симметричное электропрофилирование с расстоянием между точками по профилю от 1 до 10 м, непрерывное сейсмическое профилирование с ударным способом возбуждения упругих колебаний и расстоянием между сейсмоприемниками по профилю 1 и 2 м, эманационная съемка с расположением точек отбора воздуха из почвы через 2,5 и 10 м, и в опытном порядке выполнялись магниторазведочные исследования. При большой толще наносов для суждения о наличии в скальных породах зон нарушений привлекались также данные по вертикальному электрическому зондированию.



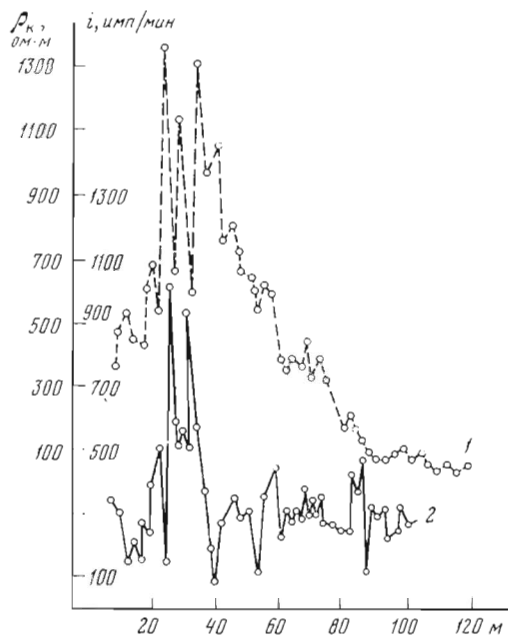


Рис. 67. Выделение тектонических нарушений по результатам комбинированного электропрофилирования (1) и эманационной съемки (2)

О наличии в массиве близко залегающих к поверхности скальных пород зон разрыва, трещиноватости и дробления свидетельствуют некоторые признаки в измеренных геофизических полях. Рассмотрим главные из этих признаков.

На графиках комбинированного и симметричного электропрофилирования отмечаются максимумы значений ρ_k . Физическая природа этого явления заключается в том, что при заполнении трещинных пустот и пор воздухом электропроводимость зон нарушений хуже, чем у ненарушенных пород.

В слабо трещиноватых породах (гранодиоритах, диоритах, андезитах, порфиритах и др.) удельные электрические сопротивления находятся в пределах 450–1700 Ом·м. В интенсивно трещиноватых и каолинизированных породах этот показатель снижается до 40–400 Ом·м.

На сейсмограммах прослеживаются дифрагированные волны. Физическая природа явления заключается в том, что стенки трещин являются препятствием для распространения прямых и поверхностных волн, которые дифрагируют на плоскостях отрыва или других вертикальных и наклонных границах, на "элементах дифракции", которые могут рассматриваться в качестве нового источника колебаний, распространяющихся во все стороны, в том числе и в направлении, противоположном тому, в котором распространяются волны от действительного источника (удара). Именно поэтому оси синфазности дифрагированных волн располагаются на сейсмограммах под углом к осям синфазности прямых, преломленных и поверхностных волн. Как показал анализ волновой картины на сейсмограммах, наиболее четко различимы дифрагированные волны, вызванные падением на плоскость отрыва или другую вертикальную границу энергетически сильного пакета поверхностных волн при выходах трещин на поверхность или под наносы, мощность которых меньше длины волн Рэлея [Миндель, Голубков, 1974]. Ослабление интенсивности колебаний после прохождения волнами зон нарушений в массиве скальных пород, интерференция различных типов волн в зоне влияния нарушения являются дополнительными признаками волновой картины на сейсмограммах, которые используются при обнаружении разрывных нарушений.

Уменьшение скоростей упругих волн в зонах дробления и трещиноватос-

ти фиксируется в случаях, когда размеры этих зон в однородных по литологическому составу породах составляют несколько десятков метров. При малой ширине подобных зон изменение скорости незаметно, т.е. это явление имеет место, но не улавливается при нашей системе наблюдений.

Над активными зонами нарушений отмечается повышенное содержание эманаций тория и радия в почве. Неустойчивое геодинамическое состояние пород в подобных зонах, концентрация и изменение напряжений, неощутимые подвижки и колебания в нарушенных зонах, источником которых могут быть слабые землетрясения, микросейсмы и прочее, являются причиной "выжимания" дополнительных порций эманаций из пор породы. Отметим, что эманационная съемка является почти единственным из геофизических методов, позволяющих судить об активности нарушения, т.е. о динамике явления. Все названные электроразведочные и сейсморазведочные методы позволили судить о наличии или отсутствии нарушенных зон.

На рис. 67 приведен пример исследования зоны разрыва и дробления на территории промплощадки ГОКа с помощью эманационной съемки и комбинированного электропрофилирования. Как видно, в пределах зоны интенсивность эманаций достигает 500–900 имп/мин, а значения ρ_k не превышают 600–700 Ом·м при длине установки $AO=OB=15$ м. По данным эманационной съемки и электропрофилирования ширина зоны нарушения оценивается в 30–60 м.

Для выяснения природы зафиксированных аномалий и для наблюдения в натуре этой зоны нарушения на всю ее ширину были пройдены две разведочные канавы: канава 1 длиной 52 м на участке, где фиксировались аномалии по всем геофизическим методам; канава 2 длиной 70 м на участке, где фиксировались аномальные значения электросопротивлений, аномальные признаки в волновых картинах на сейсмограммах ударов, но отсутствовала эманационная аномалия.

Результаты весьма детальных, с расстоянием между точками замеров 1 или 2 м, исследований вдоль канавы 1 и состав вскрытых пород в стенке и на дне канавы показали, что эманационная аномалия, фиксировавшаяся при шаге 5 м как единая, делится на ряд отдельных пиков с характерной "двугорбой" формой, при этом каждый пик приурочен к рухляковому гранодиоритам. При ударе молотком эти гранодиориты рассыпаются и превращаются в дресву. К участкам разрушенных гранодиоритов приурочены также высокие значения электросопротивлений на графиках ρ_k . Дайкам порфиритов и андезитов, представляющих собой трещиноватые, но достаточно прочные по сравнению с гранодиоритами породы, приурочены минимумы на графиках интенсивности эманаций и ρ_k . Дайки порфиритов хорошо отмечаются магнитными аномалиями.

Таким образом, по результатам геофизических исследований, проверенных разведочными канавами, надежно прослеживается зона тектонического дробления пород.

§ 7.2. Другие косвенные методы

Углекислого газовая съемка. Содержание углекислого газа в почвенном воздухе, как и содержание эманаций, может быть, по крайней мере в некоторых районах, показателем степени трещиноватости подстилающих горных пород. Повышенное содержание углекислого газа над зонами трещиноватости и мелкими разрывными нарушениями установлено А.Я. Егоровым [1981] в Молдавии на площадях, сложенных сарматскими отложениями — плотными глинами и слабо цементированными песками.

Методами инженерно-геологической съемки, сопровождающейся бурением, горными работами, эманационной съемкой трещиноватости, в глинах и покровных суглинках выявлены трещины тектонического характера и разрывные смещения, которые сопровождаются трещинами оперения. Раскрытие трещин достигает максимально

0,1 см. Трещинная пористость глин находится в пределах 2-12%. Этого достаточно, чтобы по трещинам циркулировали подземные воды и газы. Трещины многих изученных зон оживлены оползневым процессом. Однако их происхождение нельзя связывать с оползнями, так как они встречаются вне оползневых участков и не выказывают определенной зависимости от рельефа. А.Я. Егоров приводит явные признаки тектонического происхождения трещин: системность, значительную протяженность, и выдержанность параметров трещин по простиранию и по глубине, неизменность ориентировки трещин при пересечении различных пород. Очевидно, что трещины оживляются при землетрясениях, нередких в этом 7-балльном районе.

Углекислородная съемка проводилась с целью трассирования разрывных нарушений на оползневом склоне, где эти нарушения ранее выявлены другими методами, и, в частности, эманиционной съемкой. По мнению автора метода, углекислородная съемка в сравнении с эманиционной требует меньше времени и дает более четкие результаты. Измерения проводились японским газовым индикатором "Рикен" с ценой деления 0,01%. Приборы аналогичной конструкции выпускаются в СССР. Определялось суммарное содержание углекислого газа и метана и содержание метана после изъятия углекислого газа гидрхимическим поглотителем. Окончательно содержание углекислого газа определялось по разности двух измерений. Воздух для анализа откачивали в основном с глубины 0,5-0,4 м. Специальными измерениями было установлено, что глубина отбора пробы в пределах 0,2-0,7 м не влияла на содержание CO_2 . Во время откачки воздуха содержание CO_2 менялось (рис. 68). Оно возрастало в течение первой минуты и достигало максимума, величина которого находилась в зависимости от атмосферного давления и структурных особенностей грунта. В течение следующей минуты или двух содержание углекислого газа снижалось почти до нуля на участках, лишенных трещиноватости. Над разрывами содержание углекислого газа стабилизировалось на уровне около 0,15 м. При этом в зонах продольных к оползневому склону разрывов содержание CO_2 оказалось несколько выше, чем в зонах поперечных разрывов. Это объясняется раскрытием продольных трещин при оползании глин.

Таким образом, содержание углекислого газа служит показателем трещинной проницаемости подстилающих горных пород, скрытых под многометровой толщей наносов. Применение углекислородной съемки возможно только в комплексе с другими методами. Этот новый метод требует проверки и может оказаться эффективным способом обнаружения активных разрывов, их трассирования, определения ширины зоны оперения.

Расходомерия и резистивиметрия в буровых скважинах. Расходомерия — измерение расхода воды непосредственно в стволе скважины при откачке, наливе, самоизливе или при перетекании воды по стволу скважины из одного горизонта в другой. В трещиноватых породах методом расходомерии выявляют интервалы скважин повышенным раскрытием трещин, которые поглощают или изливают воду. Решение задачи основано на том, что расход потока воды вдоль оси скважины изменяется лишь в интервалах, сложенных водопроницаемыми породами, а в интервалах, сложенных водоупорами, остается постоянным или равным нулю. График изменения расхода воды по глубине скважины (рис. 69) имеет ступенчатую форму. Он позволяет определить глубину залегания, мощность по скважине и водообильность отдельных трещиноватых зон. Границы пластов, отличающихся по фильтрационным свойствам, фиксируются точками излома расходомерического графика. Дебит водопритока или водопоглощения любого интервала скважины устанавливается по разности между расходами воды на границах интервала.

При проведении опыта расход измеряется с помощью глубинного расходомера, основной частью которого является крыльчатка, вращаемая потоком воды [Гринбаум, 1975]. Прибор проводят вдоль скважины от

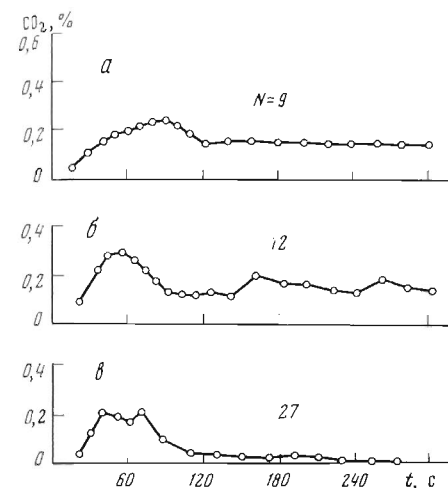
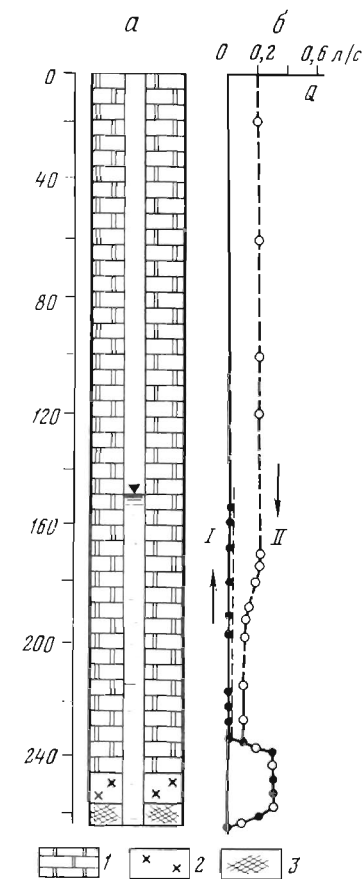


Рис. 68. Обобщенные графики изменения концентрации углекислого газа в пробах почвенного воздуха во времени от начала откачки

а — над продольными разрывами; б — над поперечными разрывами; в — вне зон разрывов (по А.Я. Егорову [1981])

Рис. 69. Результаты расходомерии скважины

а — литологическая колонка скважины; б — расходограмма при статическом уровне (I) и наливе (II); 1 — доломит; 2 — фосфорит; 3 — зона дробления (по И.И. Гринбауму [1975], с изменениями)



забоя до уровня подземных вод, динамического или статического. При малых расходах в нефонтанирующих скважинах расход удобно определять с помощью резистивиметра. Этот прибор предназначен для измерения электрического сопротивления воды в скважине и входит в комплект каротажной станции. Для определения расхода резистивиметром воду в скважине до определенной глубины осолоняют хлористым натрием, создавая концентрацию 2-4 г/л. Измеряя электрическое сопротивление, определяют скорость продвижения фронта раствора соли или рассоления раствора подземными водами. При исследовании скважин с пресными водами приходится заменять природные воды на пресные в определенном интервале скважины.

В качестве примера рассмотрим исследование скважины близ Джезказгана в Казахстане (рис. 69). Скважина пробурена в доломитах ордовика колонковым способом с промывной водой до глубины 265 м. Статический уровень подземных вод установился на глубине 153 м. Обводненный интервал пройден диаметром 110 м. Скважина не обсажена. На забое находятся сильно трещиноватые доломиты. При статическом уровне воды скважина исследована расходомером. Расходограмма I (рис. 69, б) четко фиксирует поступление воды в интервале 233-239 м в количестве 0,3 л/с и пе-

ростекание ее в интервал 260–265 м. Затем в скважину произведен налив воды с постоянным дебитом 0,2 л/с. Расходограмма // показывает, что при наливе некоторое поглощение воды произошло на глубине около 180 м. Следовательно, здесь отмечается раскрытые трещины. Далее до глубины 233 м расход потока в стволе скважины не меняется, следовательно, здесь нет открытых трещин. В интервале 233–239 м расход возрастает за счет притока воды из стенок скважины. Вторым опытом подтверждена значительная трещиноватость доломитов в этом интервале скважины, не отмеченная при бурении. Возможно, что в этом интервале трещины не учащены, а только раскрыты. Расходометрия, как большинство косвенных методов, в данном случае дает смешанную характеристику трещиноватости, не выделяя изменения отдельных параметров трещин. В интервале 260–265 м стенки скважины поглощают всю нагнетаемую и притекающую из других интервалов воду. Наличие потока в скважине при статическом уровне позволяет заключить, что вскрытые трещиноватые зоны в массиве разобщены и получают питание подземными водами на различных абсолютных отметках.

Таким образом, расходометрия позволяет выделять зоны открытых трещин в массиве горных пород и судить об их объединении за пределами скважин.

Гидрогеохимические и пьезометрические наблюдения. Использование потоков подземных вод как индикаторов зон повышенной трещиноватости и водопроницаемости возможно на основе материалов геологической съемки и режимных наблюдений за уровнем и составом подземных вод. К сожалению, эти возможности не всегда используются, а предпочтение отдается более дорогим и технически сложным методам. Преимущество гидрогеологических наблюдений в площадной характеристике явления.

Показателями трещиноватых зон на местности могут быть ряды источников, высачивание подземных вод, прогрев поверхности подземными водами по определенным линиям. Эти признаки хорошо дешифрируются на аэрофотоснимках и при аэровизуальных наблюдениях, особенно осенью в период выпадения первого снега. Заблоченность вершины холма, наличие на нем верховодки может служить признаком слабой водопроницаемости, а следовательно, и слабой трещиноватости массива.

На левом берегу Ангары на высоте 100 м над рекой круглый год залегала линза верховодки, указывая на водоупорный характер траппов на участке. Нагнетания подтвердили отсутствие открытых трещин в куполе Толстого мыса, на вершине которого наблюдалась верховодка. На противоположном берегу Ангары уровень подземных вод держался на отметке уреза воды в реке почти во всех скважинах. Колебания уровня в реке мгновенно передавались на сотни и тысячи метров. Это указывало на значительную открытую трещиноватость. Последующие наблюдения подтвердили наличие открытых трещин на этом участке. Первым показателем открытых трещин был режим подземных вод.

Гидрохимические исследования состава морской воды из придонных слоев позволяют обнаружить зоны крупных разломов на дне Красного моря. Более мелкие разрывы обнаруживаются по аномальным изменениям химического состава иловых вод в верхнем слое донных осадков [Батоян и Королев, 1976].

Нагнетания воды и воздуха в скважины. Нагнетания воды и воздуха в скважины для косвенной оценки водопроницаемости и трещиноватости используются в гидротехническом строительстве при инженерно-геологических изысканиях. Метод основан на связи поглощения воды и воздуха скальным массивом со степенью трещиноватости.

При нагнетании воды показателем трещиноватости служит удельное водопоглощение — расход воды, отнесенный к 1 пог. м ствола скважины и 1 пог. м напора. По определению для водонасыщенного массива $q = Q/hl$,

q — удельное водопоглощение, условно измеряемое в л/мин · м; h — напор над статическим уровнем подземных вод, м; l — длина поглощающего интервала скважины, м; Q — расход нагнетаемой воды, л/мин. Для сухого массива удельное водопоглощение следует рассчитывать по формуле¹ $q = 1,43Q/l^2$ [Количко, Чернышев, 1972].

Строгий, теоретически обоснованный переход от удельного водопоглощения к показателям водопроницаемости (коэффициенту фильтрации, проводимости), используемым в гидрогеологических расчетах, невозможен. Именно поэтому удельное водопоглощение следует рассматривать как показатель трещиноватости [Биндеман, Денисов, 1947].

Удельное водопоглощение — относительная характеристика, поэтому важно, чтобы она получалась стандартным методом. Иначе сравнение результатов будет невозможно. Трудами Н.Н. Биндемана, Л.Д. Белого, А.Г. Лыкошина, Е.С. Карпышева такая стандартная методика разработана [Карпышев, 1978].

Нагнетания воды производятся в скважины колонкового бурения диаметром менее 0,25 м, пробуренные с промывкой водой. Перед началом опыта опробуемый интервал ствола скважины изолируется резиновым тампоном от остальной части скважины. Длина опробуемого интервала 5 м, напор над статическим уровнем воды при нагнетании в обводненные породы принят 10 м. Продолжительность нагнетания при постоянном расходе 20–30 мин.

Поглощение воды при нагнетании зависит главным образом от ширины трещин в опробуемом интервале, их частоты и ориентировки относительно ствола скважины. При наличии рыхлого заполнителя трещин водопоглощение зависит от его суффозионной устойчивости. При перемещении заполнителя или размыве стенок полускальных пород водопоглощение меняется в ходе опыта. Это открывает возможность характеристики заполнителя трещин методом нагнетаний. Однако методика таких опытов не разработана.

По величине удельного водопоглощения массивы горных пород разделяются на следующие.

1. Практически водонепроницаемые, q менее 0,01 л/мин.
2. Слабо водопроницаемые, q от 0,01 л/мин до 0,1 л/мин.
3. Водопроницаемые, q от 0,1 л/мин до 1,0 л/мин.
4. Сильно водопроницаемые, q от 1,0 л/мин до 10 л/мин.
5. Очень сильно водопроницаемые, q более 10 л/мин [СНИП II-16-74].

В природе почти не встречаются массивы, которые по этой классификации можно было бы целиком отнести к одной категории. Обычно в массиве удельное водопоглощение колеблется в широких пределах и изменяется на несколько порядков. Поэтому нагнетания являются чувствительным методом оценки трещиноватости. Практически изменения удельного водопоглощения на несколько порядков происходят не только в целом по массиву, но даже в одной скважине. Обычно эти изменения носят случайный характер. Выделение зон водопроницаемости или трещиноватости возможно только на пути статистического анализа результатов нагнетаний как случайных величин [Оценка точности..., 1971]. В этом отношении нагнетания

¹ Идея вывода формулы дана Н.Н. Биндеманом.

не отличаются от других косвенных методов определения степени трещиноватости массива.

Для косвенной оценки степени трещиноватости сухих горных пород применяется нагнетание воздуха в скважины и шпуры. Метод нагнетания воздуха в шпуры из горных выработок, котлованов и с поверхности обнажений разработан в Ленинградском отделении Гидропроекта [Сорокин, Бадухин, Шпаковский, 1972]. Он назван методом воздушного опробования трещин (ВОТ). За показатель трещиноватости принята скорость падения давления сжатого воздуха в стандартном баллоне, соединенном с опробуемым интервалом шпура. Характеристикой трещиноватости служит показатель воздухопроницаемости, равный падению давления в баллоне, отнесенной к единице длины шпура и единице времени. Характеристика названа ВОТ: $i \text{ вот} = \text{атм/мин} \cdot \text{м}$. Метод ВОТ используется для установления мощности зоны выветривания, прослеживания зон повышенной трещиноватости у разрывов, определения мощности зоны разуплотнения на контактах горных выработок, выявления анизотропии массива, вызванной трещиноватостью. Устанавливаются корреляционные связи показателя ВОТ с модулем деформации, пустотностью и другими характеристиками массива.

Метод ВОТ — быстрый и эффективный метод исследования неоднородности сети трещин. Он может применяться в разнообразных условиях за исключением массивов с широкими открытыми трещинами, обводненных и льдонасыщенных массивов. Диапазон изменения показателя ВОТ: в сохранных слабо трещиноватых породах — менее 2,0 вот, в зонах повышенной трещиноватости — 3,0—12,0 вот, в зонах с открытыми трещинами типа зоны разгрузки и выветривания — более 12,0 вот.

ЧАСТЬ III

РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О СТРУКТУРЕ СЕТИ ТРЕЩИН

Глава 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ СКЛАДОК И РАЗРЫВОВ ПО ОРИЕНТИРОВКЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ТРЕЩИН

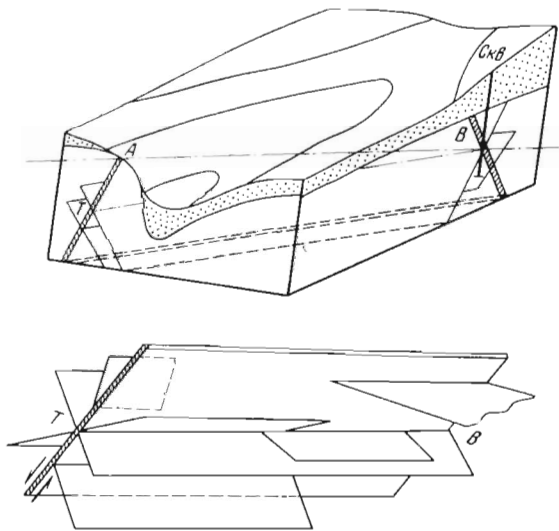
§ 8.1. Метод поясов

Пространственное положение разрывов и складок обычно определяется методами структурной геологии, не требующими изучения структуры сети трещин. Иногда плохая обнаженность, отсутствие выработок не позволяют применить обычные методы. Тогда задачи определения положения плоскости разрыва в пространстве, оценки направления и амплитуды смещения крыльев, оценка положения оси складки и тому подобные могут быть решены с использованием структурных параметров сети трещин.

Метод поясов применяется при исследовании тектонических разрывов. Он основан на изучении приразрывных трещин, особенности которых рассмотрены в гл. 2. Данные по оперяющим трещинам в комплексе с другими доступными при съемке материалами о разрывном нарушении могут быть использованы для определения: 1) положения плоскости разрывного нарушения в пространстве; 2) направления смещения по разрыву; 3) полной амплитуды смещения. Ранее метод поясов использован только для "определения направления перемещения крыльев разрывных нарушений по положению сопряженных трещин" [Будько, 1958, с. 96]. Однако возможности метода поясов при его модернизации могут быть заметно расширены [Чернышев, 1974].

Рассмотрим первую задачу. Положение плоскости разрыва в пространстве, как правило, не указывается на геологической карте, где всегда даются элементы залегания слоев. Элементы залегания плоскости разрыва при съемке не всегда удается установить. Это можно сделать, изучая приразрывную трещиноватость.

Чтобы найти положение плоскости разрыва в пространстве, необходимо знать положение хотя бы двух прямых, лежащих в этой плоскости. Одной из таких прямых является линия пересечения оперяющей трещины с плоскостью разрыва (рис. 70). По множеству трещин оперения, образующих пояс на круговой диаграмме, эта линия определяется как ось пояса. За вторую линию можно принять прямую, соединяющую любые две точки, в которых наличие разрыва установлено бесспорно. Назовем эти точки А и В. Тогда работа в поле по отысканию элементов залегания разрыва сводится к измерению наклона линии АВ и азимута ее в направлении подъема. Такое направление для линии АВ принимается, поскольку в отечественной практике при построении круговых диаграмм принято пользоваться проекцией верхней полусферы. При использовании проекции нижней полусферы, как это принято в зарубежных работах [Adler et. al., 1961] азимут линии АВ необходимо брать в направлении ее погружения. Кроме измерения параметров упомянутой линии, разумеется, необходимы массовые измерения трещин оперения. Опыт показывает, что можно ограничиться измерением около 1000 трещин в нескольких точках. В сложных случаях приходится прибегать к измерению нескольких тысяч трещин. Камеральная работа состоит в по-



Р и с. 70. Скрытый сброс и его оперение

А - обнажение; В - пересечение разрыва скважиной; ВТ -- направление линии пересечения разрыва и оперяющих трещин

строении сводной круговой диаграммы трещиноватости (рис. 71, 72) с выделением пояса оперения и его оси симметрии. На ту же диаграмму в виде точки наносится линия АВ (азимут отсчитывается по кругу диаграммы, а угол по радиусу от внешней окружности к центру). Дуга меридиана, проведенная через две точки, - выход оси симметрии пояса на поверхность координатной полусферы и выход линии АВ на ту же поверхность - изображает плоскость разрыва. Элементы залегания ее без труда могут быть измерены по той же диаграмме.

Метод был использован нами для определения положения 16 разрывных нарушений в ходе геологической разведки Керманского угольного месторождения. Позже четыре из этих разрывов были подсечены разведочными горными выработками, что позволило определить их элементы залегания достаточно точно. Таким образом, применение метода поясов для определения элементов залегания разрыва получило экспериментальную проверку (табл. 38).

Вторая из названных задач - определение направления смещения - решена ранее

Т а б л и ц а 38

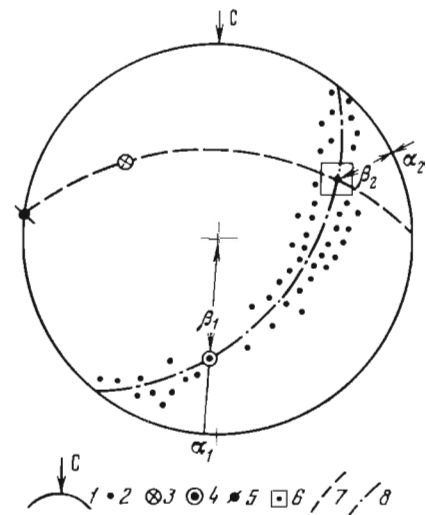
Проверка метода поясов

Элементы залегания разрыва, град, по данным

изучения трещиноватости		горных и буровых работ	
α	β	α	β
320	66	316	56
292	64	295	68
330	46	336	36
140	58	124	43
113	72	—	70-80

Р и с. 71. Определение ориентировки плоскости тектонического разрыва и направления смещения по методу поясов (идеализированная схема)

1 - точка начала отсчета азимутов, "север"; 2 - полюс трещины; 3 - пояса разрыва, 4 - поверхности сместителя; 5 - след разрыва на дневной поверхности на диаграмме в виде точки; 6 - направленные смещения по разрыву; 7 - поверхность сместителя в виде линии; 8 - пояс оперения разрыва



Р и с. 72. Определение положения плоскости разрыва и направления смещения для одного из участков шахтного поля Дарегор (600 пар измерений угла и азимута падения трещин)

1 - изолинии плотности точек на диаграмме в процентах; 2 - элементы залегания слоев; 3 - пояса оперения; 4 - полюсы поясов оперения; 5 - азимут и угол линии АВ (см. рис. 70), установленные по двум обнажениям разрыва в удаленных точках; 6 - плоскость разрыва; 7 - полюс плоскости разрыва; 8 - направления смещения пород по разрыву

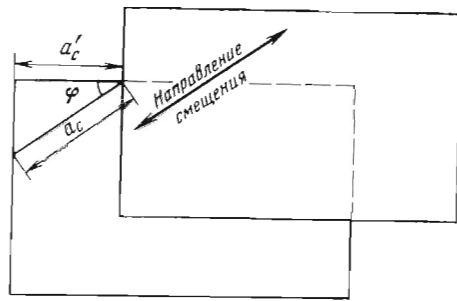


Рис. 73. Угол между направлением смещения по разрыву и направлением измерения амплитуды смещения

[Будько, 1958; Данилович, 1961]. Направление смещения, как известно, совпадает с линией пересечения плоскости пояса оперения и плоскости разрыва (см. рис. 71).

Третья задача — определение амплитуды смещения легко решается из элементарных

геометрических соображений, если решены первые две. Полная амплитуда смещения по разрыву $a_c = a'_c / \cos \varphi$, a'_c — измеренная амплитуда смещения, φ — угол между направлением, по которому измерена a'_c , и направлением смещения крыльев (рис. 73).

Например, a'_c может быть измерена на горизонтальном отрезке рельефа местности. Смещение по разрыву направлено под углом 60° к горизонту. Тогда полная амплитуда в два раза больше измеренной.

§ 8.2. Метод вращения

Другой развитый в структурной геологии метод использования данных по трещиноватости для решения структурных задач получил название метода вращения или метода приведения к горизонту. Он предложен И.В. Кирилловой [1949] и основан на установленной общей закономерности строения сети трещин на складках продольного сжатия и поперечного изгиба (см. гл. 2). Основные процедуры метода заключаются в преобразовании угловых координат слоя для приведения его в горизонтальное положение. Графически это преобразование выполняется путем вращения круговой диаграммы, откуда метод и получил название.

Метод традиционно применяется для выявления в сети трещин, развитых на складке, тех систем, которые связаны со складкообразованием или возникли до образования складки. Он может быть также использован для решения обратной задачи, т.е. для определения положения шарнира складки по ориентировке соскладчатых трещин. Связь трещин со складкообразованием в этом случае должна быть установлена без помощи метода вращения по морфологическим особенностям трещин, составу заполнителя, способу их пересечения и другими геологическими методами. До сих пор вопрос о решении обратной задачи не поднимался. Это связано с одним жестким и необязательным допущением, положенным в основу метода вращения. Признавалось, иногда незаметно для авторов, что все складки имеют горизонтальные шарниры. В такой постановке задача о положении шарнира не возникала.

Специального упоминания о таком допущении нет в работах [Кириллова, 1949; Скарятин, 1962; Рац, 1966; Погребиский, 1967; Кноринг, 1969; Рац, Чернышев, 1970] и других, где описывается и применяется метод вращения.

Однако существование допущения станет очевидно из следующего рассуждения. Как известно, метод вращения в сложившемся варианте со-

стоит из двух этапов преобразования координат слоя. Во-первых, слои совмещаются на диаграмме по азимуту и, во-вторых, они приводятся к горизонтальному положению. Следом за изменением положения слоя на соответствующие углы меняется положение трещин, жестко связанных с ориентировкой слоя. Физический (тектонифизический) смысл этого преобразования состоит в совмещении осей полей напряжений, которые справедливо считаются сходными по величине, но различными по ориентировке в различных частях складки. Ориентировка поля напряжений в каждой части складки при едином внешнем по отношению к складке поле напряжений определяется анизотропией массива, связанной со слоистостью и положением шарнира [Гзовский, 1964]. Представим поле напряжений в виде трехосного эллипсоида. Одна из осей его обычно направлена перпендикулярно слою, другая перпендикулярно шарниру в плоскости слоя. Третья лежит в плоскости слоя и параллельна шарниру. Операция вращения имеет цель совместить тождественные по форме, но разно ориентированные в пространстве эллипсоиды. Из геометрических соображений очевидно, что для совмещения всех трех осей эллипсоида необходимо в общем случае повернуть его в пространстве три раза. Между тем, в методе вращения принимается только двукратное преобразование. При двукратном преобразовании не учитывается положение шарнира. Оно заранее принимается горизонтальным.

Рассмотрим на примере, к какой ошибке приводит такое неправомерное допущение и как исправляется ошибка при введении в метод вращения третьего преобразования углов.

Метод вращения в модернизированном виде использован при исследовании трещиноватости на том же Керманском угольном месторождении, где был применен метод поясов [Чернышев, 1974]. Для выделения соскладчатых и доскладчатых трещин в угленосной толще была построена сводная диаграмма трещиноватости (рис. 74,а), на которую нанесены данные по шести тектоническим блокам, расположенным на разных элементах крупных складок, отстоящих друг от друга в пределах месторождения на 20–60 км. На каждом блоке измерено от 500 до 10 000 трещин. Для построения диаграммы использовано более 15 000 измерений. Большое количество измерений позволило получить четкие и надежные выводы. Последовательность операций приведения к горизонту была следующей: а) приведение к горизонту шарнира складки; б) приведение слоев с разных блоков к единому азимуту падения; в) приведение слоев к горизонту. Без первой операции, которая ранее упускалась, вторая и третья не привели к совпадению соскладчатых систем на диаграмме б. Статистическая проверка показала, что распределение точек по окружности на рис. 74,б не отличается от равномерного. После проведения трех операций (рис. 74,в) гипотеза о равномерном распределении отвергается. Появляется основание считать точки сгруппированными не случайно. Следовательно, выделенные системы трещин расположены тождественно относительно осей поля напряжений, ориентированных на складке названным выше образом. Логично связать эти системы с полем напряжений, создавшим складку, так как их ориентировка относительно элементов складки (крыльев, шарнира) не только тождественна на разных частях складки, но и увязывается с положением осей напряжений с помощью теории прочности Мора–Хубера–Генки–Мизеса.

Таким образом, в соответствии с теорией тектонифизики приведение к горизонту следует проводить в три этапа.

Итак, установлена связь ориентировки систем трещин и ориентировки шарнира складки.

Перейдем к определению положения шарнира складки по ориентировке соскладчатых трещин.

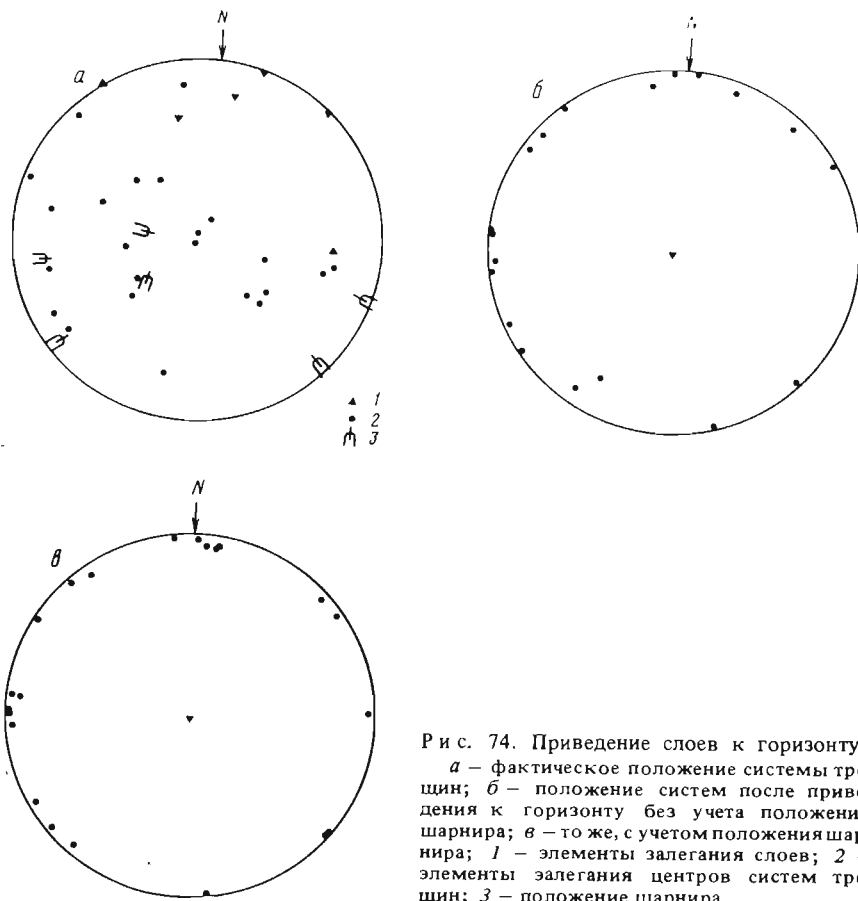


Рис. 74. Приведение слоев к горизонту
a – фактическое положение системы трещин; *б* – положение систем после приведения к горизонту без учета положения шарнира; *в* – то же, с учетом положения шарнира; 1 – элементы залегания слоев; 2 – элементы залегания центров систем трещин; 3 – положение шарнира

Если шарнир не обнажен, или обнажен в одной точке, если обнажено только одно крыло складки, тогда положение шарнира неясно. В этих случаях выявлению положения шарнира может помочь материал по трещиноватости. Рассмотрим конкретные задачи по оценке положения шарнира и методы их решения.

Задача 1. Определить положение шарнира складки по совокупности замеров элементов залегания трещин напластования на двух крыльях. Такая задача может встретиться, если доступные для наблюдения обнажения пересекают складку по одной линии (речная долина, тоннель и т.п.).

Задача решается на круговой диаграмме. На диаграмму наносят (рис. 75, *a*) полюсы трещин напластования. Через эти полюсы проводят меридианы. Шарнир складки перпендикулярен плоскости меридиана. Элементы залегания шарнира по положению меридиана однозначно определяются на диаграмме. Та же задача может быть решена несколько иначе (рис. 75, *б*). На круговую диаграмму наносятся меридианы, изображающие

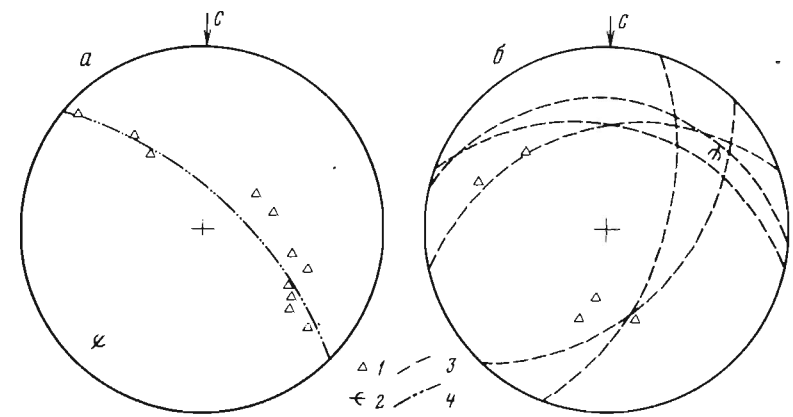


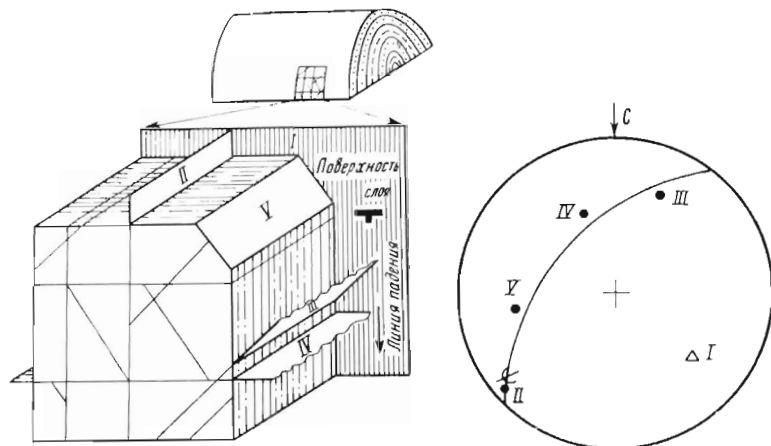
Рис. 75. Определение азимута и наклона шарнира складки по элементам залегания трещин напластования

a – первый метод; *б* – второй метод; 1 – полюс системы трещин напластования; 2 – направление восстания шарнира складки; 3 – поверхность слоя в виде линии; 4 – поверхность, перпендикулярная шарниру складки

трещины напластования в точках наблюдения. Пересечение меридианов, изображающих разные крылья складки, дает положение шарнира. Наиболее вероятное положение шарнира в этом случае определяется как среднее из множества точек пересечения меридианов.

Примеры решения задачи приведем по материалам исследований, проведенных в Таджикистане автором совместно с М.И. Погребиским. Решение первым способом (рис. 75, *a*) получено для южной части Фарко-Джуруджской синклинали, где наблюдается воздымание шарнира синклинали. На участке наблюдений синклираль сложена нижнемеловыми красноцветами и карбонатными отложениями верхнего мела. Измерения ориентировки трещин напластования проведены на одиннадцати станциях. На северо-западном крыле на станциях № 140, 141, 142 установлены элементы залегания трещин напластования $321^\circ \angle 54^\circ$, $322^\circ \angle 41^\circ$ и $310^\circ \angle 82^\circ$. На юго-восточном крыле на станциях № 123, 125, 127, 143, 146, 147, 148 и 149 установлены элементы залегания $128^\circ \angle 54^\circ$, $121^\circ \angle 48^\circ$, $129^\circ \angle 68^\circ$, $56^\circ \angle 30^\circ$, $108^\circ \angle 53^\circ$, $102^\circ \angle 42^\circ$, $121^\circ \angle 40^\circ$ и $76^\circ \angle 34^\circ$. Определение наклона шарнира первым из изложенных способов дает азимут воздымания шарнира 217° , угол 10° . Второй способ для того же материала дает угол воздымания 15° при том же азимуте. Пример применения второго способа (см. рис. 73, *б*) взят также из материалов наших исследований в Таджикистане. На участке близ кшл. Туткаул антиклиналь Джангоу резко погружается на юго-запад. Ее крылья сложены акджарскими и бухарскими известняками нижнего палеогена. Измерения были выполнены на пяти станциях: две из них относятся к северо-западному крылу антиклинали (№ 108 и 106), элементы залегания трещин напластования соответственно $285^\circ \angle 63^\circ$ и $310^\circ \angle 50^\circ$, и три к юго-восточному крылу (№ 102, 109, 114), элементы залегания $190^\circ \angle 43^\circ$, $180^\circ \angle 32^\circ$, $158^\circ \angle 45^\circ$. Графическое решение задачи приведено на рис. 73, *б*. Результат: шарнир антиклинали Джангоу погружается в юго-западном направлении по азимуту 277° под углом 29° . По данным геологической карты угол погружения шарнира на этом участке около 40° .

Задача 2. Определить положение шарнира складки по ориентировке складчатых трещин, когда для наблюдений доступно только одно крыло складки. Решение основано на известной (см. гл. 2) связи между ориентировкой складчатых трещин и ориентировкой шарнира складки. Из четырех систем складчатых трещин (рис. 76) две системы отрыва с четными



Р и с. 76. Положение основных систем тектонических трещин относительно поверхности слоя и шарнира складки
I—V — номера систем

Р и с. 77. Определение азимута и наклона складки по элементам залегания тектонических трещин. Крестик — центр системы

номера и две системы скола с нечетными номерами. Система трещин отрыва II перпендикулярна шарниру. Система трещин отрыва IV параллельна шарниру. Выделить из множества систем две главные системы отрыва обычно нетрудно, пользуясь морфологическими отличиями трещин отрыва. Различить продольную (IV) и поперечную (II) по отношению к складке системы трещин обычно значительно труднее. Поэтому по трещинам отрыва можно получить два решения задачи о положении шарнира, которые различаются примерно на 90° . Выбрать из этих решений действительное и отбросить мнимое могут помочь только ориентировочные геологические данные о положении шарнира. Поскольку различие решений велико, обычно нетрудно выбрать верное. Уточнить решение можно по ориентировке трещин скалывания, представленных системами III и V. С биссектрисами углов между этими системами шарнир образует углы 0 и 90° . Чаще всего биссектриса острого угла отличается от положения шарнира на 90° , а биссектриса тупого угла совпадает с направлением шарнира. Однако в ходе развития складчатости возможны повороты систем, которые приводят к изменению углов между ними [Белоусов, 1952] и нарушению названной закономерности.

Чтобы иллюстрировать сказанное, рассмотрим пример определения ориентировки шарнира складки по данным о трещиноватости на одном крыле. Воспользуемся материалом по Фарко-Джуруджской синклинали, уже использованным на рис. 75,а. Откажемся от станции на юго-восточном крыле и определим наклон шарнира по данным о трещиноватости северо-западного крыла. На этом крыле на 3-х станциях измерена ориентировка 600 трещин. На сводной диаграмме выделено пять систем (рис. 77), номера которых соответствуют обозначениям предыдущего рисунка. По ориентировке этих систем найдено восемь решений, которые образуют две группы по четыре точки в каждой. Одна из групп отброшена, так как известно, что в районе нет складок,

погружающихся под углом, близким к 90° . Среднее из второй группы дает для шарнира азимут восхождения 229° и угол 10° . Этот результат близок к полученному ранее другим методом $227^\circ \angle 10^\circ$.

Подобно тому, как по ориентировке трещин определяется ориентировка шарнира, а выше определялась ориентировка разрыва, в обратном порядке могут быть определены по параметрам разрывов и складок параметры развитых на них трещин. Однако точность таких определений, разумеется, значительно ниже, чем при полевом изучении трещиноватости.

Глава 9

ТРЕЩИНЫ И РАЗРЫВЫ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОШЛЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

§ 9.1. Многомерные регрессионные уравнения связи размеров максимальной сейсмодислокации с интенсивностью и магнитудой землетрясения

Разрывы и землетрясения связаны между собой в пространстве и во времени. Параметры разрывов: длина, величина смещения по разрыву (амплитуда) и ширина зияющей трещины используются в качестве показателей интенсивности землетрясения в сейсмических шкалах, в частности, в шкале MSK-64. Они применены В.П. Солоненко [1970] в качестве основополагающих признаков для составления специальной шкалы балльности и Л.Д. Белым [1974] при классификации остаточных сейсмодетформаций и сейсмогравитационных смещений.

Статистический анализ связи параметров сейсмогенных разрывов с параметрами землетрясений проводится в работах [Тошер, 1958; Iida, 1959; Рац, 1965; Дедова, 1967; Рац, Чернышев, 1970; Солоненко, 1973]. Как правило, эти работы базируются на ограниченном материале, охватывают какую-либо одну сторону вопроса и не используют в достаточной мере возможности современных статистических методов и современные многочисленные наблюдения за разрывами в эпицентральных зонах. В данной работе автор решил использовать преимущества многомерного статистического анализа, успешно применяемого в инженерной геологии. Преимущество отыскания связей между интенсивностью или магнитудой и множеством признаков сейсмодислокаций заключены в комплексном использовании информации о землетрясении, скрытой в различных чертах явления сейсмодислокации.

Введение многомерного анализа позволяет повысить точность реконструкции параметров землетрясения. Для статистического анализа были использованы данные о 100 землетрясениях по советским и зарубежным публикациям.

Полученные (расчеты выполнены В.А. Пырченко) многомерные уравнения связи интенсивности землетрясения с параметрами сейсмодислокаций использованы при детальном сейсмическом районировании территории ГОКа Эрденет в МНР. Уточнение сейсмичности района принято на карте сейсмического районирования, выпущенной АН МНР в 1978 г.

Впервые в количественной форме связь между интересующими нас параметрами опубликовал Д. Точер [Tocher, 1958], который на основе данных по 10–12 землетрясениям статистическим путем получил уравнения

$$M = 5,65 + 0,98 \lg L,$$

$$M = 5,22 + 0,53 \lg AL,$$

M – магнитуда землетрясения; L – длина сейсмодислокации, км;
 A – амплитуда смещения, м.

Такое же по форме, но на большем материале исследование провел К. Ида [K. Iida, 1959], который приводит уравнения для Японских островов (слева) и для всего мира (справа).

$$M = 6,6 + 0,5 \lg L;$$

$$M = 6,3 + 0,6 \lg L;$$

$$M = 6,2 + 0,4 \lg LA, \quad A = (A_r^2 + A_b^2);$$

$$M = 5,4 + 0,5 \lg AL;$$

$$\lg E = 21,7 + 0,7 \lg L;$$

$$\lg E = 21,2 + 0,9 \lg L;$$

$$\lg E = 21,1 + 0,5 \lg AL;$$

$$\lg E = 19,9 + 0,7 \lg AL,$$

где A_r – амплитуда горизонтального смещения по разрыву; A_b – амплитуда вертикального смещения по разрыву.

Связи, обратные по форме тем, которые исследовали Д. Точер и К. Ида, получил В.П. Солоненко [1973]. В его записи $\lg L = (1,01 \pm 0,02)M - 6,18$. Он получил также связи площади распространения остаточных сейсмодиформаций S с магнитудой землетрясения в виде $\lg S = (0,99 \pm 0,07)M - 3,6$.

Заметим, что в силу особенностей регрессионного анализа, который был использован для получения последнего уравнения, оно не может быть решено относительно аргумента, каковым служит магнитуда M . Отсюда вытекает, что В.П. Солоненко привел новое уравнение, которое невозможно прямо сопоставить с предыдущими.

Аппарат ортогональной регрессии впервые для рассматриваемой цели применен в работах [Рац, 1965а, б; Рац, 1969; Рац, Чернышев, 1970]. Получены уравнения $\lg E = 1,86 \lg A + 22,18$, $\lg E = 1,80 \lg L + 14,24$, где E – энергия землетрясения, эрг.

Исследование связи интенсивности землетрясения I_0 с шириной B сейсмогенных трещин для различных видов грунтов провела Е.В. Дедова [1967]. Она ввела в рассмотрение новый параметр землетрясения – интенсивность и новый параметр сейсмодислокаций – ширину. Исходя из схемы сейсмического микрорайонирования и считая сейсмодислокации вторичным явлением по сравнению с разрывами, она справедливо проводит разделение по грунтам. Однако отсутствие в статье уравнений связи и оценок тесноты связи, а также четких указаний о качестве и количестве использованного материала снижают ценность публикации.

Многомерный регрессионный анализ к рассматриваемой задаче исследования связи параметров землетрясений и сейсмодислокаций впервые применен в работах [Чернышев, 1974; Исследование связи..., 1975]. По данным о 75 землетрясениях всего мира были получены уравнения регрессии, которые связали I_0 ($\lg L$, $\lg A$, $\lg B$). Для вывода уравнений использована программа регрессионного анализа РЕГР Петрова и Элланского, которая основана на алгоритме обычной регрессии и аппроксимирует искомые связи полиномом n -го порядка. Были рассчитаны полиномы

Т а б л и ц а 39

Результаты проверки уравнений связи, полученных по программе РЕГР

Интенсивность по литературным данным	Отклонения вычисленных значений от табличных (I_0 вычисл. – I_0 ист.)							
	$I_0 = f(\lg L, \lg A, \lg B)$				$I_0 = f(\lg L, \lg A)$			
	Порядок многочлена							
	1	2	3'	3	1	2	3'	3
10,0	0,6	–	0,8	0,6	0,5	0,7	0,5	0,6
11,0	–0,7	–	–2,8	–1,1	–1,2	–1,4	–1,5	–1,4
9,0	0,9	–	0,9	0,5	0,6	0,4	0,2	0,3

Пр и м е ч а н и е. 3' – сокращенный многочлен третьего порядка.

Т а б л и ц а 39 (окончание)

Интенсивность по литературным данным	Отклонения вычисленных значений от табличных (I_0 вычисл. – I_0 ист.)							
	$I_0 = f(\lg L, \lg B)$				$I_0 = f(\lg A, \lg B)$			
	Порядок многочлена							
	1	2	3'	3	1	2	3'	3
10,0	0,6	0,8	0,9	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9
11,0	–0,6	–0,5	–0,5	–0,6	–1,1	–1,2	–0,7	–1,0
9,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,4	0,6	0,6

Т а б л и ц а 40

Дополнительные результаты проверки уравнения $I_0 = f(\lg L, \lg A)$

Интенсивность по литературным данным	I_0 вычисл. – I_0 ист.				Интенсивность по литературным данным	I_0 вычисл. – I_0 ист.			
	Порядок многочлена					Порядок многочлена			
	1	2	3'	3		1	2	3'	3
9,5	–0,8	–1,1	–1,3	–1,2	8,0	0,6	0,2	0,0	0,1
10,5	–0,6	–0,8	–0,9	–0,8	11,0	–1,5	–1,9	–1,8	–1,8
11,0	–1,0	–1,0	–1,2	–1,1	9,0	–0,5	–0,9	–0,7	–0,8
11,0	–0,7	–0,7	–0,7	–0,6	9,0	+0,8	0,6	0,4	0,5
10,0	0,2	–0,1	0,1	0,2	10,0	0,1	0,1	–0,1	0,1

1-го, 2-го и 3-го порядков по полному набору признаков. Затем были взяты: малоинформативные члены полиномов. Уравнения как полные, так и сокращенные были подвергнуты проверке на материале, не использованном при выводе уравнений. Проверка (табл. 39–41) показала, что повышение порядка многочлена выше первого не приводит к существен-

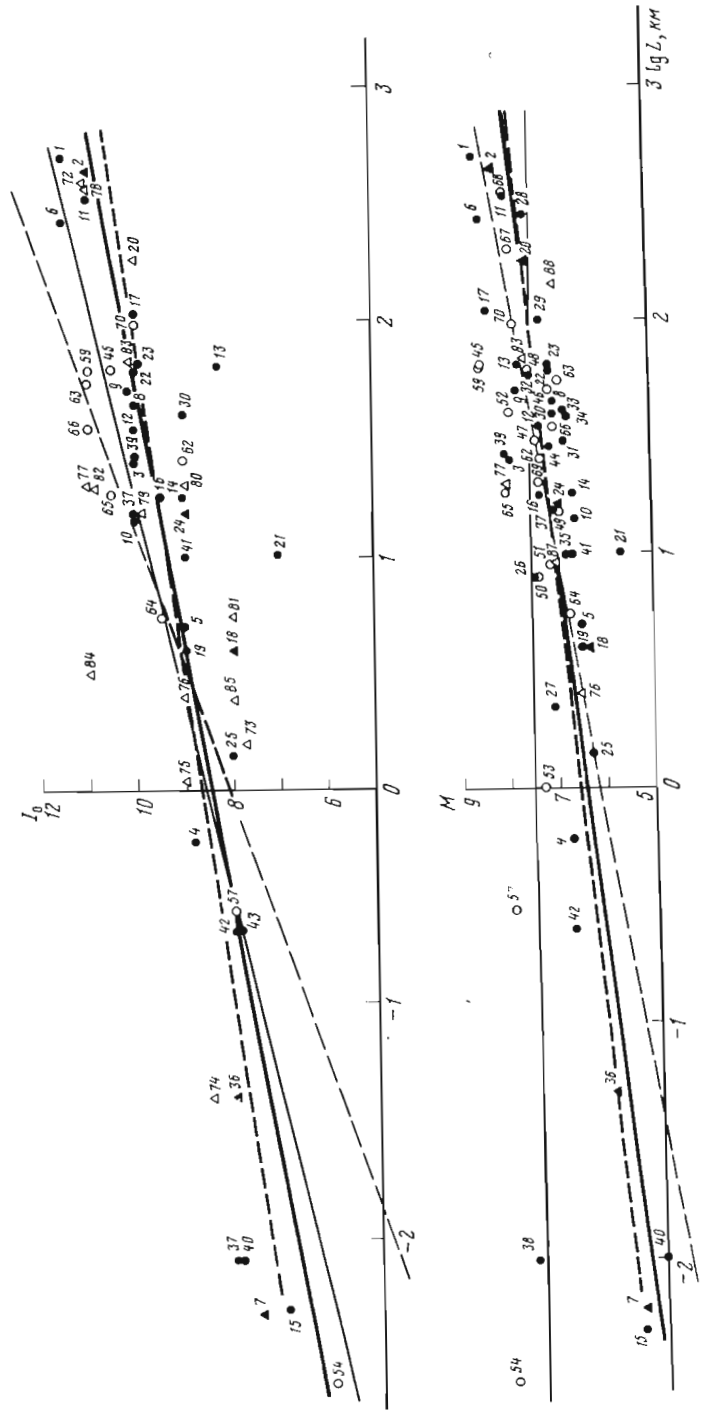


Рис. 78. Связь длины сейсмодислокации с интенсивностью и магнитудой землетрясения [Исследования связи..., 1975]

1 — данные по современным землетрясениям континентов; 2 — данные по землетрясениям прибрежных территорий; 3 — данные по старым землетрясениям; 4 — данные по землетрясениям, использованным для проверки уравнений РЕГР; 5 — графики уравнений ортогональной регрессии по современным землетрясениям континентов; 6 — график уравнения РЕГР по современным землетрясениям континентов; 7 — график уравнения ортогональной регрессии по прибрежным территориям; 8 — график уравнения ортогональной регрессии по старым данным

Таблица 41
Стандартные ошибки реконструкции параметров землетрясений на основе многомерных связей различного порядка (уравнения получены по программе РЕГР)

Вид связи	Линейное уравнение		Квадратичное уравнение		Кубическое уравнение	
	объем выборки	стандартное отклонение	объем выборки	стандартное отклонение	объем выборки	стандартное отклонение
M ($\lg L, \lg A, \lg B$)	3	0,75	3	0,50	3	0,82
M ($\lg L, \lg A$)	15	0,33	15	0,33	15	0,50
M ($\lg L, \lg B$)	3	1,08	3	0,73	3	1,00
I_0 ($\lg L, \lg A, \lg B$)	3	0,91	—	—	3	2,20
I_0 ($\lg L, \lg A$)	13	0,81	13	0,95	13	0,95
I_0 ($\lg L, \lg B$)	3	0,93	3	0,92	3	0,92

ному снижению ошибки прогноза. Это позволило нам в дальнейшей работе ориентироваться на аппроксимацию связей линейными уравнениями. Приводим наиболее удачные уравнения, полученные по программе РЕГР.

$$M = 5,53 + 0,18 \lg L + 0,64 \lg A, \hat{s} = 0,46, \hat{s} - \text{стандартная ошибка прогноза по материалу обучения.}$$

$$M = 5,82 + 0,04 \lg L + 0,07 \lg A + 0,03 \lg^2 L + 0,10 \lg L \lg A + 0,14 \lg^2 A, \hat{s} = 0,41;$$

$$M = 5,30 + 0,11 \lg L + 0,76 \lg A + 0,17 \lg B, \hat{s} = 0,39;$$

$$M = 5,35 + 0,11 \lg L + 0,33 \lg A + 0,15 \lg B + 0,05 \lg^2 L + 0,75 \lg A \lg L + 2,03 \lg A \lg B - 0,78 \lg L \lg B + 1,02 \lg^2 L - 0,86 \lg^2 B, \hat{s} = 0,27;$$

$$I_0 = 7,25 + 0,30 \lg L + 0,92 \lg A, \hat{s} = 0,62;$$

$$I_0 = 7,49 - 0,47 \lg L + 0,69 \lg A - 0,12 \lg^2 L + 0,57 \lg L \lg A - 0,07 \lg^2 A, \hat{s} = 0,51;$$

$$I_0 = 7,98 + 0,52 \lg L + 0,24 \lg A + 0,34 \lg B, \hat{s} = 0,54;$$

$$I_0 = 8,10 + 0,04 \lg L - 1,26 \lg A + 1,50 \lg B - 0,06 \lg^2 L + 0,12 \lg L \lg A + 0,26 \lg L \lg B + 1,38 \lg^2 A - 2,84 \lg A \lg B + 0,94 \lg^2 B, \hat{s} = 0,43.$$

При продолжении работы [Исследования связи..., 1975] были получены уравнения связи параметров землетрясений и сейсмодислокаций с помощью аппарата ортогональной регрессии. Использование аппарата ортогональной регрессии не привело к получению существенно новых эмпирических зависимостей. Дальнейшее накопление материала подтвердило устойчивость выведенных ранее зависимостей¹.

¹ По выступлению М.В. Рада на совещании "Математические и экспериментальные методы в дизъюнктивной тектонике", организованном Межведомственным советом по сейсмостойкому строительству и Московским обществом испытателей природы 23-25.11.1981 (Москва).

§ 9.2. Использование уравнений регрессии для реконструкции интенсивности и магнитуды землетрясений района ГОКа Эрдэнэт в Монголии

Горнообогатительный комбинат Эрдэнэт построен в северо-западной Монголии в районе с повышенной сейсмичностью. Инженерно-геологические изыскания для проектирования комбината проводил ПНИИИС. Работы включали сейсмическое микрорайонирование и детальное сейсмическое районирование с целью уточнения фоновой сейсмичности территории.

Территория ГОКа Эрдэнэт на карте сейсмического районирования МНР расположена на границе районов с сейсмичностью 7 и 8 баллов. В связи с этим задача выбора исходного балла для сейсмического микрорайонирования оказалась весьма актуальной. Она решалась нами с опорой на палеосейсмогеологический метод, так как данные инструментальных наблюдений по району были недостаточны.

Район расположен в пределах регенерированной эпиплатформенной области. С севера и юга он ограничен региональными Селенгинским и Баянгольским разломами субширотного простирания, которые пересечены разломами северо-западного и субмеридионального простирания (рис. 81). Большинство разрывных нарушений района имеет древнее заложение. Однако они обновлялись на протяжении геологической истории, в частности, в плейстоцене и голоцене. Менее чем в 100 км к западу от территории ГОКа проходит зона молодых сейсмovolканических разломов, фиксируемая по излияниям четвертичных базальтов, молодым вулканическим конусам хорошей сохранности, термальным источникам, а также эпицентрам землетрясений, в том числе 10-балльного Могодского землетрясения 1967 г. Эта зона является западной границей исследованной территории. Восточной границей является ось депрессии,

Северо-Монгольский разлом

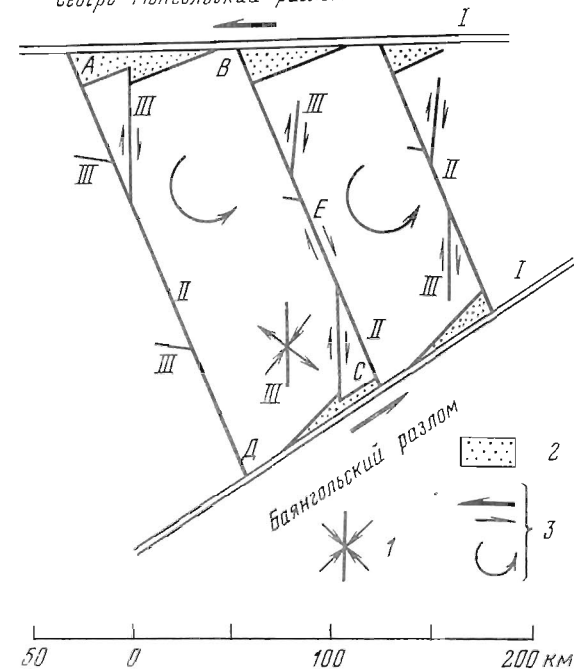


Рис. 81. Тектоническая кинематическая схема окрестностей г. Эрдэнэт (МНР)
1 — направления сжимающих и растягивающих напряжений при Могодском землетрясении; 2 — грабены в зоне растяжения; 3 — направления движения блоков. Показана площадь приблизительно 200 X 200 км

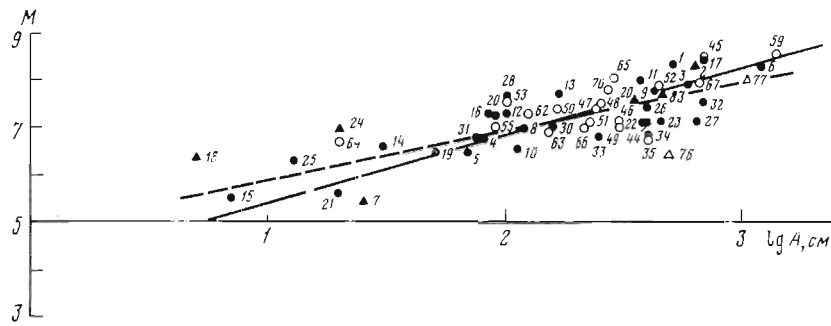


Рис. 79. Связь магнитуды с амплитудой смещения по сейсмодислокации. Обозначения см. рис. 78

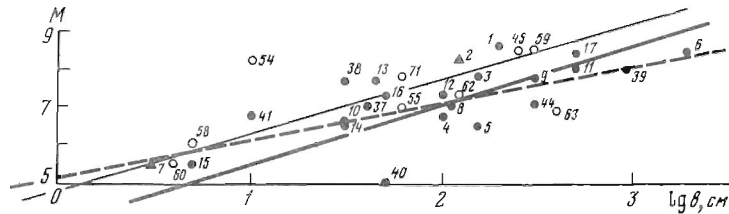
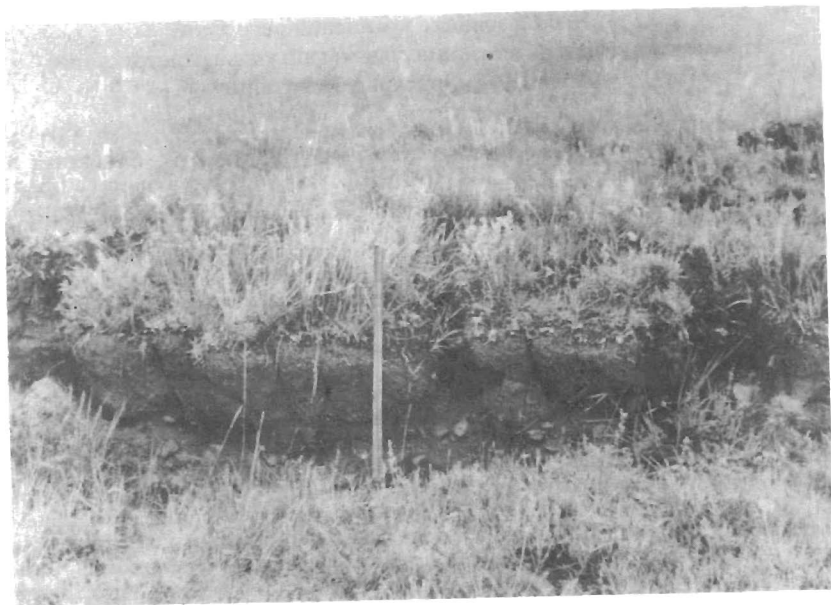


Рис. 80. Связь магнитуды с шириной зияния сейсмодислокации. Обозначения см. рис. 78

Теснота связи интенсивности землетрясений с параметрами сейсмодислокаций выше, чем теснота связи магнитуды с теми же параметрами. Можно полагать, что на ослабление связи с магнитудой оказывает влияние неутвержденная глубина гипоцентра. Другая общая особенность уравнений — повышение тесноты связи с увеличением числа факторов, участвующих в уравнении. Наиболее тесная связь, судя по величине стандартной ошибки прогноза $\hat{\sigma}$, получена для четырехфакторных связей, меньше для трехфакторных и еще меньше для двухфакторных связей, которые не приводятся в аналитической форме ввиду их малой практической значимости и сходства с полученными ранее уравнениями. Уравнения парных связей приведены на графиках (рис. 78–80). Уменьшение тесноты связи с уменьшением числа рассматриваемых признаков свидетельствует, что все рассматриваемые параметры сейсмодислокаций — амплитуда, длина и ширина — несут информацию об интенсивности и магнитуде землетрясений. Наиболее тесную связь с магнитудой имеет амплитуда разрыва, с интенсивностью амплитуда связана также теснее, чем другие параметры. В трехфакторных уравнениях с участием амплитуды связи также выше, чем без ее участия. Таким образом, амплитуда разрыва выступает как главный показатель магнитуды и интенсивности землетрясения. Из этого следует вывод, что при палеосейсмогеологических реконструкциях прежде всего следует стремиться уловить максимальную амплитуду смещения. По-видимому, с пунктом, где зафиксирована максимальная амплитуда, территориально следует связывать эпицентр землетрясения. На втором месте по информативности стоит длина и на третьем ширина зияния сейсмодислокации.



Р и с. 82. Уступ Могодской сейсмодислокации 1967 г. в делювиальных суглинках. Видны вертикальные оперяющие трещины, проходящие через 10-50 см



Р и с. 83. Сейсмодислокация в долине р. Могоин-гола



Р и с. 84. Сеймотектонический разрыв 1905 г. в восточной части хр. Хан-Хухэй через 70 лет после землетрясения. (Фото В.С. Хромовских)

совпадающая со 105 меридианом, которая расценивается [Солоненко, 1959; Нагибина, 1970] как граница областей низкой сейсмичности (на востоке) и высокой (на западе). Район ГОКа, расположенный к западу от этой границы, попадает в зону повышенной сейсмичности.

Основой структурного плана участка строительства служит система разломов субмеридионального и северо-западного направлений, которые в сочетании с отрезками разрывов субширотного направления создают густую сеть. Отмечается согласованность в ориентировке разрывов разного порядка. Район сложен эффузивно-осадочными и интрузивными комплексами различных возрастов, начиная от венда-кембрия и до антропогена. Палеозойские породы сильно метаморфизованы и деформированы в ходе нескольких этапов орогенеза. Мезозойские вулканогенно-осадочные образования смяты в складки и разбиты разрывами. Коренные породы прикрыты рыхлым неоген-четвертичным чехлом теремной мощности.

В геоморфологическом отношении территория представляет собой расчлененное плоскогорье с отметками 1000-2040 м, расположенное на сочленении двух крупнейших хребтов Северной Монголии — Хангая и Хэнтая. Особенности рельефа определяются, согласно распространенным взглядам, принадлежностью района к поясу послеплатформенной активизации, для которого характерно сочетание плавных движений, образующих своды и впадины с резкими движениями вдоль дизъюнктивных нарушений различного порядка и направления. Различные по направлению и скорости движения блоки образовали резко контрастный рельеф, который образует расчлененные горстовые массивы, возвышающиеся среди плоских или слабо волнистых равнин. Границей между блоками служат разломы, неоднократно обновлявшиеся недавними подвижками. По данным института физики и математики АН МНР именно к ним приурочено большинство эпицентров землетрясений, происшедших в Монголии [Сейсмическое районирование Улан-Батора, 1971].

Наиболее сильные землетрясения оставили на поверхности земли своеобразные формы — сейсмодислокации. Наиболее крупная современная сейсмодислокация описана [Сейсмическое районирование Улан-Батора, 1971] к югу от Могод-сомона. Она

Таблица 42

Интенсивность и магнитуда землетрясений, вычисленные по параметрам сейсмодислокаций

№ сейсмодислокаций	Параметры сейсмодислокаций						Параметры землетрясения	
	Длина, км		Амплитуда, см		Ширина, см		Магнитуда M	Интенсивность I_0 в баллах
	L	$\lg L$	A	$\lg A$	B	$\lg B$		
1	45	1,65	250	2,4	110	2,0	7,6	10,0
2	10	1,0	—	—	100	2,0	7,0	9,5
3	2,5	0,4	—	—	—	—	7,0	9
4	1,8	0,25	—	—	—	—	6,8	9
5	2,5	0,4	—	—	30	1,48	6,5	9
6	2,0	0,3	—	—	—	—	6,8	9
7	17,0	1,23	—	—	—	—	7,2	9,5
8	17,5	1,24	—	—	—	—	7,2	9,5
9	14,0	1,15	—	—	—	—	7,2	9,5
10	1,0	0,0	—	—	30	1,48	6,4	9
11	0,8	-0,1	—	—	40	1,6	6,5	9
12	5,0	0,7	—	—	50	1,7	6,7	9,5
13	5,0	0,7	—	—	—	—	7,0	9
14	4,0	0,6	—	—	—	—	7,0	9
15	4,5	0,65	—	—	—	—	6,7	8,5
16	1,0	0,0	—	—	—	—	6,8	9
17	2,0	0,3	—	—	—	—	6,8	9
18	15	1,18	—	—	—	—	7,2	9,5
19	18,0	1,25	—	—	—	—	7,2	9,5
20	6,0	0,78	—	—	—	—	7,0	9,5
21	2,0	0,3	—	—	—	—	6,8	9
22	1,0	0,0	—	—	—	—	6,7	9
23	0,6	-0,22	—	—	—	—	6,6	8,5
24	0,2	-0,7	50	1,7	15	1,18	5,8	8
25	0,6	-0,22	—	—	—	—	6,6	8,5
26	0,15	-0,83	—	—	—	—	6,4	8
27	0,2	-0,7	40	1,6	30	1,48	6,4	8,5
28	0,2	-0,7	—	—	50	1,7	6,8	8

возникла при землетрясении 5 января 1967 г. в плейстосейстовой области, где интенсивность землетрясения достигала 10 баллов. Энергетический класс землетрясений К-16, магнитуда 7,5. Сейсмогенный разрыв представляет собой зону трещин, с небольшими перерывами протягивающуюся на 45 км по азимуту 10° . В зоне дерновый покров и антропогенные песчано-глинистые делювиальные, пролювиальные и озерные отложения разорваны, надвинуты, раздвинуты или взброшены по трещинам (рис. 82). Зияющие трещины по прошествии пяти лет после землетрясения, когда мы вели полевые работы, имели глубину вертикальных стенок свыше 1 м. Зияние на участках растяжения достигает нескольких десятков сантиметров. На участках сжатия образовался вал, сложенный глыбами дернины, имеющий вид торосов. Высота вала до 1,5 м, ширина — до 10 м. Повсеместно наблюдаются следы правого сдвига с амплитудой около 2,5 м. Рядом со свежей сейсмодислокацией в Могодской межгорной долине и в соседних долинах имеются другие современные и старые сейсмодислокации, свидетельствующие о неоднократном повторении здесь землетрясений, подобных земле-

трясению 1967 г. Свидетельств значительно более сильных землетрясений в этом районе не наблюдали.

К востоку от Могод-сомона на р. Могоин-голе нами описана старая сейсмодислокация, прослеженная в наземном и воздушном маршрутах (рис. 83). Она представляет собой ложину, протягивающуюся по правому борту р. Могоин-гола по азимуту 350° . Ложина, не меняя формы, пересекает мелкие саи и водоразделы, задернована; никаких следов эрозии в ней нет. Тальвег ее то погружается, то воздымается. При пересечении саев со свежим пролювием описываемая форма уходит под современные отложения. Ширина ложины вместе с окаймляющим ее с запада валом около 5 м, глубина 0,3–0,5 м, протяженность 10–12 км. В средней части сейсмодислокации сохранилась оперяющая трещина длиной около 150 м, простирающаяся по азимуту 70° . Северное окончание сейсмодислокации теряется в горном массиве, где она отмечена параллельными зияющими трещинами и расщепинами шириной около 1 м, которые сливаются с трещинами отседания.

Возраст Могоингольской сейсмодислокации, видимо, около 100 лет. Облик ее более древний, чем облик взбросо-сдвига, возникшего при 11-балльном Хангайском (Северная Монголия) землетрясении 1905 г. и описанного тогда же А.В. Вознесенским. Сейсмодислокация 1905 г. через 70 лет после образования имеет вид еще не задернованной, развивающейся ложины (рис. 84). Она пересекает также же щепнистые делювиальные суглинки, как сейсмодислокация на р. Могоин-голе.

В соседстве с описанными сеймотектоническими дислокациями имеются многочисленные оползни, оплывины, обвалы, осыпи и другие проявления нарушения устойчивости пород на склонах. Они, видимо, отчасти связаны с действием силы тяжести, а отчасти с землетрясениями. Это сейсмогравитационные деформации.

Кроме двух сейсмодислокаций были описаны еще около 30 подобных форм разного размера. По их параметрам с помощью уравнений множественной корреляции, выведенных в предыдущем параграфе, найдены магнитуды и интенсивность прошлых землетрясений (табл. 42). При сборе полевых данных, как и литературных, принимали для расчета максимальные параметры максимальной сейсмодислокации из группы сейсмодислокаций, связанных с одним землетрясением. В соответствии с выводами предыдущего параграфа за эпицентр землетрясения принималась зона развития сейсмодислокаций, а при ее значительной протяженности область с максимальной амплитудой сейсмодислокации.

Эпицентры землетрясений с указанием их интенсивности и магнитуды были нанесены на схему для детального сейсмического районирования. Проведенная работа позволила значительно расширить список землетрясений по району и помогла уточнить границу между областями с семи- и восьмибалльной сейсмичностью.

§ 9.3. Реконструкция положения осей главных нормальных напряжений в эпицентре землетрясения

Сильные землетрясения связаны с мгновенным, в геологическом смысле, возникновением на поверхности земли разрывов протяженностью в десятки и сотни километров, окаймленных трещинами оперения. Если сами разрывы исследованы и описаны в литературе, то их оперение почти не привлекало внимание геологов. Между тем, трещины оперения могут служить индикатором ориентации осей главных нормальных напряжений, послуживших причиной разрыва поверхности земли. Реконструкция напряжений, несомненно, интересна в связи с задачами исследования механизма землетрясения. Она может быть полезна и для строительной практики, так как напряжения в момент землетрясения передаются из основания на сооружение. Они определяют направление толчка.

Рассматриваются изучаемые автором и достаточно детально описанные в литературе трещины оперения сдвигов, возникших при землетрясениях в Могоде [Сейсмическое районирование... 1971], Янице [Ketin, Roesly, 1953] и в горах Хангай [Вознесенский, 1962]. Разрыв в Могоде (Монголия), как отмечалось, возник при землетря-

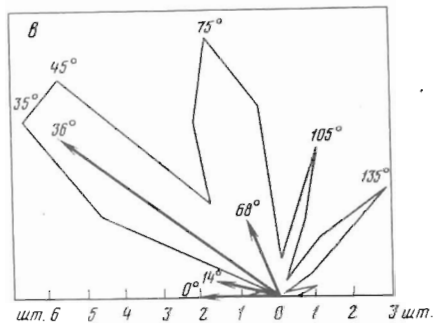
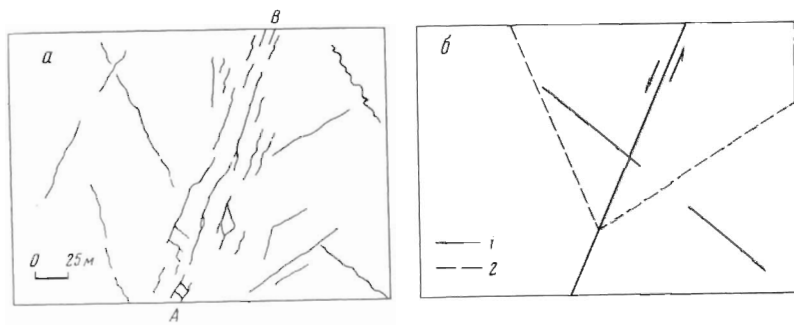


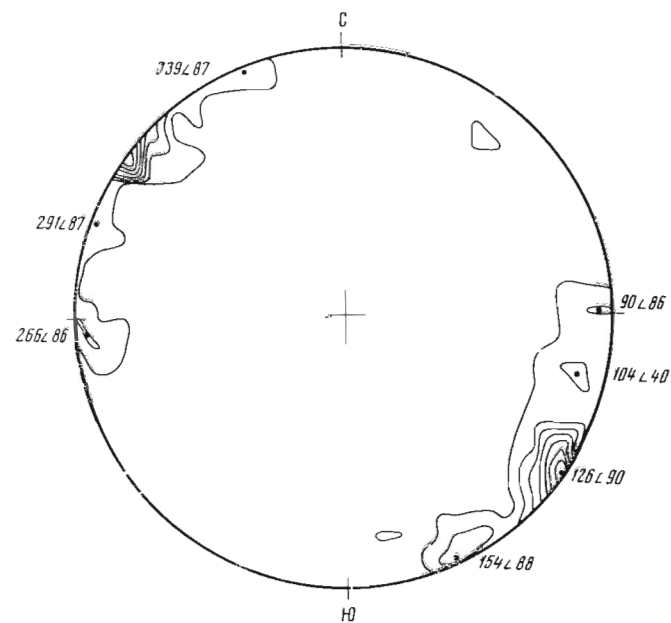
Рис. 85. Приразрывные трещины сейсмодислокации

а — зарисовка сети трещин, возникших в мерзлом делювиальном щебнистом суглинке при Могодском землетрясении 5.01.67; б — схема расположения основных систем трещин на зарисовке: 1 — опережающие, 2 — оперяющие; в — роза-диаграмма приразрывных трещин в Могоде (стрелки) и Янице (полигон)

сении 5 января 1967 г. На участке детальных исследований трещиноватости восточное крыло разрыва поднято на 0,9 м и сдвинуто влево на расстояние до 2,5 м. Разрыв в Янице (Турция) возник при землетрясении 18 марта 1953 г. интенсивностью 10 баллов и магнитудой 7,5–8,0. Протяженность разрыва 40 км. Фиксируется сдвиг с амплитудой до 4,3 м. Морфологически этот разрыв в целом не отличается от предыдущего. Разрыв в горах Хангая на северо-западе Монголии возник при землетрясении 9 и 23 июля 1905 г. (интенсивность 11 баллов). Разрыв протягивается на 450 км и отличается от предыдущих лишь масштабом явлений.

В полосе шириной в несколько десятков метров (в Могоде до 300 м) по обе стороны от разрывов наблюдаются вертикальные трещины оперения (рис. 82), проникающие в четвертичный покров на глубину в десятки и сотни сантиметров. Рыхлые образования разбиты трещинами на полигоны или надорваны в отдельных местах. Трещины параллельны основному сместителю или направлены под острым углом к нему. Для могодского разрыва характерны две пары систем оперяющих и опережающих трещин, образующих попарно острый угол около 68°. Две из этих систем расположены симметрично относительно главного разрыва, который проходит по биссектрисе между лучами трещин (рис. 85). Третья система простирается вдоль разрыва. Четвертая образует с разрывом угол около 68°.

Оперение разрыва Янице построено сходным образом. На розе трещин (рис. 87, в) начало отсчета совмещено с направлением разрыва и расположено слева на горизонтальной линии. По часовой стрелке отложены углы между трещинами и направлением разрыва. Плотность трещин в отдельных секторах розы-диаграммы показана в соответствии с масштабом на горизонтальной прямой. На диаграмме видна слабо выраженная система опережающих трещин, следующая вдоль линии разрыва (углы 0–15°), а также две системы косых трещин, образующих с линией разрыва углы 40 и 135°. С точностью до 5° разрыв проходит по биссектрисе угла между этими системами, равного в данном случае 85°. Кроме того, имеются две системы трещины (углы 75° и 105°), также симметричные относительно основного разрыва и отклоняющиеся от него на 75°. На круговых диаграммах трещины оперения сейсмогенных разрывов



Р и с. 86. Круговая диаграмма приразрывных трещин Могодской сейсмодислокации. Изолинии проведены с частотой 1% плотности точек

образуют характерные для сдвигов пояса, проходящие по внешней окружности диаграмм. Таким образом, по ориентировке они вполне сходны с Тектоническими трещинами оперения сдвигов (рис. 86).

Частные значения параметров оперяющих трещин имеют большие стандартные отклонения (табл. 43). Ширина трещин меняется от 0,1 до 1,0 м, расстояния между трещинами (густота) от 2,2 до 18,2 м, длина трещин от 3,0 до 76 м. Оценка вида распределения параметров показала, что гипотеза о нормальном распределении для всех параметров отвергается. Гипотеза о логнормальном распределении не отвергается на достаточном уровне значимости (более 0,05). Такой же результат получен при графической проверке аналогичных гипотез для ширины и расстояний между трещинами по материалам А.В. Вознесенского [1962]. Если обратиться к тектоническим трещинам, которые представляют собой один из наиболее распространенных и изученных типов трещин в горных породах вообще, то можно заметить, что для упомянутых параметров (но уже тектонических трещин) также характерен логнормальный закон распределения (гл. 3). Таким образом, сравнение тектонических и сейсмогенных трещин показывает, что они близки по виду распределения ширины, густоты и длины трещин. Сходство подчеркивается тем, что для распределения ширины литогенетических трещин, не подвергшихся вторичным изменениям, эмпирический материал согласуется с нормальным, а не логнормальным законом распределения.

Попытаемся теперь по описанной картине трещиноватости приразрывной зоны восстановить поле напряжений, действовавших в момент образования оперяющих трещин. Для этого воспользуемся теорией прочности О. Моора, которая хорошо описывает разрушение однородного изотропного материала в условиях быстрого нагружения. Прочность породы, согласно О. Моору, характеризуется огибающей главных наибольших кругов напряжений. Инженерно-геологическая практика показывает, что для суглинков применима прямолинейная наклонная огибающая. Уравнение

Таблица 43

Проверка гипотезы о законах распределения параметров трещин оперения сейсмо-дислокаций

Параметры	Объем выборки	Среднее значение	Стандартное отклонение	Проверка соответствия закону распределения*			
				Число степеней свободы	Критерий Пирсона		Вероятность, P^{**}
					χ^2	$\chi^2_{0,95}$	
Ширина трещин, см	83	28,2	17,2	4/5	84,4/8,9	9,5/11,1	0,301/0,96
Расстояние между трещинами, м	60	7,4	3,9	3/3	10,7/2,7	7,8/7,8	0,22/0,99
Длина трещин, м	102	20,1	14,5	7/7	23,2/8,0	14,1/14,1	0,501/0,97

* Нормальному — числитель, логнормальному — знаменатель.

** Вероятность случайного различия теоретического и эмпирического распределений. Например, если $P = 0,301$, то вероятность случайного различия мала, напротив, различие следует считать неслучайным, а проверяемую гипотезу отвергнуть.

се, выражающее условие разрушения породы, записывается в виде известного закона Кулона $\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \rho + k$, где τ — предельное, для данного материала, касательное напряжение на площадке, по которой происходит сдвиг; σ_n — нормальное напряжение в направлении, перпендикулярном площадке; ρ — угол внутреннего трения материала; k — сцепление материала. Для суглинков рассматриваемого типа ρ и k , определенные при изысканиях в соседнем районе, равны соответственно 22° и $0,25$.

Относительно напряжений в крыльях разрыва на момент развития трещин оперения после образования главного разрыва можно построить следующие предположения. Разрыв представляет собой сдвиг, т.е. обладает заметной горизонтальной амплитудой и слабо выраженной вертикальной. Максимальное усилие, направление которого нам неизвестно, видимо, совпадало с направлением максимальной остаточной деформации, т.е. было направлено вдоль линии пересечения разрыва с поверхностью земли. С этим направлением совместим ось максимальных главных нормальных напряжений σ_1 . В направлении, перпендикулярном разрыву у поверхности земли, вряд ли действовало сколько-нибудь заметное нормальное напряжение. Свидетельство тому — открытые трещины шириной до 1 м вдоль зоны главного разрыва. Вероятнее всего, здесь действовало слабое растяжение. В силу этого по перпендикуляру к разрыву, вдоль поверхности земли в модели следует направить ось σ_3 алгебраически минимального главного нормального напряжения. В вертикальном направлении на сжатие работала, по крайней мере, сила тяжести. Вдоль этого направления целесообразно разместить ось σ_2 — средних по величине главных нормальных напряжений.

При такой модели сплошность материала будет сохраняться с ростом напряжений до тех пор, пока на некоторой площадке не выполнится условие закона Кулона. При этом произойдет разрыв и образуются два семейства поверхностей скольжения, две системы трещин. Линия пересечения поверхностей совпадает с направлением промежуточного по величине главного нормального напряжения. В нашей модели она совпадает с вер-

тикалью, вдоль которой выбрана ось σ_2 . В плоскости $\sigma_1 \sigma_2$, совпадающей в нашей модели с поверхностью земли, линии скольжения пройдут лучами, симметричными относительно как оси σ_1 , так и оси σ_3 . Оси являются биссектрисами углов, ось σ_1 — максимальных напряжений, совпадающая в нашей модели с простиранием разрыва, будет биссектрисой острого угла, равного $\pi/2 - \rho$, а ось σ_3 — биссектрисой угла $180^\circ - (\pi/2 - \rho)$ или, при принятом нами значении ρ , соответственно 68° и 112° .

Сопоставим выводы из работы модели с реально описанной картиной трещиноватости. Они, в основном, совпадают. Действительно: 1) на поверхности земли имеются два основных луча трещин; 2) плоскости трещин пересекаются по линии, расположенной вертикально с точностью до 5° ; 3) направление разрыва и направление, перпендикулярное разрыву, совпадают с биссектрисами с точностью до 5° ; 4) направление простирания разрыва, совмещенное с осью σ_1 максимального главного нормального напряжения, совпадает с острым углом между системами трещин, а направление, перпендикулярное разрыву, — с тупым углом; 5) наконец, величина углов между системами с точностью до 10° совпадает с величиной, определенной теоретически при значении $\rho = 22^\circ$.

Следовательно, предложенная модель свойств суглинков и динамики процесса растрескивания у сейсмогенного сдвига не противоречит наблюдениям. Она объясняет возникновение двух систем оперяющих трещин. Однако модель не объясняет возникновение главного разрыва, параллельных ему трещин и оперяющих трещин, расположенных под углом 68° к разрыву. Эти трещины возникли при ином положении осей главных нормальных напряжений. Анализ с позиции теории Моора показывает, что при формировании главного разрыва ось максимальных главных нормальных напряжений была направлена на северо-восток по азимуту около 50° . Ось минимальных напряжений σ_3 была направлена на юго-восток по азимуту 140° , а ось средних по величине главных нормальных напряжений σ_2 примерно перпендикулярно поверхности земли.

Если принять во внимание, что восточный борт главного Могодского разрыва несколько приподнят, а центры систем трещин оперения (рис. 86) несколько отступают от внешнего круга диаграммы, то можно заключить, что ось σ_2 несколько наклонена и круто падает в направлении на ЮЗ. Соответственно отклонены от горизонтального положения и другие оси главных нормальных напряжений. По сейсмологическим данным (Баяраа, 1970), положение осей в гипоцентре Могодского землетрясения сходно с выведенным здесь для эпицентра (табл. 44). Расхождения могут быть связаны как с различного рода ошибками, так и с трансформацией поля напряжений при переходе от гипоцентра с глубины около 25 км к поверхности земли. Поверхность земли и ее форма, несомненно, оказывают существенное влияние на ориентацию осей напряжений.

Итак, двум парам сопряженных сколовых трещин оперения соответствуют два последовательных состояния поля напряжений в породах в эпицентре. Первое по времени поле напряжений сходно с напряжениями в гипоцентре. С ним генетически связаны трещины, параллельные разрыву, и сопряженная с ними система, составляющая угол 68° с разрывом. После образования разрыва и двух систем опережаю-

Таблица 44

Положение осей главных нормальных напряжений при Могодском землетрясении

Ось	В гипоцентре по сейсмологическим данным [Баяраа, 1970]		В эпицентре по геологическим данным	
	азимут	наклон	азимут	наклон
σ_1	62°	7°	49°	0°
σ_2	347°	42°	319°	80°
σ_3	167°	48°	139°	10°

щих трещин напряжения снимаются. Взамен возникают новые напряжения. Ось максимальных главных нормальных напряжений во вторую стадию формирования разрыва направлена вдоль разрыва и совпадает с вектором скорости крыльев. Положение ее, видимо, определяется трением крыльев разрыва. Под влиянием второго по времени поля напряжений формируется пара оперяющих сколовых трещин. Описанная картина четко проявилась при 10-балльных землетрясениях в Могоде и Янице.

Многофакторные статистические зависимости между параметрами землетрясений и сейсмодислокаций достаточно тесны, обладают преимуществом в этом отношении перед двухфакторными связями и могут быть использованы для обработки палеосейсмогеологических данных с целью реконструкции магнитуды и интенсивности прошлых землетрясений.

Среди исследованных параметров сейсмодислокаций (длина разрыва, зияние, амплитуда относительного перемещения крыльев) наиболее тесно с интенсивностью и магнитудой землетрясения связана амплитуда смещения. Ее можно рассматривать как главный показатель положения эпицентральной зоны.

В строении трещинного оперения сейсмодислокаций имеются определенные закономерности. Их интерпретация на основе теории прочности Моора позволяет оценить ориентировку осей главных нормальных напряжений в эпицентре на момент землетрясения.

Глава 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ И МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ МАССИВА ПО ПАРАМЕТРАМ ТРЕЩИН

§ 10.1. Определение коэффициента фильтрации

Размеры трещин в массиве несомненно определяют трещинную водопроницаемость. Можно ли с удовлетворительной точностью рассчитать по параметрам трещин коэффициент фильтрации? Для ответа на этот вопрос необходимо установить форму зависимости между параметрами трещин и водопроницаемостью массива, оценить возможность измерения этих параметров в натуре и точность расчета. Точность можно считать удовлетворительной, если она не хуже точности позонных откачек и нагнетаний, которые в настоящее время служат основным методом опытно-фильтрационного опробования скальных массивов при инженерно-геологических исследованиях. Несмотря на известные принципиальные недостатки позонные опыты решают главную задачу изысканий — позволяют оценить фильтрационную неоднородность массива. Они дают основной материал для геометрической схематизации его с целью фильтрационных расчетов. Точные оценки коэффициента фильтрации, пьезопроводности, фильтрационной анизотропии получают методом кустовых откачек в тех случаях, когда они необходимы. Эти опыты в скальных массивах целесообразно ставить только после схематизации.

Расчет коэффициента фильтрации по параметрам трещин будем рассматривать как моделирование полевого фильтрационного опробования массива. Необходимо оценить водопроницаемость конечного множества трещин, расположенных в ограниченной части скального массива. В расчете

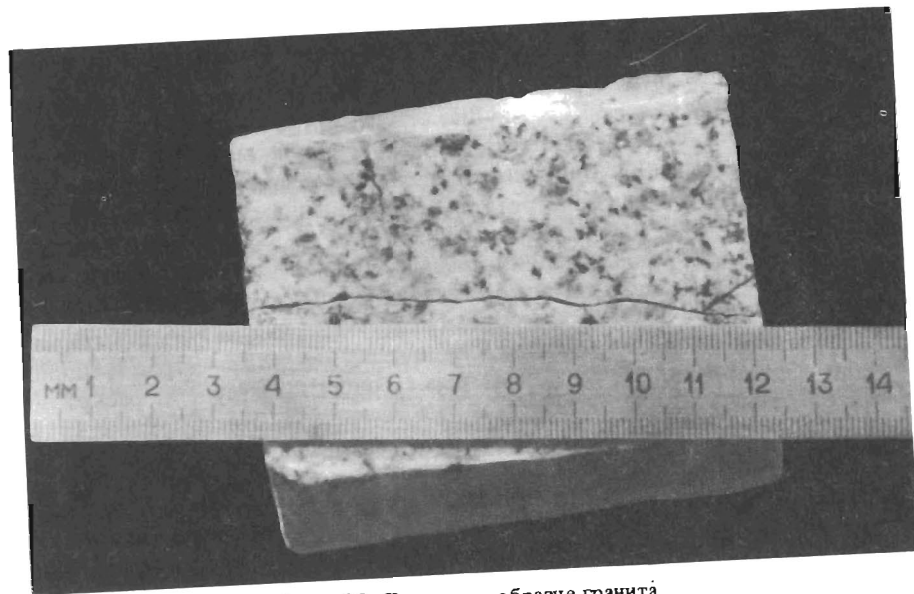
учтем изменчивость параметров трещин, ограничение их по длине, наличие фильтрующего заполнителя и взаимосвязь потоков в трещинах. Поток в трещине и сети в целом рассматривается как напорный, установившийся и преимущественно ламинарный. Для такого потока в целом верен закон Дарси и имеет смысл обобщенная оценка потока в целом верен закон постоянного коэффициента фильтрации. Жидкость и массив будем считать недеформируемыми.

Задача в сходной постановке для системной сети трещин, но без учета изменчивости параметров трещин, ограничения их по длине, взаимосвязи потоков решена Е.С. Роммом [1958, 1966] и Д. Сноу [Snow, 1965] в рамках тензорной теории проницаемости. Экспериментальный материал Е.С. Ромма касается глубин 1,0–3,5 км, где вариация параметров трещиноватости мала, фильтрующий заполнитель трещин отсутствует, а "раскрытие трещин отдельных систем отличается незначительно" [Ромм, 1966, с. 131]. Эти допущения, как следует из гл. 1 и 2, неверны для изучаемой геологами зоны массива, подверженной гипергенным изменениям трещиноватости. Поэтому вопрос о возможности расчета коэффициента фильтрации по параметрам трещин при инженерных изысканиях остается открытым.

Итак, наша задача определить коэффициент фильтрации жесткого массива (несжимаемая жидкость, недеформируемая горная порода) по конкретным измерениям трещин в массиве горных пород. Для решения задачи необходимо схематизировать реальную сеть трещин до модели тензорной теории проницаемости или теории линейных элементов. Проблема схематизации распадается на: 1) выбор схемы отдельной трещины (пласт, или щель с гладкими стенками, или щель с шероховатыми стенками) и параметров схемы в натуре; 2) выбор схемы сети трещин (бесконечные гидравлически невзаимосвязанные каналы или сеть взаимодействующих трещин конечной длины) с оценкой параметров схемы в натуре.

Лабораторные исследования движения воды по трещине и сети трещин. Движение воды по одиночной трещине в искусственном материале и модели трещин [Ломизе, 1951; Луи, 1968], а также движение воды в одиночной трещине в горных породах [Жиленков, 1975] описаны рядом эмпирических зависимостей. Эти зависимости проверены на образцах гранита с одиночной трещиной (рис. 87). Эти эксперименты, а также эксперименты с сетью трещин подробно рассмотрены в книге [Чернышев, 1979]. В результате опытов установлено, что расход напорного потока воды через одиночную трещину может быть удовлетворительно рассчитан по формуле Буссинеска для гладкой щели $q = (\gamma/12\mu) b^3 I$, где q — расход, см/с; μ — вязкость, пуаз; γ — плотность жидкости, г/см³; b — средняя ширина трещины, см; I — гидравлический уклон.

Введение поправок для учета шероховатости возможно по методам Г.М. Ломизе и К. Луи. Учет шероховатости меняет знак ошибки, но ее относительная величина не становится меньше (табл. 45). Имея в виду большую ошибку измерения ширины трещин, при расчете коэффициента фильтрации и расхода потока по параметрам трещин для реальных массивов не имеет смысла учитывать шероховатость трещин. Вклад шероховатости в общую ошибку мал по сравнению с влиянием ошибок определения ширины, коэффициента фильтрации заполнителя, прерывистости сети трещин.

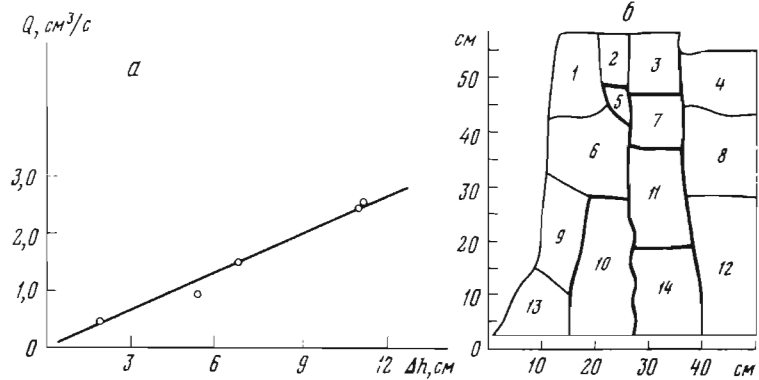


Р и с. 87. Трещина в образце гранита

Лабораторные исследования на сетях трещин выполнены для выбора удовлетворительной модели сети. В качестве конкурирующих моделей рассматривались модели тензорной теории проницаемости и теории линейных элементов. Чтобы провести сравнение, в лотке была создана сеть трещин (рис. 88), все параметры которой были оценены до опыта. Затем для этой сети экспериментально и аналитически найдены зависимости $q(\Gamma)$. Сравнение экспериментальных данных по различным способам расчета позволило выбрать лучший. В лабораторных условиях выполнено физическое моделирование напорного потока подземных вод через трещиноватый массив с коэффициентом подобия по всем параметрам исследуемого процесса равным единице. Исследовался напорный поток воды в мраморе и граните. Выполнено 10 опытов с разными параметрами сетей трещин. Например, образец 4 изготовлен из четырехугольной мраморной плиты, толщина которой несколько менялась по площади, составляя в среднем 7,8 см. Для проведения опыта плита была разбита на четырнадцать блоков разного размера. Трещины отрыва, образовавшиеся при рас-

Т а б л и ц а 45
Относительные погрешности расчета расхода воды через одиночную трещину, %

Образец	Зависимости			
	Буссинеск	Ломизе	Луи	Жиленков
1	14,2	1,2	5,3	94
2	9,9	21,6	9,2	97
3	19,2	48,2	37,2	94,9
Средняя по 3 образцам	14,4	23,7	17,2	95,3



Р и с. 88. Сеть трещин в мраморной плите (б) и зависимость расхода от гидравлического напора, полученная для фрагмента сети, выделенного жирной линией (а)

калывании плиты, имели весьма шероховатые поверхности стенок и извилистую форму, которая хорошо моделировала форму природных трещин отрыва. Мы не стремились создать гладкие трещины типа сколовых, природных, так как очевидно, что для таких трещин теория движения воды по щелям более применима, чем для сложных по форме трещин отрыва. Если бы удалось показать применимость теории для сетей трещин отрыва, то тем самым применимость ее к сетям, включающим трещины скола, также была бы доказана.

Модель сети трещин, как и естественная сеть трещин, была изготовлена без потери материала при раскалывании плиты. В природных условиях образование трещин отрыва в массиве, очевидно, не сопровождается выносом материала из трещин. Только при карсте и суффозии наступает вынос. Вследствие этого две стенки природных трещин составляют как бы матрицу и отпечаток. Раскрытие возникает за счет ничтожного продольного перемещения стенок и последующего их смыкания с касанием в отдельных точках. В модели при раскалывании плиты суммарный объем крошки составил около 3 см^3 , или около 0,0001 от объема плиты и не более 0,05 от объема испытанной решетки трещин. Таким образом, при моделировании было достигнуто полное равенство поверхностей стенок трещин. Форма трещин, образованная такими поверхностями при укладке блоков в лоток, была аналогична форме природных трещин. Условия расположения и пересечения трещин в образце также отражали природную ситуацию.

На моделях были измерены все параметры трещин, необходимые для расчета расхода или коэффициента фильтрации методами теории линейных элементов или тензорной теории проницаемости. Были установлены экспериментально зависимости расхода от гидравлического градиента.

Опыты были выполнены и в полевых условиях. Производились наливки в шурфы и скважины с параллельным измерением параметров трещин.

Достоверность расчета коэффициента фильтрации по параметрам трещин. Результаты параллельного определения коэффициента фильтрации гидравлическими и аналитическими методами приведены в табл. 46. Рас-

Таблица 46

Сопоставление рассчитанных по параметрам трещин коэффициентов фильтрации с экспериментальными данными

Номер эксперимента	Результаты эксперимента			Вычисленные коэффициенты фильтрации и их отклонения от экспериментального результата					
	Коэффициент фильтрации, м/сут		Удельное водопоглощение, л/мин	по тензорному методу			по методу линейных элементов		
	К _ф	(lg К _ф) _э		К _ф , м/сут	(lg К _ф) _т	ошибка Δ _т	К _ф , м/сут	(lg К _ф) _л	ошибка Δ _л
4а	160	2,20	—	180	2,25	-0,05	55	1,74	-0,46
4в	30	1,48	—	365	2,56	-1,08	37	1,57	+0,09
4г	30	1,48	—	333	2,48	-1,00	42	1,62	-0,24
4д	50	1,70	—	462	2,66	-0,96	113	2,05	-0,35
5а	172	2,23	—	931	2,97	-0,54	164	2,22	+0,01
5б	50	1,70	—	1211	3,08	-1,38	224	2,35	-0,65
6а	590	2,77	—	1916	3,28	-0,51	512	2,71	+0,06
6б	172	2,23	—	1712	3,23	-1,00	174	2,24	-0,01
6в	285	2,45	—	880	2,94	-0,49	312	2,49	-0,04
6г	221	2,34	—	894	2,95	-0,61	176	2,24	+0,10
1501	120	2,08	—	1389	3,14	-1,06	324	2,51	-0,43
1502	14	1,15	—	346	2,54	-1,39	48	1,68	-0,53
1503	7	0,85	—	64	1,94	-1,09	45	1,65	-0,80
1507	6	0,80	—	125	2,10	-1,30	20	1,30	-0,50
1509	0,4	-0,40	—	4,5	0,65	-1,05	0,2	-0,70	+0,30
1505	50	1,70	—	452	2,65	-0,95	—	—	—
518	—	0,59	2,9	—	—	—	1,0	0,00	0,59
2011/1г	—	-0,66	0,1	3,5	0,54	-1,20	0,1	-1,00	0,34
2011/2в	—	-0,66	0,1	0,3	-0,52	-1,18	0,2	-0,70	+0,04
2012/3г	—	-0,66	0,1	1,2	0,08	-0,74	0,5	-0,30	-0,36
1026/4г	—	-0,24	0,3	5,0	0,70	-0,94	1,4	0,15	-0,39
2015/7в	—	-0,24	0,3	0,3	-0,54	+0,26	0,2	-0,70	0,46
2015/8в	—	-0,24	0,3	1,5	0,18	-0,06	0,4	-0,40	0,16
2015/8г	—	-0,39	0,2	1,0	0,00	-0,39	0,2	-0,70	0,31
2014 ^а /9в	—	-0,02	0,6	2,6	0,41	-0,39	0,5	-0,30	0,32

пределение ошибок, вычисленных в табл. 46, может быть аппроксимировано нормальными кривыми со следующими параметрами. Для ошибок тензорного метода среднее значение логарифма равно -0,79 и стандартное отклонение логарифмов 0,43. Для ошибок метода линейных элементов среднее значение равно -0,01 и стандартное отклонение логарифма 0,32.

Сравнение двух методов показывает, что тензорный дает значительную систематическую ошибку. Вычисленные значения коэффициента фильтрации во всех случаях, за исключением одного, оказались больше экспериментальных. В среднем они превышают экспериментальные значения в 6,2 раза. Однако поправка путем деления вычисленного значения на соответствующий коэффициент не может привести к точной оценке, так как стандартная случайная ошибка вычисленных значений достигает 43% от логарифма коэффициента фильтрации. На уровне надежности 67% она может исказить натуральное значение коэффициента фильтрации в 2,7 раза.

Ошибки при использовании метода линейных элементов меньше. Систематическая ошибка в этом случае практически отсутствует, а случайная составляет в том же выражении около 32% от результата, т.е. случайная ошибка натуральных значений приблизительно в 2 раза искажает результат в ту или иную сторону на уровне надежности около 67%.

Таким образом, метод линейных элементов оказывается более точным при расчете коэффициента фильтрации для верхних частей земной коры, где строятся шахты, карьеры и инженерные сооружения. Он может быть реализован на ЭВМ и АВМ [Руководство по расчету..., 1979]. Предпринимавшиеся в последние годы попытки модернизировать тензорную теорию применительно к прерывистым сетям трещин и сетям с неоднородным раскрытием трещин пока не привели к надежным результатам.

§ 10.2. Расчет модуля деформации скального массива

Скальный массив представляет собой сложное природное сооружение, различные части которого сжимаемы по-разному. В слоистой толще в несколько раз различается сжимаемость отдельных слоев. Порода в трещинах (заполнитель), если она имеет тектоническое или гипергенное происхождение, более сжимаема, чем порода в блоках. Полное пространство трещин особенно легко сокращается при повышении напряжений в массиве. Одни и те же элементы структуры массива по-разному сжимаются в зависимости от влажности, талого или мерзлого состояния и напряжения в массиве. Наконец, выветривание и техногенные деформации массива могут существенно изменить его сжимаемость. Таким образом, сжимаемость массива, которая в инженерных расчетах выражается модулем деформации, зависит от множества факторов, среди которых главнейшие: 1) структура массива; 2) модуль деформации слагающих его элементов; 3) напряженное состояние при возведении и эксплуатации сооружения; 4) температура и влажность массива в период эксплуатации.

Современная практика не располагает методом, который учитывал бы одновременно все названные факторы. Между тем в геологии, минералогии и геомеханике накоплен обширный опыт, позволяющий оценить влияние каждого из этих факторов в отдельности. Установлена твердость и деформируемость различных минералов при различных влажностях и давлениях [Беликов, 1964]. Детально описывается структура массива и слагающих его пород. Однако этот материал пока не использовался для оценки деформируемости массива с учетом структуры и различных аспектов состояния.

Деформация скального массива с трещинами как структурной среды рассмотрена в работах А.Г. Тархова [1940], Б.Д. Зеленского [1967], Дж. Уолша [Walsh, 1965], И.И. Кондаурова [1966] и К.В. Руппенейта [1975]. В последней работе получено наиболее удобное для практики изысканий решение. В модели К.В. Руппенейта массив рассматривается как двухкомпонентная среда, состоящая из чередующихся зон, называемых породой и трещиной. Модуль деформации зоны трещины оценивается через модуль деформации породы. Для этого трещина представлена как полость, стенки которой смыкаются в отдельных точках. Можно обрисовать трещину как две плоскости, между которыми в отдельных точках размещены пружины с деформационной характеристикой, принятой для

породы. Таким образом, вычисление модуля деформации зоны трещины сводится к определению количества упругих связей между стенками. Деформационная характеристика этих связей не отличается от характеристики породы в монолите. Для трещин в скальных породах доля контактов в общей площади стенок трещины принята постоянной и равной $\xi = 3 \cdot 10^{-4}$ [Руппенейт, 1975].

За модуль деформации контактов можно принимать модуль деформации минералов, вступающих в контакт. Методика расчета усредненных модулей деформации минералов разработана Б.П. Беликовым [1964]. Вычисленные константы порообразующих минералов приведены также в работе [Юшкин, 1971, с. 27].

Основное уравнение упругой деформации двухкомпонентной среды в направлении, перпендикулярном трещине, запишем в виде

$$\frac{(a+b)d\sigma}{E_{\perp}} = \frac{ad\sigma}{E_{\pi}} + \frac{bd\sigma}{\xi E_{\pi}} \quad (1)$$

Согласно закону Гука, деформация тела, состоящего из трещин и породы, обладающего модулем деформации E_{\perp} , равна сумме деформаций породы на отрезке a при модуле деформации породы E_{π} и трещины на отрезке b при модуле деформации зоны трещины ξE_{π} . σ — нормальное напряжение, действующее перпендикулярно трещине. Записывая уравнение в дифференциальной форме, допускаем, что закон Гука верен для бесконечно малого отрезка кривой зависимости деформации от напряжения. Решение уравнения (1) приведет нас в дальнейшем к нелинейной зависимости деформации от напряжения, которая очевидно ближе к наблюдавшимся и известным фактам, чем линейная зависимость, применявшаяся ранее.

Из (1) можно получить [Руппенейт, 1975] выражение для обобщенного модуля деформации массива E_{\perp} . Обозначая через $\eta = b/\xi a$, получаем

$$E_{\perp} = E_{\pi} / (1 + \eta) \quad (2)$$

Для массива с множеством трещин, образующих различные углы с горизонтом, дается выражение обобщенного модуля деформации массива в вертикальном направлении

$$E_{\perp} = E_{\pi} / \left[1 + \sum_1^k \eta_i (1 - \sin^4 \beta_i) \right], \quad (3)$$

где i — индекс трещины или системы трещин; β — угол падения i -й трещины или i -й системы трещин; η_i — геометрическая характеристика i -й трещины или i -й системы трещин; k — количество трещин или систем трещин в массиве.

Выражение (3) может быть использовано для вычисления обобщенного модуля деформации массива по любому направлению, отличному от вертикального. В таком случае β_i — угол падения, а угол между трещиной (системой трещин) и площадкой, перпендикулярной к направлению искомого E_{\perp} .

Все параметры уравнения (3) могут быть определены по существующим методикам, за исключением одного — площади скальных контактов. Эта величина зависит от обработки поверхности трещины в ходе геологиче-

ской истории, от состава минералов на поверхности стенки, от давления, смыкающего трещину. К.В. Руппенейт, признавая, что площадь скальных контактов зависит от ряда факторов, в том числе от давления, тем не менее рекомендует принять $\xi = 3 \cdot 10^{-4}$ постоянной [1975, с. 102].

Учесть реальную величину ξ в каждом конкретном случае расчетов желательно. Это можно сделать следующим образом. Площадь контакта, с одной стороны, определяется характером обработки поверхности, профилем поверхности и вероятностью соприкосновения отдельных выступов на стенках трещины. Из этих геометрических соображений площадь контакта определяли К.В. Руппенейт и В.И. Шейнин [Руппенейт, 1975]. Однако возможен и другой подход к определению площади скальных контактов. Площадь контакта стенок трещины может быть определена из условия равновесия между давлением, сжимающим стенки, и сопротивлением сжатию материала стенок по площади контакта. Чем больше давление, тем больше площадь контакта, с другой стороны, чем более сжимаемы минералы в контактах, тем больше площадь контакта при постоянном давлении. Таким образом, величину относительной площади скальных контактов можно выразить в первом приближении в виде

$$\xi = \sigma / \sigma_{сж}, \quad (4)$$

σ — нормальное напряжение в направлении, перпендикулярном трещине, кг/см²; $\sigma_{сж}$ — временное сопротивление породы сжатию в объеме, характерном для отдельного контакта стенок, кг/см².

Прочностная характеристика породы в объеме микроскопического отдельного контакта $\sigma_{сж}$ сильно отличается от кубиковой прочности породы в силу масштабного эффекта I рода. Масштабный эффект и различные формы образца и контакта исключают возможность использования для определения относительной площади скальных контактов привычную для изыскателей кубиковую прочность породы.

Методика, очень близкая к тому, что требуется в данном случае, существует в минералогии, это определения твердости минералов методом статического вдавливания. При этих испытаниях в шероховатую поверхность минерала, совершенно такую же, как в стенке трещины, вдавливаются инденторы различной формы¹. Получаются микронных размеров отпечатки, по площади которых определяется твердость в виде отношения давления к площади отпечатка в кг/см². Опыт достаточно близко моделирует то, что происходит при смыкании трещин, когда выступы одной стенки трещины вдавливаются в шероховатую поверхность противоположной стенки. При этом как в том, так и в другом случае на участке вдавливания развивается упругая деформация, пластическое течение и хрупкое разрушение в одних и тех же пропорциях в силу сходства материала и величины нагружения. Напряжения в контакте индентора с испытуемым минералом достигают десятков тонн на квадратный сантиметр. В контактах стенок трещин при внешних давлениях 10–30 кг/см², что обычно в активной зоне инженерных сооружений, развиваются напряжения того же порядка.

¹ В качестве инденторов в приборах используются шарики, цилиндры и конусы с различными углами заострения, пирамиды различной формы, а также с различными углами при вершине.

Исходя из сходства опыта по определению твердости вдавливанием и процесса на контактах стенок, заменим в выражении (4) величину $\sigma_{сж}$ на твердость H . Тем самым будут сняты недостатки (4), связанные с масштабным эффектом, неучетом пластической деформации и, отчасти, формы испытуемого образца. Примем

$$\xi = \sigma/H. \quad (5)$$

В подтверждение принятого допущения вычислим ξ по (5) для некоторых конкретных случаев. Известно, что твердость кварца около 1000 кг/мм^2 . При такой твердости стенки трещины, образованные кварцевыми зернами при нормальном напряжении в массиве 30 кг/см^2 согласно (5) имеют площадь контакта $3 \cdot 10^{-4}$ от общей площади трещины. Таким образом, вычисление через твердость приводит к частному значению площади контакта, принятому ранее И.В. Тарасовой [Руппенейт, 1975] для сходных пород и давлений при обработке опытов Б.Д. Зеленского. В опытах М. Панчини, также обработанных И.В. Тарасовой, был принят тот же коэффициент. Несмотря на то что в этих опытах использован значительно менее твердый материал, выбор площади скальных контактов оказался удачным, так как давления были в 100 раз ниже, чем в опытах Б.Д. Зеленского. Возможность получить предложенным здесь методом значение $\xi = 3 \cdot 10^{-4}$, применявшееся ранее в качестве постоянной, как частное для определенных условий, свидетельствует в пользу нашего подхода.

Подставим (5) в уравнение (1):

$$(a + b)d\sigma/E_{\perp} = ad\sigma/E_{п} + bHd\sigma/\sigma E_{п}, \quad (6)$$

$(a + b)d\sigma$ — деформация пары блок — трещина.

После интегрирования в пределах от σ_1 до σ_2 получим выражение, описывающее нелинейную упругую деформацию двухкомпонентной среды:

$$(a + b)(\sigma_2 - \sigma_1)/E_{\perp} = a(\sigma_2 - \sigma_1)/E_{п} + bH \ln(\sigma_2/\sigma_1)/E_{п}. \quad (7)$$

При фиксированном значении σ_1 с ростом σ_2 приращение деформации уменьшается в связи с закрытием трещин. Отсюда можно получить формулу для оценки модуля деформации массива при изменении напряжения от σ_1 до σ_2 :

$$E_{\perp} = \frac{(a + b)(\sigma_2 - \sigma_1)E_{п}}{a(\sigma_2 - \sigma_1) + bH \ln \sigma_2/\sigma_1}. \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что с увеличением напряжения σ_2 относительно начального значения σ_1 модуль деформации массива увеличивается и стремится к модулю деформации породы как к своему пределу. Достижение этого предела мыслимо только при смыкании стенок трещины по всей поверхности.

Воспользуемся выражением (5) для вычисления площади скальных контактов. Для этого необходимо по петрографическим данным определить минералы, входящие в контакт на поверхности стенок, и их микротвердость. Постоянство петрографического состава породы по всей длине трещины является необходимым условием для решения задачи. При этом условии любой отрезок трещины, рассмотренный на микроскопическом

уровне, будет представлять всю трещину так же, как монолит глинистого грунта, взятый из слоя, представляет собой слой для всей значительной площади его распространения. Переход от одной трещины к множеству трещин того же происхождения в породе постоянного состава так же возможен, как переход по аналогии от свойств одного слоя толщи к свойствам других слоев того же состава и происхождения.

Для мономинеральной породы (например мрамора) не существует проблемы определения минералов, контактирующих в стенках трещины. В (5) величину H можно принять для единственного минерала породы и вычислить ξ . Для полиминеральной породы задача сложнее и, по-видимому, требует вероятностного решения для составления пар минералов, встречающихся при сдавливании стенок трещины. Свойства минералов в настоящее время достаточно хорошо изучены [Беликов, 1964; Юшкин, 1971], имеется возможность воспользоваться табличными данными.

В выражение (5) кроме твердости минералов входят напряжения. В первом приближении изменение напряжений с глубиной принимаем по гипотезе Гейма. Она может быть верна для верхних десятков метров массива, которые исследуются при изысканиях в платформенных районах. Тогда

$$\xi = \gamma h/H, \quad (9)$$

где γ — объемный вес породы, г/см^3 ; h — глубина, см; H — твердость контактирующих минералов, г/см^2 .

Первые учитывать напряжения и твердость материала в зоне трещины предложил Б.Д. Зеленский [Руппенейт, 1975]. В его постановке деформируемость зоны трещины определяется твердостью горной породы по Бригеллю, нормальным напряжением на поверхности трещины и формой трещины. Форма в свою очередь описывается многими параметрами, которые трудно определить в натуре. Такой подход, заимствованный из металловедения, практически неудобен. Неоправдана константа — твердость горной породы. Горные породы представляют собой полиминеральные агрегаты. Во внутреннем пространстве трещины каждое минеральное зерно выступает как отдельное тело. Поэтому можно говорить о твердости минералов, слагающих породу, но не о твердости горных пород. Факторы твердости и напряжения используются ниже для оценки площади скальных контактов. Площадь скальных контактов измерениями при изысканиях установить почти невозможно. Не случайно имеется только один опубликованный пример определения этой величины (В.В. Каякиным) и еще один в гл. 2 данной работы [Руппенейт, 1975]. Предложенный упрощенный подход к определению этой величины представляется перспективным. Рассмотрим, к каким результатам он приводит при практических вычислениях. Зависимость деформации зоны трещины от напряжения позволяет также оценить изменение водопроницаемости при увеличении давления на массив. Для этого в формуле для расхода воды через щель необходимо выразить раскрытие трещины через напряжение. Получим

$$\sigma_{\sigma} = \frac{\gamma [b(1 - H \ln(\sigma_2/\sigma_1)/E_{п})]^3}{12\mu} l, \quad (10)$$

σ_{σ} — нормальное напряжение в направлении, перпендикулярном трещине,

при котором измерена ширина трещины: σ_2 - напряжение, для которого рассчитывается расход.

Для наиболее распространенных горных пород постоянная H/E_p находится в пределах от 0,2 до 0,01. С ростом напряжений за пределом упругости это отношение, видимо, уменьшается.

Проверка метода по результатам полевых инженерно-геологических исследований. Приводимые ниже расчеты выполнены с целью проверки применимости изложенного метода расчета модулей деформации массива по параметрам трещин на основе стандартных материалов изысканий. В работе [Руппенейт, 1975] экспериментальная проверка выполнена в значительном объеме. Однако она дала, на наш взгляд, в методическом отношении недостаточно четкие выводы. Осталось неясным, как нужно документировать трещины при изысканиях, чтобы воспользоваться методом расчета. Из книги [Руппенейт, 1975] следует, что не все трещины, видимые в обнажении, можно учитывать в расчете: для расчета следует отбирать только наиболее крупные трещины, которые по длине не менее поперечника области воздействия будущего сооружения.

Выполнить это в реальных условиях изысканий весьма трудно. Длина трещин в горных выработках, особенно в скважинах, практически не поддается оценке. К тому же рассмотрение только трещин, соразмерных по длине с основанием сооружения, при рассмотрении крупных сооружений приводит к парадоксу. Так, под плотиной Братской ГЭС в системе горизонтальных трещин, определяющих сжимаемость основания, возможно, нет ни одной трещины, соразмерной поперечнику основания. Известно, что горизонтальные трещины в долеритах коротки. В таком случае модуль деформации основания, видимо, не должен отличаться от модуля деформации образца. Однако он в 5–10 раз ниже. По-видимому, в расчете необходимо учитывать все трещины, а различие расчетных и экспериментальных значений связано не с излишним учетом мелких трещин, а с недоучетом зависимости площади скальных контактов от давления и минерального состава породы.

Материалом для проверки теории послужили результаты исследований Гидропроекта и ВНИИГа на участках Братской и Усть-Илимской ГЭС [Тиздель, 1962, 1963; Прочухан, 1964; Эйдельман, 1968; Болотина, 1970]. Основания обеих гидроэлектростанций исследованы весьма подробно. Бетонные плотины высотой около 100 м гравитационного типа создают нагрузку на основание до 30 кг/см^2 . В этих условиях деформация даже такой слабдеформируемой породы, как долерит, оказывается практически значительной. При изысканиях подробно описана трещиноватость оснований в штольнях, на обнажениях, в скважинах большого диаметра и по керну обычных колонковых скважин. Многие сотни опытных фильтрационных работ, проведенных на створах плотин, также позволили судить о трещиноватости пород. Обе плотины возведены на трапповых силлах сложной формы (см. рис. 38).

Модуль E в образце для пород участка Братской ГЭС [Тиздель, 1962]: долериты — $E = 9 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$, песчаники полосчатые — $E = 7 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$, песчаники мелкозернистые — $E = 9 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$, алевриты — $E = 6 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$. "Следует отметить, что, несмотря на весьма тщательные исследования, обнаружить существенную разницу в физико-механических свойствах различных петрографических разновидностей траппов не удалось" [Тиздель, 1962, с. 8].

Исследование деформируемости основания проведено на трех участках. Участок № 1 располагался в разведочной штольне длиной 21 м в мелкозернистых траппах с повышенной трещиноватостью, обусловленной столбчатой формой отдельности и некоторым влиянием процессов выветривания. Участок № 2 располагался в штреках шахты № 2, расположенной на бровке левого бережного уступа в более грубозернистых, сильно выветренных траппах. Участок № 3 был расположен в русле реки в мелкозернистых, хорошо сохранных и относительно мало трещиноватых траппах. Таким образом участок № 3 представлял наименее деформируемые породы, участок № 2 — наиболее сжимаемые, а участок № 1 — средние. Нагрузка на штампы доводилась до 250 т/м^2 . На каждом участке штампы устанавливались в различных местах так, чтобы охватить всю гамму условий трещиноватости. Всего было проведено 76 штампоопытов. Получено: по участку № 2 для выветрелых траппов $E = 11400 \text{ кг/см}^2$, по участку № 1 для сохранных траппов $E = 130000 \text{ кг/см}^2$, по участку № 3 для сохранных траппов $E = 440000 \text{ кг/см}^2$.

Осадка плотины [Тиздель, 1963] до наполнения водохранилища составила на 1 кг/см^2 дополнительной нагрузки при бетонировании от 1 до 3,6 мм. Точность нивелирования составляла $\pm 0,7 \text{ мм}$. К моменту начала наполнения водохранилища суммарные наблюдавшиеся осадки составили от 2 до 5,6 мм. Удельная нагрузка на этих секциях в это время достигла 4–7 кг/см^2 . Трещиноватость долеритов в основании Братской ГЭС исследована различными методами. В частности, детально описаны скважины большого диаметра (табл. 46).

Эти данные по деформируемости основания, осадкам и трещиноватости положены в основу сопоставительных расчетов, которые дают возможность оценить качество прогноза модуля деформации по трещиноватости в сравнении с прогнозом по штампоопытам и, что особенно важно, в сравнении с действительными величинами, полученными по осадке плотины (табл. 47, рис. 89). Результаты расчета приведены в столбце 6 той же таблицы. В столбце 7 приведен модуль деформации, рассчитанный с учетом изменения площади скальных контактов по глубине. Твердость минералов заполнителей трещин — кальцита и хлорита — принята равной 100 кс/мм^2 [Юшкин, 1971]. Модуль деформации этих минералов практически не отличается от модуля деформации долеритов в образцах.

Сравним между собой модули деформации, полученные разными методами. Как видно из таблицы и рисунка, модули деформации, определенные в массиве, существенно ниже модулей, определенных на образцах. Причем, чем больше область воздействия, тем меньше абсолютное значение модуля деформации. Следовательно, заметен известный масштабный эффект первого рода. В связи с проявлением масштабного эффекта результаты обратного расчета и близкие к ним результаты штампоопытов можно считать наиболее надежными оценками модуля деформации в объеме зоны основания.

Вычисленные по параметрам трещин модули деформации различны в зависимости от способа задания относительной площади скального контакта. С учетом предложенного в данной работе изменения этой площади по глубине модуль деформации получается практически таким же, как вычисленный по осадке плотины. При постоянном $\xi = 3 \cdot 10^{-4}$ модуль оказался заниженным в 2–3 раза.

Данные по трещиноватости траппов основания Усть-Илимской ГЭС приведены в табл. 48. Ширина трещин определена обратным расчетом по результатам опытно-фильтрационных работ. Геологический разрез дан на рис. 90. По этим данным и формулам (3) и (8) вычислены модули деформации массива. Благодаря широко организованному изучению трещиноватости данными модуля деформации можно охарактеризовать полностью всю интрузию. Для верхней части массива вычисленные значения сопоставляются с результатами полевых определений модуля деформации (табл. 49, рис. 91, 92). Приведенные Н.М. Болотиной данные, видимо, составлены по штампоопытам и прессиометрии, обработанным совместно. Можно, опираясь на ее опыт по более полному материалу, предполагать, что эти цифры несколько выше реальных модулей, проявляющихся при осадке сооружений.

Сравнивая с экспериментальными данными расчетные, мы видим, что модули деформации, вычисленные с переменной площадью скальных контактов, как правило, ближе к экспериментальным данным. Это подтверждает целесообразность определения площади скальных контактов по твердости минералов в стенках трещин и давлению, нормальному к трещине. В самых верхних горизонтах предложенный

Таблица 46

Трещиноватость основания плотин Братской ГЭС [Прочухан, 1964]

№ скважины	Порода	Трещинная пустотность за счет горизонтальных трещин (%) на глубине от поверхности, м					
		10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
42	Долерит	0,21	0,05	0,02	0,06	0,06	0,07
43	"	0,54	0,30	0,29	0,21	-	-
46	"	0,22	0,23	0,12	0,24	0,21	-
26	"	0,74	0,36	0,23	0,16	0,16	-
47	"	0,34	0,27	0,16	-	-	-
50	"	0,40	0,11	-	-	-	-
Среднее для долеритов		0,41	0,22	0,18	0,17	0,14	-
76	Песчаник	0,21	0,33	0,16	0,10	-	-

Таблица 47

Определение модуля деформации для долеритов участка Братской ГЭС разными методами

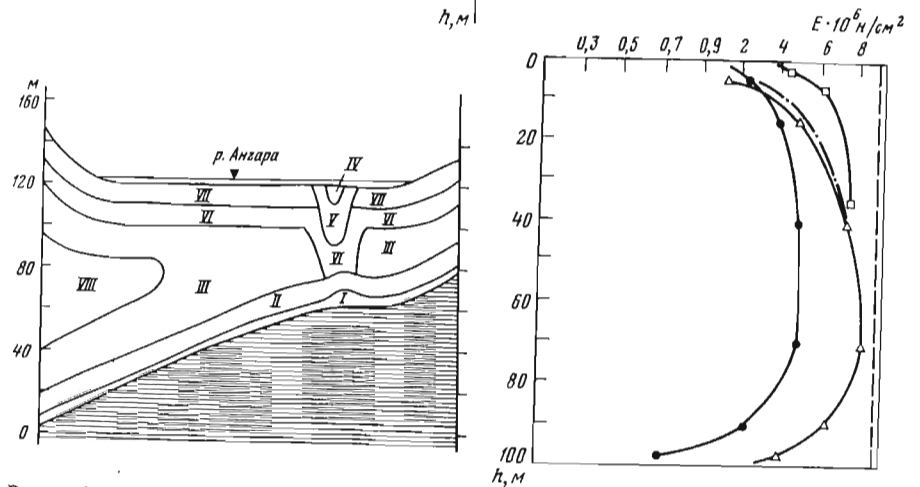
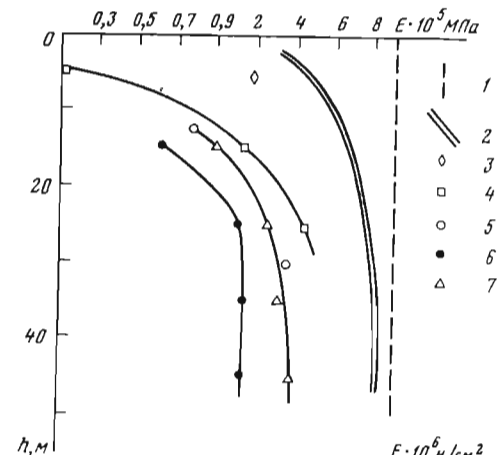
Глубина от естественной поверхности массива $h, м$	Средний модуль деформации, $10^4 МПа$					
	лабораторное определение в образцах [Тиздель, 1962]	по измерениям телетензомером сжатия основания [Эйдельман, 1968]	по штампоопытам [Тиздель, 1962]	вычисленный по осадке плотин	вычислен по параметрам трещиноватости	
					при постоянном $\xi = 3 \cdot 10^{-4}$ [Руппнейт, 1975]	при переменном ξ по формуле (8)
0-10	9,0	2,8	0,11	-	-	-
10-20	9,0	-	1,3	1,15	0,6	0,9
20-30	9,0	-	4,4	-	1,1	2,5
30-40	9,0	-	-	3,5	1,4	3,2
40-50	9,0	-	-	-	1,5	3,9

способ определения площади скальных контактов может привести к ухудшению сходства результатов расчета с экспериментальным материалом, если не учесть выветривание породы. При выветривании появляются в трещинах окислы железа и другие минералы, которые обладают очень низкой твердостью.

Попробуем учесть изменения минералогического состава заполнителя для зоны выветривания Усть-Илимской интрузии. При изысканиях установлено, что объемный вес долеритов в зоне выветривания здесь не меняется, так как выветриванию подвержены только заполнители трещин и пород непосредственно по стенке трещины. Вместо кальцита и хлорита в зоне выветривания в трещинах появляются гётит и гидрогётит, твердость которых в состоянии водонасыщения около 20 кгс/мм^2 . При дегидратации твердость возрастает до $100-120 \text{ кгс/мм}^2$. Поскольку рассматривается массив, расположенный под руслом Ангары, принято минимальное значение твердости. Густота трещин для зоны выветривания указана в табл. 45. Доля трещин, заполненных гидрогётитом, в зоне слабой трещиноватости на глубине от 0 до $12,5$ составляет 23% (по скв. 5055, 5064, 5073), заполненных кальцитом и хлори-

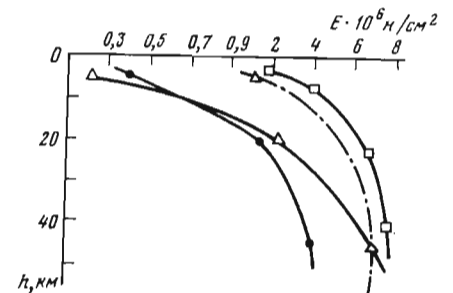
Р и с. 89. Сопоставление модулей деформации, полученных различными методами для долеритов основания плотины Братской ГЭС

1 - лабораторные испытания образцов; 2 - прессиометрия методом ЦГШ ВНИИГ для горизонтального направления; 3 - измерения сжатия основания телетензомерами; 4 - штампоопыты; 5 - обратный расчет модуля по осадке; 6 - расчет по параметрам трещин при постоянном $\xi = 3 \cdot 10^{-4}$ по формуле (3) для вертикального направления; 7 - расчет по параметрам трещиноватости при переменном ξ по формуле (3)



Р и с. 90. Схематический разрез по оси плотины Усть-Илимской ГЭС. Штриховкой обозначены терригенные осадочные породы. Зоны I-VIII показаны в трапезовой интрузии; характеристика зон дана в табл. 48

Р и с. 91. Изменение модуля деформации долеритов Усть-Илимской интрузии от кровли до подошвы в зоне со слабой трещиноватостью. Основание русловой плотины. Условные обозначения см. рис. 91. Штрих-пунктиром показана кривая, построенная с учетом выветривания заполнителя трещин



Р и с. 92. Изменение модуля деформации долеритов Усть-Илимской интрузии в основании здания ГЭС в зоне повышенной трещиноватости и активных экзогенных изменений. Условные обозначения см. рис. 91, 93

Таблица 48

Параметры трещиноватости и модули деформации траппов в основании Усть-Илимской ГЭС

Зона	Горизонтальные трещины		Вертикальные трещины		Модуль деформации для вертикального направления, 10^5 МПа	
	ширина трещины*, см	расстояние между трещинами, см	ширина трещины*, см	расстояние между трещинами, см	по формуле (3)	при переменном ξ по формуле (8)
I	0,09	25	0,09	10	0,7	4,1
II	0,03	40	0,03	15	2,5	6,5
III	0,015	60	0,015	15	5,0	7,4
IV	0,2	35	0,2	20	0,4	0,2
V	0,9	50	0,09	20	1,3	2,2
VI	0,02	50	0,02	15	3,9	6,9
VII	0,03	35	0,03	20	2,4	1,3
VIII	0,01	60	0,02	20	6,0	8,1

* Определена обратным расчетом по результатам опытно-фильтрационных работ.

Таблица 49

Деформационные свойства долеритов в основании Усть-Илимской ГЭС в сравнении со свойствами тех же пород по участку Братской ГЭС [Болотина, 1970]

Показатели сжимаемости пород, t/cm^2	Глубина от поверхности, м	Долериты Усть-Илимского участка		Долериты Братского участка	
		сильно трещиноватые	слабо трещиноватые	сильно трещиноватые	слабо трещиноватые
Модуль деформации*	—	420–1100	1100	550–1300	1300
Модуль деформации	1–5	100–250	280–600	100–200	450–650
	5–10	270–500	500–750	280–360	600–740
	10–35 и ниже	650–750	—	360–520	740–880
Модуль упругости**	1–3	110–170	150–280	—	—
	4–10	450–580	500–700	—	—
	10–75	600	600–850	—	—
	10–20	—	—	640	670–780

* Определен в лаборатории.

** По данным сейсмоакустических исследований в массиве.

том 77%. В зоне повышенной трещиноватости в интервале 0–10 м доля трещин, заполненных гидрогетитом, достигает 100%. В соответствии с этими данными площадь скальных контактов в зоне слабой трещиноватости около $\xi = 3 \cdot 10^{-4}$, а в зоне повышенной трещиноватости $\xi = 7,5 \cdot 10^{-4}$. Вводя в формулу (2) новые значения площади скальных контактов, вычисленные по (9), для глубины 5 м получаем модули деформации $2,4 \cdot 10^5$ МПа в зоне слабой трещиноватости (рис. 91) и $1,2 \cdot 10^5$ МПа в зоне повышенной трещиноватости. Эти значения ближе к экспериментальным данным, чем вычисленные без учета выветривания, что еще раз подтверждает эффективность вычисления площади скальных контактов через твердость минералов — заполнителей трещин.

Минералогический подход позволяет прогнозировать модуль деформации не только в зависимости от структуры массива, но также и в зависимости от его физического состояния: напряжения и влажности. По-видимому, могут быть учтены и другие параметры естественных физических полей, в которых существует массив.

§ 10.3. Влияние минералогического состава горной породы на площадь скального контакта стенок трещины

До сих пор рассматривались трещины, в стенках которых встречается либо один минерал, либо несколько минералов с близкой твердостью. Однако большинство горных пород представляют собой полиминеральные агрегаты. Несмотря на то что они наделены своеобразными структурами и текстурами, расположение минеральных зерен, вероятно, случайно в статистическом смысле.

Рассмотрим задачу об определении площади скального контакта при наличии в стенках трещины двух минералов, взаимное расположение которых не коррелировано. Дадим этим минералам номера 1 и 2. Их твердости соответственно H_1 и H_2 . Доля первого минерала на площади трещины S_1 , второго минерала S_2 . Требуется определить площадь скального контакта стенок трещины при нормальном напряжении σ (рис. 93). $S_1 + S_2 = 1$.

Для решения необходимо рассмотреть все возможные сочетания минералов в контактах и приписать каждому из сочетаний определенную твердость. Одновременно необходимо оценить вероятность каждого сочетания, для чего можно воспользоваться известной в теории вероятностей теоремой умножения. При назначении твердости в контакте будем исходить из того, что одноименные зерна при контакте проявляют свойственную им твердость H_1 или H_2 , а при контакте разноименных зерен твердость пары определяет податливое зерно, т.е. в парах 1–2 и 2–1 принимаем твердость H_1 :

$$\begin{aligned} \text{Сочетание 1–1, твердость } H_1, P_{1-1} &= S_1^2, \\ \text{1–2, } H_1, P_{1-2} &= S_1 S_2, \\ \text{2–2, } H_2, P_{2-2} &= S_2^2, \\ \text{2–1, } H_1, P_{2-1} &= S_1 S_2. \end{aligned}$$

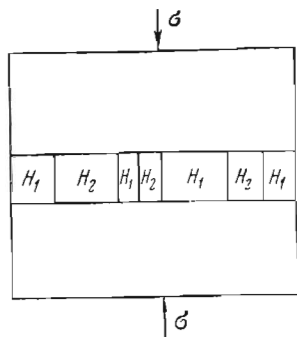
Сумма вероятностей всех сочетаний равна единице, так как названные сочетания составляют полную сумму событий $P_{1-1} + P_{2-2} + 2P_{1-2} = 1$. Вероятность встретить в контакте твердость H_1 равна

$$P(H_1) = P_{1-1} + 2P_{1-2}. \quad (11)$$

Вероятность встретить твердость H_2 соответственно

$$P(H_2) = P_{2-2}. \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что при доле твердого минерала на поверхности трещины порядка 10–20% вероятность твердости H_2 в контакте составляет всего 1–4%. Такую вероятность, видимо, можно не принимать в расчет. Тогда эффективная твердость в



Р и с. 93. Схема трещины со скальными контактами двух типов

контактах H_1 . Искомая величина относительной площади скальных контактов может быть найдена по формуле (9) через указанное значение эффективной твердости. Следовательно, минералы, которые в сумме составляют менее 10% от площади среза (шлифа), при расчетах площади скальных контактов можно не учитывать. Такие распространенные горные породы, как гранодиорит, сиенит, габбро, долерит, можно рассматривать в данной задаче как мономинеральные агрегаты. Твердость слагающих их породообразующих минералов различается не слишком существенно. С твердостью акцессорных минералов,

которая может значительно отличаться от твердости породообразующих, согласно (12) можно не считать.

При равной доле твердого и мягкого минералов и при преобладании твердого необходимо учитывать при выводе эффективной твердости как H_1 , так и H_2 . Это видно из следующего рассуждения.

Рассмотрим стенки трещины как два жестких штампа, между которыми пространство трещины занято контактами двух сортов с твердостью H_1 и H_2 . Доля контактов с твердостью H_1 от общей площади контактов составляет A_1 , доля контактов с твердостью H_2 соответственно A_2 , определяется по (11) и (12). Внешнее нормальное по отношению к трещине давление P , кг/см². Оно приводит к напряжению σ_1 в контактах с твердостью H_1 и напряжению σ_2 в контактах с твердостью H_2 . Соответствующие деформации в области контактов ϵ_1 и ϵ_2 . Штампы наделяем идеальной продольной жесткостью, ввиду того, что расстояние между разноименными контактами несоизмеримо мало в сравнении с поперечником штампа. За поперечник штампа нужно принять поперечник блока породы, обозначенный нами через a . Зависимость деформации от нормального напряжения в зоне контакта примем линейной. Из названных величин считаем известными P , H_1 , H_2 и A_1 и A_2 . Требуется определить σ_1 и σ_2 . Запишем систему из шести уравнений с шестью неизвестными:

$$P_1/A_1 = \sigma_1; \quad P_2/A_2 = \sigma_2; \quad \sigma_1 = H_1 \epsilon_1; \quad \sigma_2 = H_2 \epsilon_2; \quad P_1 + P_2 = P; \quad \epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon.$$

Эти уравнения последовательно выражают зависимость между давлением, площадью и напряжением; между напряжением и деформацией; между давлениями в контактах с H_1 и H_2 и суммарным давлением; равенство деформаций во всех контактах при отсутствии продольного изгиба штампа. После решения системы уравнений получаем

$$\sigma_1 = P_1 H_1 / (H_1 S_1 + H_2 S_2), \quad \sigma_2 = P_2 H_2 / (H_1 S_1 + H_2 S_2).$$

Площадь скальных контактов в рассматриваемом случае равна сумме площадей контактов первого и второго рода $\xi = \sigma_1/H_1 + \sigma_2/H_2$; $\xi = P/(H_1 S_1 + H_2 S_2)$.

Выражение пригодно для оценки площади контактов в таких породах, как гранит, гнейс, кварц-полевошпатовый песчаник или мергель, состоящих из породообразующих минералов с различной твердостью.

Для полиминеральной породы полученное выражение можно обобщить в виде

$$\xi = \frac{P}{H_1 S_1 + H_2 S_2 + \dots + H_n S_n}.$$

Итак, при расчетах необходимо в отличие от принятого ранее площадь скальных контактов стенок трещины считать величиной переменной по массиву, как и другие параметры трещиноватости. Определять величины скальных контактов расчетом в зависимости от давления в зоне трещины, минералогического состава породы, твердости минералов, температуры и влажности в массиве. Принимать в расчет все видимые трещины, превышающие по длине размер образца породы, на котором определен модуль деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сеть трещин в горных породах определяет механические свойства массива или толщи, служит источником сведений об истории деформаций земной коры, иногда является руководящим признаком при поиске, разведке и подсчете запасов различных полезных ископаемых от руды, нефти и газа до каменных строительных материалов. Строение сети трещин изучается геологами более ста лет. Сложилась классификация трещин. Описаны типы трещин, связанные по происхождению с теми или иными геологическими процессами. По абсолютной длине принято выделять микротрещины длиной менее 0,1 м, макротрещины, которые для краткости называют трещинами (их длина от 0,1 до 100 м), и разрывы длиной более 100 м. Дислокации и другие механические ослабления в кристаллической решетке к трещинам не относятся.

Совокупность трещин составляет пространственную сеть. При расстоянии между примерно параллельными трещинами менее 10 см сеть считается частой, при расстоянии между трещинами более 100 см — редкой. Важнейшие характеристики сети — прерывистость, от которой зависит совершенство расчленения горных пород на блоки отдельности, и взаимная ориентировка трещин, от которой зависит форма блоков отдельности. По степени прерывистости выделяются разорванные, прерывистые и непрерывные сети трещин. Отдельность в массиве с разорванной сетью весьма несовершенная, так как трещины не пересекаются и все условно выделяемые блоки соединены мощными целиками породы. Прерывистые сети состоят из частично пересекающихся трещин. Отдельность в таких массивах в зависимости от степени прерывистости можно назвать несовершенной или совершенной. Непрерывные сети трещин создают весьма совершенную отдельность, так как все трещины пересекаются и полностью отчленивают блоки. Три типа сетей по степени прерывистости условно можно рассматривать как три последовательные стадии развития сети трещин. На первой стадии формируются разобщенные трещины. На второй происходит слияние и пересечение трещин. На третьей стадии после пересечения и слияния трещин начинается образование сетей трещин новых уровней, т.е. процесс возобновляется на новых уровнях. Образуются трещины внутри блоков (первичные трещины эффузивов, трещины оперения разрывов, трещины выветривания и др.) и сеть разрывов, наиболее изученная на примере тектонических разрывов.

Ориентировка трещин и углы между ними определены происхождением и историей деформирования горных пород, которые в наиболее лаконичной форме выражаются тензорами разрушающих напряжений. В массиве горных пород реализуются все три принципиально возможных сочетания главных нормальных напряжений. Эти сочетания: 1) три главных нормальных напряжения равны между собой; 2) равны два из трех главных нор-

мальных напряжения; 3) все три главных нормальных напряжения различны. Три типа напряжений реализуются в трёх типах сетей трещин, которые различаются группами симметрии. Симметрия сетей трещин отражает симметрию тензора напряжения. В соответствии со статистическим характером хрупкого разрушения она выражается статистически. Выделены сфероидальная, полигональная и системная сети трещин. Каждой соответствует определенная анизотропия массива, вызванная трещиноватостью. Каждому геометрическому типу сети поставлен в соответствие список генетических типов трещин. Таким образом, определена область распространения в массиве горных пород каждого из геометрических типов трещиноватости. При последовательном наложении напряжений в массиве образуется асимметричная хаотическая сеть трещин, которая ликвидирует анизотропию.

Структура массива и свойства пород наряду с источником напряжений существеннейшим образом влияют на симметрию сети трещин. Во-первых, при формировании поля напряжений дисимметрия источника напряжений складывается с дисимметрией горной породы в соответствии с принципом П. Кюри. Следовательно, сочетание главных нормальных напряжений и соответствующая симметрия сети зависят от слоистости и текстуры горной породы. Во-вторых, шаг переноса, одного из автоморфизмов бесконечной сети, определяется прочностью горной породы при равной интенсивности напряжений. В-третьих, неоднородность массива регулирует точность выполнения всех автоморфизмов в сети трещин.

Все генетические типы трещин и на любых этапах геологической истории развиваются в соответствии с принципом унаследованности, который в общем виде сформулирован Н.С. Шатским, А.В. Пейве, А.А. Яншиным и является общим принципом структурообразования в геологии. В сети трещин под воздействием различных агентов растут наиболее крупные трещины, которые оживляются на различных этапах развития массива. Периодически под влиянием изменения внешних условий (это выражается в перестройке тензора напряжений) тенденция унаследованного развития пресекается. Возникают новообразованные системы трещин, которые закономерно расположены по отношению к новым осям главных нормальных напряжений. Это не исключает при смене условий возврата к старому плану деформаций. Иногда при метаморфизме, гидротермальном залечивании трещин или выветривании сеть трещин перестает существовать. Унаследованное развитие трещиноватости прекращается. В массиве возникает наложенная сеть трещин, слабо отражающая предыдущий план деформаций. Старая сеть может проследиваться в виде жил и даек, которые не являются дефектами массива в механическом смысле и потому не влияют или слабо влияют на развитие наложенной сети.

При встрече двух растущих трещин происходит в зависимости от угла либо прекращение роста одной из трещин, либо ускоренное развитие новообразованной при слиянии крупной трещины. В соответствии с двумя возможностями исхода в сети трещин возникают два уровня неоднородности. Дальнейшее течение процесса приводит к новым делениям растущей совокупности крупных трещин и образованию новых уровней неоднородности. При переходе от ранних уровней к поздним количество трещин скачкообразно уменьшается, а длина их скачкообразно возрастает.

Статистически унаследованное развитие трещин выражается в смене формы распределения большинства параметров трещиноватости. Вследствие преимущественного роста крупных трещин распределение ширины, длины, частоты трещин в ходе геологической истории приобретает левую асимметрию и переходит от распределения типа нормального к распределению типа логнормального. Новообразованные системы трещин закономерно отличаются от более древних меньшей длиной и густотой, а также большей вариацией всех параметров трещин. Это не относится к наложенным сетям трещин.

Механизм унаследованного развития трещин вскрывается при рассмотрении процессов хрупкого разрушения, размыва и растворения породы, а также кольматации трещин, которые являются элементами единого геологического процесса развития сети трещин. Общее между названными разнообразными условно выделяемыми элементами геологического процесса заключается в том, что математические зависимости, описывающие их, носят нелинейную форму. Всякая трещина в соответствии с нелинейным законом в стабильных геологических условиях растёт ускоренно. Или, что то же, в группе одновременно растущих трещин быстрее развиваются крупные. Нелинейность процессов является фундаментальной причиной унаследованного развития сетей трещин.

Установленный факт развития сетей трещин в соответствии с законом унаследованности позволяет сделать два принципиальных практических вывода. Рассматривая инженерные сооружения как новообразования в составе земной коры — элемент ноосферы — и применяя к их развитию в ходе строительства и эксплуатации принцип унаследованности, следует: 1) предусматривать возможность унаследованных деформаций в сооружении на месте наиболее крупных нарушений в подстилающих или окружающих горных породах; 2) всемерно стремиться к использованию природных структур для организации полезных унаследованных от природы технологических процессов. Первое из этих положений широко используется на практике. Прекрасным примером может служить компоновка сооружений Рогунского гидроузла на р. Вахше среди подвижных разрывов [Количко, 1981]. Второе еще недостаточно осознано в строительстве. Однако и здесь имеется развернутый пример практического воплощения принципа: выбор формы подземной выломки по форме сети трещин [Пашкин, 1981].

Принцип унаследованности в широком понимании — это, по А.В. Пейве, принцип развития применительно к геологическим процессам. Руководствуясь этим принципом, автор рассматривает процессы формирования скального откоса, деформирования массива и фильтрации, акцентирует внимание на слабых звеньях массива — трещинах, а среди них на наиболее крупных, так как они самые активные участники процессов. При анализе связи сейсмодислокаций с параметрами землетрясений внимание сосредоточено также на наиболее крупном разрыве как главном показателе энергии землетрясения.

Методика инженерно-геологического изучения сетей трещин направлена на детальное изучение разрывов (они исследуются индивидуально каждый), выборочную статистическую оценку макротрещин и лишь косвенное изучение микротрещиноватости при определении физико-механических свойств

горных пород в образцах. При изучении трещин применяется количественный подход в связи с необходимостью цифрового выражения инженерно-геологических прогнозов. Трещиноватость характеризуется рядом параметров в соответствии с формой моделей трещиноватых сред, которые имеются в гидрогеомеханике. В поле и при камеральной обработке проводится геолого-генетический анализ трещиноватости, который является единственной основой для экстраполяции и интерполяции результатов исследований по пространству массива. Наряду с оценкой параметров трещин для определения свойств массива по принятым методикам должны быть определены показатели состояния массива и свойств пород в образцах, а также оценены вероятные изменения состояния массива при строительстве и эксплуатации сооружений, проектируемые направления нагружения и фильтрации.

Точность измерения параметров трещин оценивается как удовлетворительная и хорошая. Стандартные ошибки измерения значительно меньше среднего квадратического отклонения природной неоднородности. Это определяет их незначительный вклад в общую ошибку расчета свойств массива по параметрам трещин. Исключение составляют измерения ширины, которые даже при тщательной документации проводятся только с удовлетворительной точностью.

Общие природные закономерности строения сетей трещин и результаты конкретных измерений параметров сетей все шире используются для решения различных инженерных и геологических задач. На этом пути сокращается разрыв между полевыми и лабораторными исследованиями грунтов, наметившийся в инженерной геологии [Сергеев, 1974]. Переход от результатов лабораторных испытаний малых образцов к свойствам оснований сооружения в полном объеме иллюстрируется на примерах расчета модуля деформации и коэффициента фильтрации по параметрам трещин. Решения этих задач в более развернутом изложении, а также других задач, решаемых на основе модели сети трещин, рассмотрены в монографиях [Гзовский, 1975; Руппенейт, 1975; Газиев, 1977; Чернышев, 1979; Пашкин, 1981; и др.].

В заключение рассмотрим возможность прогнозирования структуры сети трещин на неизученные массивы и неизученные участки массивов.

Прогноз структуры сети трещин может быть построен для какого-либо геологического тела, если об этом теле известно, из каких горных пород оно состоит, в какой тектонической структуре и в каком пространственном соотношении с ней оно находится, на какой глубине от земной поверхности залегает и каков характер современных тектонических напряжений: сжатие или растяжение испытывает тектоническая структура. Прогноз без изучения трещин может быть сделан только в качественной форме.

При его составлении для осадочной толщи можно опираться на следующие основные положения. Трещины в жестких, компетентных слоях толщи в подавляющем большинстве перпендикулярны и параллельны слоистости, расстояние между ними имеет порядок мощности слоя, отличаясь от мощности в 2–3 раза в ту или иную сторону в зависимости от степени тектонической нарушенности толщи. Протяженность трещины вдоль слоя, как правило, в 3–10 раз больше протяженности той же трещины в направ-

лении, перпендикулярном слою. Перпендикулярные слою трещины пересекают несколько слоев и заканчиваются на одной из границ раздела слоев, отчетливо выраженной механически. В некомпетентных породах толщи трещины значительно тоньше, чаще расположены и имеют разнообразную ориентировку. Наряду с ортогональными системами трещин имеются наклоненные к слою системы.

При наличии разрывов прогноз трещиноватости усложняется, а при отсутствии данных о месте разрыва, его длине и амплитуде становится практически невозможным. Зная параметры разрыва, можно сделать самые общие заключения о его трещинном оперении. Трещины у разрыва образуют пояс, ориентированный определенным образом относительно направления смещения крыльев (гл. 2 и 9), в зонах тектонического сжатия они закрыты и не могут давать заметных водопритоков. В зонах растяжения, у сбросов, раздвигов, сдвигов трещины открыты по крайней мере на глубинах до нескольких десятков и сотен метров. Трещины в компетентных породах и у разрывов всегда шире, чем в некомпетентных породах. Сеть трещин у разрывов всегда непрерывная и на периферии зоны оперения прерывистая.

Прогноз трещиноватости на глубинные части массива может быть более точно и даже количественно выполнен по материалам изучения трещин в неглубоких горных выработках и даже по изучению трещин на естественных обнажениях, всегда в той или иной мере измененных выветриванием. Количественный прогноз может быть основан на следующих фактах: установлено, что ориентировка основных систем трещин относительно слоев, осевых поверхностей складок и плоскостей разрывов не меняется с глубиной. Если известно положение слоев и разрывов на глубине, что устанавливается бурением и геофизическими методами, то можно указать направление основных систем и порядок частоты трещины, так как частота мало изменяется с глубиной и может быть установлена на свежих обнажениях или в горных выработках небольшой глубины (10–30 м).

Так же по измерениям, выполненным на поверхности, можно прогнозировать на глубину форму трещин, что важно для прогноза прочности массива. Пока не поддается количественному прогнозу ширина трещин — этот важнейший для определения водопроницаемости и деформируемости массива параметр сети. Трудность здесь особенно велика в связи с тем, что в практических задачах почти бесполезна средняя оценка трещинной пустотности, а необходимы по крайней мере средние оценки по системам, а по существу индивидуальные оценки ширины наиболее крупных трещин.

Пока нет достоверных данных о возможности прогноза на глубину средней длины трещин. Видимо, она, как и частота трещин, мало изменяется с глубиной. Доказательством этой гипотезы может служить функциональная связь длины и частоты трещин. Основываясь на этом, по измерениям длины трещин на поверхности можно предсказать порядок средней длины трещины на глубине. Но определить глубину проникновения в массив конкретной видимой трещины пока невозможно иначе, как путем проходки выработки вдоль трещины. К сожалению, необходимо признать, что нет метода решения этой актуальнейшей для прогноза устойчивости склонов и откосов задачи.

В регионально метаморфизованных толщах закономерности строения

сетей трещин тесно связаны с ориентировкой слоистости и сланцеватости. Если наблюдается стабильность этих руководящих характеристик структуры массива, то возможен качественный и приближенный количественный прогноз структуры сети трещин на глубину.

В магматических породах и особенно в зонах экзо- и эндоконтакта магматических тел сеть трещин построена значительно более сложно, так как здесь нет слоистости, которая на всех этапах геологической истории направляет развитие сети трещин осадочных пород. Сеть трещин даже в одном простейшем магматическом теле типа базальтового потока или гранитного батолита разнообразна (см. гл. 4 и 5). Она определена давно исчезнувшими напряжениями, ориентировка которых менялась во времени, и прочностью пород в момент остывания, а также различной скоростью остывания. Качественная прогнозная оценка трещиноватости магматических тел возможна на основе данных о механизме интрузии и ее фазах, о форме интрузивного или эффузивного тела, о расположении разрывных нарушений и направлений движений по ним, а также о характере современных напряжений в массиве. Поскольку достоверная характеристика массива по названным аспектам может быть получена только после детальных исследований, постольку применительно к интрузивным массивам можно говорить об интерполяции, но не об экстраполяции и прогнозировании трещиноватости.

Однако некоторые закономерности строения сетей трещин магматических пород установлены с достаточной надежностью, чтобы их можно было использовать для прогноза. Они рассмотрены в гл. 2, 4 и 5. Несомненно, что в зонах растяжения земной коры трещины магматических пород удерживаются открытыми до глубины в несколько десятков и сотен метров благодаря высокой прочности пород. Поэтому возможны сосредоточенные притоки в туннели из зон разломов. Известно, что эффузивные породы, в частности базальты, обладают иногда значительной пористостью и обычно большим раскрытием трещин. Этого нет в глубинных породах, в которых трещины, как правило, залечены. Поэтому водопроницаемость и водообильность базальтов может быть большой и сравнительно с глубинными породами однородной на больших площадях. Известно также, что граниты часто обладают трещинами протяженностью в несколько десятков метров, что приводит к крупным деформациям. Деформациям способствует значительная милонитизация и каолинизация гранитов в зонах разломов.

Таким образом, установленные к настоящему времени закономерности строения сетей трещин могут быть использованы для описания неисследованных участков массивов и построения гидрогеомеханических моделей, пригодных для расчета многих параметров массивов, существенных в инженерных задачах.

ЛИТЕРАТУРА

- ✓ *Авершин С.Г., Мосинец В.Н., Черепанов Г.П.* О природе горного удара. — ДАН СССР, 1972, т. 204, № 3, с. 569–571.
- ✓ *Алексеев Г.В.* Инженерно-геологические особенности древних интрузивных массивов основного и ультраосновного состава: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 1978. 25 с.
- Аронова Л.А., Чернышев С.Н.* Планирование фильтрационного опробования массивов горных пород. — В кн.: Материалы к науч.-техн. конф. ПНИИИС, 11 мая 1967 г. М., 1967, с. 21–23.
- Батоян В.В., Королев В.Н.* Гидрохимические аномалии над дизъюнктивными нарушениями в акватории Каспийского моря. — В кн.: Материалы 3-й науч. конф. аспирантов и молодых ученых. Сер. Гидрогеология. М.: МГУ, 1976, с. 36–44. Рукопись деп. в ВИНТИ 11.11.76, № 3944–76 деп.
- ✓ *Батулин С.А.* Статистическое изучение распределения трещиноватости в массиве горных пород. — В кн.: Проблемы механики горных пород. Алмата: Наука, 1966, с. 41–49.
- Баяраа Г.* Магодын газар хөддөлтийн голомтын механизм. — Эрмэм шинжилгээний бүтээл. Улаанбаатар, 1971, № 9, с. 68–73.
- Беликов Б.П.* О методе изучения трещинной тектоники строительного и облицовочного камня. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 40 с.
- Беликов Б.П.* Упругие константы породообразующих минералов и их влияние на упругость горных пород. — В кн.: Физико-механические свойства горных пород. М.: Наука, 1964, с. 118–132.
- Белицкий А.А.* К вопросу о механизме образования кливажных трещин. М.: Изд-во АН СССР, 1949. 49 с.
- Белоусов В.В.* Тектонические разрывы, их типы и механизм образования. Тр. Геофиз. ин-та АН СССР, 1952, № 17. 146 с.
- Белоусов В.В.* Основные вопросы геотектоники. М.: Госгеолитиздат, 1962. 607 с.
- Белый Л.Д.* О генетической классификации трещиноватости горных пород и месте сейсмических трещин в системе классификации. — В кн.: Сейсмическое микрорайонирование г. Махачкалы. Махачкала, 1970, с. 69–87.
- Белый Л.Д.* Классификация остаточных сейсмодформаций и сейсмогравитационных смещений. — Тр. МИСИ, 1974, сб. 111, с. 21–30.
- Белый Л.Д., Попов В.В.* Инженерная геология. М.: Стройиздат, 1975. 312 с.
- Биндеман Н.Н., Денисов Н.Я.* К оценке трещиноватости горных пород методом нагнетания в одиночные скважины. — Гидротехн. стр-во, 1974, № 12, с. 18–19.
- Богаченко Н.Н.* О характере распределения амплитуды разрывных тектонических нарушений на примере Селезневской синклинали. — Донбас. науч.-исслед. лаб. Мингео СССР, 1971, вып. 3, с. 29–38.
- Богданов А.А.* Зависимость интенсивности кливажа от мощности пласта. — Сов. геология, 1947, № 6, с. 32–41.
- Богданович К.И.* Материалы по геологии и полезным ископаемым Иркутской губернии. — В кн.: Геологические исследования и разведочные работы по линии Сибирской железной дороги. М., 1896, вып. 2. 284 с.
- Болк Р.* Структурные особенности изверженных горных пород. М.: Госгеолитиздат, 1946. 210 с.
- Болотина Н.М.* Инженерно-геологические условия строительства Усть-Илимской ГЭС. — Гидротехн. стр-во, 1970, № 8, с. 8–11.
- Бондарик Г.К.* Трещины донного отпора и зоны разгрузки в речных долинах. — Разведка и охрана недр, 1959, № 10, с. 42–46.
- Бондарик Г.К.* Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. М.: Недра, 1971, с. 49–52.
- Будько В.М.* К методике определения направления относительного перемещения крыльев разрывов. — Науч. докл. высш. школы. Горное дело, 1958, № 3, с. 96–102.
- Букринский В.А.* Исследование связи трещиноватости горных пород с разрыв-

ными структурами горного массива. - В кн.: Проблемы инженерной геологии. М.: Изд-во МГУ, 1970, с. 327-332.

Варга А.А. Некоторые вопросы применения метода симметрии к инженерно-геологическому изучению трещиноватости. - Инж. геология, 1980, № 3, с. 88-97.

Вейль Г. Симметрия. М.: Наука, 1968. 191 с.

Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1964. 264 с.

Вистелиус А.Б. Структурные диаграммы. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 165 с.

Вознесенский А.В. Исследование области Хангайских землетрясений 1905 года в Северной Монголии. Л.: Геогр. о-во СССР, 1962. 70 с.

Вольфсон Ф.И. Некоторые вопросы трещиной тектоники. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 66 с.

Газиев Э.Г. Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления. М.: Стройиздат, 1977. 160 с.

Газиев Э.Г., Тиден Е.Н. Определение параметров систем трещин вероятностным методом. Инж. геология, 1980, № 4, с. 99-105.

Гейтнер Т.М. Моделирование трещин скальвания в условиях больших деформаций. - Вестн. МГУ, Сер. 4, Геология, 1970, № 4, с. 81-89.

Гершинг Б.М., Литов Ю.Н., Лопушняк А.Г. Исследование процесса залечивания одиночной трещины в глинистой породе при фильтрации воды. В кн.: Гидрогеология и охрана недр при разработке соляных месторождений. Л.: ВНИИГ, 1966, с. 77-86.

Гзовский М.В. Физическая теория образования тектонических разрывов. - В кн.: Проблемы тектонофизики. М.: Госгеолтехиздат, 1960, с. 78-96.

Гзовский М.В. Перспективы тектонофизики. В кн.: Деформация пород и тектоника. Докл. сов. геологов к 22-й сессии МГК. М.: Наука, 1964, с. 128-147.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 535 с.

Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. /Под ред. Б.Н. Веригина. М.: Недра, 1977. 296 с.

Голодковская Г.А., Шаумян Л.В. Влияние тектонической трещиноватости на свойства и состояние массивов скальных пород. - В кн.: Влияние геологических факторов на свойства и состояние массивов скальных пород. Апатиты, 1975, с. 53-60.

Гончаров М.А. О связи кливажа с складкообразованием. - Бюл. МОИП. Отд. геол., 1963, т. 38(4), с. 22-41.

Горбушина Л.В., Рябоштан Ю.С. Картирование зон современных тектонических движений с помощью радиометрии. - Изв. вузов. Геология и разведка, 1974, № 6, с. 176-178.

Гринбаум И.И. Расходомерия гидрогеологических и инженерно-геологических скважин. М.: Недра, 1975. 271 с.

Гуламов М.Р. Генезис нормальной к слою трещиноватости в складчатой толще карбона хребта Малый Каратау. Изв. АН КазССР. Сер. геол., 1975, № 2, с. 62-70.

Дедова Е.В. Остаточные деформации при сильных землетрясениях. - В кн.: Колебания земляных плотин. М.: Наука, 1967, с. 114-122.

Джегер Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения. М.: Мир, 1975. 255 с.

Достовалов Б.Н. Некоторые закономерности температурного и диагенетического растрескивания пород и образование полигональных отделиностей и структур. - В кн.: Тр. 2-го совещ. по подземным водам и инж. геологии Вост. Сибири. Иркутск: Кн. изд-во, 1959, вып. 2, с. 33-43.

Егоров А.Я. Опыт применения углекислого газа при трассировании локальных разрывных тектонических нарушений в центральной части Молдавии. Экспресс-информация ВИЭМС. Гидрогеология и инж. геология. М., 1981, вып. 6, с. 6-10.

Елисеев Н.А. Структурная петрология. Л.: Изд-во ЛГУ, 1953. 310 с.

Жиленков В.Н. Руководство по методике определения фильтрационно-суффозионных свойств скальных оснований гидротехнических сооружений. Л.: Энергия, 1975. 75 с.

Зеленский Б.Д. О методе учета влияния трещиноватости на деформационные свойства скальных массивов. - Тр. Ленингр. инж.-экон. ин-та им. П. Тольятти, 1967, вып. 68, с. 62-70.

Золотарев Г.С. Кора выветривания архейских пород Цейлона и ее инженерно-геологическое значение. - Изв. вузов. Геология и разведка, 1962, № 2, с. 61-70.

Золотарев Г.С., Калицин Э.В., Минервин А.В. Учебное пособие по инженерной геологии. М.: Изд-во МГУ, 1970. 282 с.

Иванова Н.Б., Чернышев С.Н. Обработка на ЭВМ массовых измерений па-

раметров трещиноватости. - Тр. ПНИИИС, 1974, вып. 26, с. 186-193.

Ильин Н.И., Чернышев С.Н. Экспериментальное рассеяние радиоактивного индикатора в одиночной трещине. - В кн.: Радиоизотопные методы исследований в гидрогеологии. Киев: Наук. думка, 1975, с. 122-125.

Инженерно-геологические исследования при разведке месторождений полезных ископаемых /Под ред. Г.А. Голодковской. М.: Изд-во МГУ, 1975. с. 187.

Иностранцев А.А. Геология. СПб, 1905. Т. 1. 476 с.

Исследования связи параметров землетрясений и сейсмодислокаций с помощью уравнений ортогональной регрессии. - Тр. ПНИИИС. М., 1975, вып. 39, с. 21-45.

Калачева В.Н. Некоторые данные о развитии тектонической трещиноватости горных пород на глубине. - Тр. ВНИГРИ, 1970, вып. 290, с. 106-121.

Канаев Ф.С. Роль трещиноватости пород при производстве взрывных работ в гидротехническом строительстве. М.: Информэнерго, 1972. 32 с.

Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Л.; М.: Стройиздат, 1966, с. 5-160.

Крапышев Е.С. Руководство по определению водопроницаемости скальных пород методом нагнетания воды в скважины. М.: Энергия, 1978. 48 с.

Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 238 с.

Кириллова Н.В. Некоторые вопросы механизма складкообразования. - Тр. ГЕОФИАН, 1949, № 6, с. 3-91.

Кноринг А.В. Математические методы при изучении механизма образования тектонической трещиноватости. Л.: Недра, 1969, с. 3-84.

Количко А.В. Опыт оценки блочности трещиноватого массива скальных пород. - Тр. Гидропроекта, 1966, вып. 14, с. 122-128.

Количко А.В. Оценка оптимальных параметров скальных откосов в трещиноватых скальных породах. - В кн.: Инженерная геология скальных массивов. М.: Наука, 1976, с. 122-126.

Количко А.В. О возможности прогнозирования величин современных перемещений по тектоническим разломам. - Тр. Гидропроекта, 1981, вып. 76, с. 24-30.

Количко А.В., Рац М.В. Трещиноватость осадочных пород района Токтогульской ГЭС и ее влияние на инже-

нерно-геологические условия строительства. - Тр. Гидропроекта, 1966, вып. 14, с. 104-122.

Количко А.В., Чернышев С.Н. К методике опытных нагнетаний и наливов воды в скважины. - В кн.: Проектирование и создание противофильтрационных устройств в основании высоких плотин. М.: Стройиздат, 1972, с. 20-26.

Коломогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения частиц при дроблении. - ДАН СССР, 1941, т. 32, № 2, с. 542-546.

Коломенский Н.В. Методические указания по изучению процессов выветривания горных пород для инженерно-геологических целей. М.: Госгеолтехиздат, 1952. 70 с.

Коярова Л.П., Нейштадт Л.И. Инженерно-геологические условия строительства плотин на изверженных горных породах. - В кн.: Геология и плотины. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963, т. III, с. 9-73.

Королев А.В. Методы изучения мелкой трещиноватости горных пород. - Тр. Ин-та геол. наук АН УзССР. Ташкент, 1951, вып. 6, с. 166-193.

Королев А.В. Структура рудных полей и месторождений. Ташкент: Средняя и высшая школа, 1962. 148 с.

Короновский Н.В. Столбчатая отдельность в изверженных горных породах. - Вестн. МГУ, 1968, № 3, с. 91-104.

Костров Б.В. Механизм очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 167 с.

Косыгин Ю.А. Тектоника нефтеносных областей. М.: Гостоптехиздат, 1958, т. 1, с. 119.

Косыгин Ю.А. Основы тектоники. М.: Недра, 1974. 213 с.

Косыгин Ю.А., Лучицкий И.В., Розанов Ю.А. Эксперименты деформации гипса и их геологическое значение. - Бюл. МОИП. Отд. геол., 1949, № 2, с. 13-19.

Красилова Н.С. Анализ характера трещиноватости скальных пород при мелкомасштабной инженерно-геологической съемке. - Инж. геология, 1979, № 4, с. 38-46.

Крейтер В.М. Структура рудных полей и месторождений. М.: ГОНТИ, 1956. 272 с.

Кригер Н.И. Трещиноватость и метод ее изучения при гидрогеологической съемке. М.: Металлургиздат, 1951. 152 с.

Кригер Н.И., Преображенский В.П. О несущей способности скальных грунтов и устойчивости скальных откосов. В

кн.: Материалы по инженерной геологии. М.: Металлургиздат, 1953, вып. 4, с. 65–96.

Кузнецов Ю.А. Главные типы магматических формаций. М.: Недра, 1964. 387 с.

Кушнарв И.П., Лукин Л.Н. Об изучении трещинной тектоники. – В кн.: Проблемы тектонофизики. М.: Госгеол-издат, 1960, с. 99–110.

Лебедев А.П. Трапповая формация центральной части Тунгусского бассейна. – Тр. ГИН. Сер. петрогр., 1955, вып. 161. 196 с.

Левинсон-Лессинг Ф.Ю. Петрография. М.: Госгеол-издат, 1940. 524 с.

Ломизе Г.М. Филътрация в трещиноватых породах. М.: Госэнергиздат, 1951. 127 с.

Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л.: Недра, 1970. 527 с.

Лукин Л.И., Кушнарв И.П., Чернышев В.Ф. О повторяемости направлений разновозрастных систем трещин. Тр. Ин-та геол. наук АН СССР, 1955, вып. 162, с. 25–35.

Лыкошин А.Г. Трещины бортового отпора. – Бюл. МОИП, 1953, т. 28, № 4, с. 53–70.

Ляховицкий Ф.М., Моргуи И.П., Чертков Л.Г. Опыт картирования трещиноватых зон сейсморазведкой МПВ при инженерно-геологических исследованиях в условиях большого города. – Инж. геология, 1981, № 5, с. 102–106.

Мазаник В.Н., Макаров В.Н. Трещиноватость скальных пород восточного рудного узла Печенги и ее влияние на горные работы. – В кн.: Пути повышения эффективности открытых горных работ. Л.: Наука, 1970, с. 84–92.

Мартынов В.Т., Волярвч А.Г. Геологическая фотодокументация подземных горных выработок. М.: Недра, 1969. 85 с.

Маслов Н.Н. Инженерная геология: основы геотехники. М.; Л.: Госстройиздат, 1941. 431 с.

Маслов Н.Н., Котов М.Ф. Инженерная геология. М.: Стройиздат, 1971. 236 с.

Маслов Н.Н., Максимов С.Н. Инструкция по инженерно-геологическим исследованиям для сооружения малых плотин. М.; Л.: Госгеол-издат, 1945. 40 с.

Материалы по тектонической терминологии. Новосибирск, 1964. Ч. 3. 255 с. (Тр. Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР; Вып. 34).

Методика изучения трещиноватости

горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа. /Под ред. Е.М. Смехова. Л.: Недра, 1969. 129 с. (Тр. ВНИГРИ; Вып. 276).

Миндель И.Г., Голубков А.П. О выделении близлежащих к поверхности разрывных дислокаций по данным дифрагированных волн. – В кн.: Сейсмическое районирование и инженерно-геологическая съемка. Тр. ПНИИИС, 1974, вып. 30, с. 88–98.

Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. М.: Недра, 1974. 295 с.

Михайлов А.Е. Полевые методы изучения трещин в горных породах. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 132 с.

Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясения. М.: Наука, 1978. 232 с.

Мюллер Л. Механика скальных массивов. М.: Мир, 1971. 254 с.

Невский В.А. Трещинная тектоника рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1979. 223 с.

Нейштадт Л.И. Методы геологического изучения трещиноватости горных пород при инженерно-геологических исследованиях. М.: Госэнергиздат, 1957. 103 с.

Новикова А.С. О трещиноватости горных пород восточной части Русской платформы. – Изв. АН СССР. Сер. геол., 1951, № 5, с. 68–85.

Овчинников А.М. К методике изучения трещиноватости. – Разведка недр, 1938, № 4/5, с. 32–41.

Оценка точности определения водопроницаемости горных пород /Н.И. Ильин, С.Н. Чернышев, Е.С. Дзекер, В.С. Зильберг. М.: Наука, 1971, с. 116–133.

Павлова Н.Н. Трещиноватость и разрушение горных пород. М.: Наука, 1970, с. 7–15.

Панюков П.Н. Инженерная геология. М.: Геотехиздат, 1962. 342 с.

Пашкин Е.М. Роль трещиноватости в формировании инженерно-геологических условий строительства гидротехнических туннелей: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: МГРИ, 1968. 18 с.

Пашкин Е.М. Инженерно-геологические исследования при строительстве туннелей. М.: Недра, 1981. 135 с.

Пейве А.В. Принцип унаследованности в тектонике. – Изв. АН СССР. Сер. геол., 1956, № 6, с. 11–19.

Пейве А.В. Горизонтальные движения земной коры и принцип унаследованности. – Геотектоника, 1965, № 1, с. 30–37.

Погребиский М.И. Исследование тектонической трещиноватости горных пород района верхнего и среднего течения р. Вахш и оценка некоторых инженерно-геологических свойств трещиноватых массивов на участках крупных гидроузлов: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: ПНИИИС, 1969, 16 с.

Погребиский М.И., Рац М.В., Чернышев С.Н. О зависимости густоты трещин от расстояния до разрыва. – ДАН СССР, 1971, т. 201, № 4, с. 927–930.

Погребиский М.И., Чернышев С.Н. Трещины оперения сейсмогенных сдвигов. – ДАН СССР, 1974, т. 218, № 5, с. 1171–1174.

Полканов А.А. Генетическая система интрузий платформы кратогена. – Изв. АН СССР. Сер. геол., 1946, № 6, с. 5–29.

Приклонский В.А. Грунтоведение. М.: Госгеол-издат, 1952, т. II. 371 с.

Протодьяконов М.М., Цирков Е.С. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. М.: Наука, 1964. 77 с.

Прочухан Д.П. Трещины разгрузки в скальных основаниях высоких плотин. – Сов. геология, 1964, № 7, с. 74–83.

Пэк А.В. Трещинная тектоника и структурный анализ. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1939. 152 с.

Рац М.В. К вопросу о зависимости густоты трещин от мощности слоев. – ДАН СССР, 1962, т. 114, вып. 3, с. 622–626.

Рац М.В. Статистико-генетический метод изучения трещиноватости. – Бюл. МОИП, Отд. геол., 1963а, № 6, с. 54–63.

Рац М.В. Трещиноватость песчаников селетинской терригенно-флишевой формации. – Тр. Гидропроекта, 1963б, сб. 9, с. 137–158.

Рац М.В. К проблеме механизма роста разрывов и их связи с землетрясениями. – Бюл. МОИП. Отд. геол., 1965, № 6, с. 136–137.

Рац М.В. К трещинной тектонике района строительства Нурекской ГЭС. – Тр. Гидропроекта, 1966, вып. 14, с. 129–139.

Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 160 с.

Рибрик Б.М., Чернышев С.Н. Соотношение точности измерений с неоднородностью среды и требованиями расчетной схемы. – В кн.: Математические методы в инженерной геологии. М.: МОИП, 1968, с. 121–125.

Рекомендации по изучению морфологии поверхности трещин в скальных по-

родах в полевых и лабораторных условиях. Л.: ВНИИГ, 1980. 86 с.

Риффо К., Ле Пишон К. Экспедиция "FAMOUS". Л.: Гидрометеоздат, 1979. 222 с.

Ромм Е.С. Исследование филътрации в трещиноватых породах в связи с их коллекторскими свойствами. – Тр. ВНИГРИ, Л., 1958, вып. 121, с. 60–74.

Ромм Е.С. Филътрационные свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1966. 282 с.

Руководство по расчету коэффициента филътрации трещиноватых скальных массивов по параметрам трещин. М.: Стройиздат, 1979. 60 с.

Руппенейт К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1975. 222 с.

Саваренский Ф.П. Инженерная геология. М.: ОНТИ, 1937. 422 с.

Сейсмическое районирование в Северной Монголии. М.: Наука, 1980. 179 с.

Сейсмическое районирование Улан-Батора /Под ред. С.В. Медведева. М.: Наука, 1971. 285 с.

Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М.: Недра, 1969. 238 с.

Сергеев Е.М. О будущем инженерной геологии. – Вестн. МГУ, 1974, №1, с. 7–15.

Скарятин В.Д. Классификация трещин и применение аэрофотосъемки и некоторых других методов при изучении трещиноватости горных пород. – Тр. 2-го Всесоюз. совещ. по трещинным коллекторам нефти и газа. М.: Недра, 1965, с. 5–14.

Скворцов Г.Г., Фромм В.В. Инженерно-геологическое изучение глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых при разведке. М.: Недра, 1970. 110 с.

Солоненко В.П. Определение эпицентровальных зон землетрясений по геологическим признакам. – Изв. АН СССР. Сер. геол., 1962, № 11, с. 58–74.

Солоненко В.П. Палеосейсмогеология. – Изв. АН СССР. Физика Земли, 1973, № 9, с. 72–85.

Соколов Д.С. Инженерно-геологическая съемка при гидротехническом строительстве. М.: Госэнергиздат, 1947. 64 с.

Соколов Д.С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.

Соколов Н.И. О типах смещения скальных трещиноватых пород на склонах. – Тр. Лаб. гидрогеол. пробл., 1961, вып. 35, с. 25–38.

Сорокин А.А., Бадухин В.Н., Шпаковский Ф.В. Метод воздушного определения трещиноватости скальных пород. — В кн.: Тез. докл. и сообщ. 4-й конф. изыскателей ин-та "Гидропроект" по обмену опытом для гидротехн. стр-ва. Секция инж. геологии, 1972, вып. 2, с. 48–50.

Справочник (кадастр) физических свойств горных пород (Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодьяконова. М.: Недра, 1975. 277 с.

Стоянов С.С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 112 с.

Тархов А.Г. К вопросу об анизотропии упругих свойств в горных породах. — Материалы ВСЕГЕИ. Общ. сер., 1940, сб. 5, с. 209–222.

Тер-Степанян Г.И., Аракелян А.П. О наложении трещиноватости в базальтовых лавовых покровах. — В кн.: Влияние геологических факторов на свойства и состояние массивов скальных пород. Апатиты, 1975, с. 141–145.

Тетяев М.М. Тектоника рудных полей жильного типа. — Сов. геология, 1940, № 8, 9, с. 16–24.

Тиздель Р.Р. Братская плотина на р. Ангаре. — В кн.: Геология и плотины. М.: Госэнергоиздат, 1962, т. 2, с. 22–45.

Тиздель Р.Р. Осадка скального основания Братской ГЭС. — Гидротехн. стр-во, 1963, № 9, с. 18–19.

Ткачук Э.И. Применение методов корреляционного анализа в процессе инженерно-геологических исследований магматических скальных пород: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Л.: Ленингр. горн. ин-т, 1967. 20 с.

Толоконников И.С. Трещиноватость и проницаемость лав Армении. — Тр. Гидропроекта, 1966, вып. 14, с. 150–179.

Точность измерения параметров трещин в горных породах. — Тр. ПНИИИС, 1975, вып. 39, с. 80–99.

Ухов С.Б. Скальные основания гидротехнических сооружений. М.: Энергия, 1975. 262 с.

Фамицын Б.И., Федоренко В.С. Стереофотограмметрические способы количественной характеристики трещиноватости скальных пород в откосах глубоких строительных котлованов, карьерах и подземных горных выработках. — В кн.: Вопросы инженерной геологии при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений, шахт и карьеров. Л.: Геогр. о-во СССР, 1970, вып. 2, с. 135–138.

Феокистов Г.Д. Петрография траппов бассейна среднего течения р. Ангары. Иркутск: Кн. изд-во, 1961. 142 с.

Фисенко Г.Л. Прочностные характеристики массива горных пород. — В кн.: Механика горных пород и маркшейдерское дело. М.: Углетехиздат, 1959, с. 91–100.

Флоренсов Н.А. Неотектоника и сейсмичность Монголо-Байкальской горной области. — Геология и геофизика, 1960, № 1, с. 24–36.

Формы геологических тел: Терминологический справочник. М.: Недра, 1977. 245 с.

Черепанов Г.Л. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

Черепанов Г.Л. О развитии трещин в сжатых телах. — ПММ, 1966, т. 30, № 1, с. 83–93.

Чернышев С.Н. Экзогенные деформации траппов в долине р. Ангары. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1965, № 12, с. 78–85.

Чернышев С.Н. Исследование трещиноватости и водопроницаемости интрузивных массивов с применением методов математической статистики: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: ПНИИИС, 1966. 21 с.

Чернышев С.Н. Комплексная оценка свойств скального массива расчетным путем. — Тр. ПНИИИС, 1974, вып. 26, с. 153–163.

Чернышев С.Н. Уравнения связи между интенсивностью землетрясений и параметрами сейсмодислокаций. — Бюл. МОИП. Отв. геол., 1974, № 1, с. 160.

Чернышев С.Н. Структура трещиноватости и свойства скальных массивов: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 1978. 38 с.

Чернышев С.Н. Движение воды по стням терцин. М.: Недра, 1979. 140 с.

Шафрановский И.И. Симметрия в природе. М.: Недра, 1968, 184 с.

Шестаков В.М. К теории динамики сорбции при фильтрации в зернистых средах. — ЖФХ, 1961, т. 35, № 10, с. 2358–2362.

Штини И., Мушкетов Д.И. Техническая геология. М.: Госнефтьиздат, 1934, 256 с.

Шульц С.С. Планетарные трещины. — Геотектоника, 1971, № 3, с. 18–34.

Эйдельман С.Я. Натурные исследования плотины Братской ГЭС. Л.: Энергия, 1968. 174 с.

Юшкин Н.П. Механические свойства минералов. Л.: Наука, 1971. 282 с.

Яншин А.Л. Взгляды А.Д. Архангельского на тектонический характер юго-восточного обрамления Русской платформы и современные представления по этому вопросу. — В кн.: Вопросы литологии и стратиграфии СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1951, с. 253–327.

Ярема С.Я., Панасюк В.В., Попович В.В. Метод испытания металлов на циклическую трещиностойкость: Препр. Физ.-мех. ин-та АН УССР. Львов, 1978. 54 с.

Adler R., Fencel N., Pelger A. Schmidtsche Netz und seine Anwendung in Bericht des makroskopischen Gefüges. Clausthal. tekton. Hefte., 1961, H. 4, S. 102–116.

Adler R.E., Krückeberg F., Pfisterer W. et al. Elektronische Datenverarbeitung in der Tektonik. — Clausthal. tekton. Hefte, 1969, H. 8.

Burger H.R., Thompson M.D. Fracture analysis of the Carmichael peak anticline, Madison Country, Montana. — Bull. Geol. Soc. Amer., 1970, vol. 81, N 6, p. 1831–1835.

Cailteux A. Etude quantitative de failles. — Rev. géomorphol. dyn., 1958, vol. 9, N 9/10, p. 129–146.

Cloos H. Der Mechanismus tiefvulkanischer Vorgänge. Braunschweig: Fridr. Vieweg und Sohn, 1921. 95 S.

Computer Einsatz in der Geologie. — Clausthal. tekton. Hefte, 1970, H. 10, S. 1–150.

Gruneisen P., Hirlemann G., Janot P., Ruhland M. Analyse de la fracturation naturelle d'une structure plissée: l'anticlinal de la Lance (Drôme). — Sci. geol. Bull., 1973, vol. 26, N 2/3, p. 161–186.

Hattori I., Mizutani S. Computer simulation of fracturing of layered rock. — Eng. Geol., 1971, vol. 5, N 4, p. 253–269.

Hill P.A. Curvilinear and concentric jointing in Yurassic dolerite Mersey Bluff, Tasmania. — J. Geol., 1965, vol. 73, N 2, p. 255–271.

Iida K. Earthquake energy and earthquake fault. Nagoya. 1959.

John K.W. Festigkeit und Verformbarkeit von druckfesten, regelmäßig gefügten Diskontinuen. — Veröff. Univ. Fridericiana in Karlsruhe, 1969, H. 37, S. 1–140.

Kiestinger A. Restspannung und Entspannung im Gestein. — Geol. und Bauwesen, 1958, Bd. 24, N 2, S. 95–112.

Ketin J., Roesli F. Makroseismische Untersuchungen über das nordwestanatolische Beben von 18. März 1953. — Ecol. geol. helv., 1953, vol. 47, N 2, p. 50–64.

Louis C. Etude des écoulements, d'eau dans les roches fissurées et de leurs influences sur la stabilité des massifs rocheux. — Bull. Dir. étud. et rech. A, 1968, N 3, p. 5–132.

Macovec F. Das Ausmass der Felsauflockerung bei Sprengarbeiten. — Geol. und Bauwesen, 1962, Bd. 28, N 1, S. 58–62.

McQuillan H. Fracture patterns on Kuh-e Asmari anticline, South-west Iran. — Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 1974, vol. 58, N 2, p. 236–246.

Moore J.F. Mapping major joints in the Lower Oxford clay using terrestrial photogrammetry. — Quart. J. Eng. Geol., 1974, N 1, p. 57–67.

Müller K.E. Zur Definition des Durchtrennungsgrades. — Rock Mech., 1974, Suppl. 3, S. 17–19.

Müller L. Über die Entstehung oberflächenparalleler Klüfte. — Geol. und Bauwesen, 1961, Bd. 27, H. 3/4, S. 146–152.

Preuss H.D. Numerisch-photogrammetrische Klüftmessung. — Rock Mech., 1974, Suppl. 3, S. 5–15.

Ronca L.B., Chaivre K.R. Errors in measurement of oblique and vertical joints. — Mod. Geol., 1977, vol. 6, N 2, p. 61–65.

Richey Y.E. Granite. — Water Power, 1963, N 6, p. 3–12.

Richter H.Oh., Molek H., Reuter F. Methodische Probleme bei der Ermittlung strukturgeologischer Parameter im Fels. — Ztschs. angew. Geol., 1976, H. 5, S. 237–243.

Ruxton B.R., Berry L. Weathering of granite and associated erosional features in Hongkong. — Bull. Geol. Soc. Amer., 1957, vol. 68, N 10, p. 1263–1292.

Sarder Br. Einführung in die Gefügekunde. Wien: Springer-Verl., 1948. 375 S.

Smally I.I. Contraction crack networks in basalt flow. — Geol. Mag., 1966, vol. 103, N 2, p. 110–114.

Snow D. A parallel plate model of fractured permeable media: Diss. Doct. of Philos. en Eng. Science. Berkeley: Univ. of California, 1965. 230 p.

Snow D.T. Anisotropic permeability of fractured media. — Water Resour. Res., 1969, N 5(6), p. 1973.

Tchalenko J.S. Similarities between shear zones of different magnitudes. — Bull. Geol. Soc. Amer., 1970, vol. 81, N 6, p. 1625–1640.

Terzaghi K. Erdbaumechanik. Wien: Deuticke, 1925. 403 S.

Terzaghi K. Dam foundation on sheeted granite. — Geotechnique, 1962, vol. 12, N 3, p. 199–208.

Thamm N. Klüftung. — Bild Wiss., 1972, Bd. 9, N 8, S. 795–799.

Tocher D. Earthquake energy and ground breakage. — Bull. Seism. Soc. Amer., 1958, vol. 48, N 2, p. 147–153.

Vieten V. Die Ermittlung tektonischer Gefügedaten aus stereofotogrammetrischen Bruch Wandaufnahmen. — Clausthal. tekton. Hefte, 1970, N. 10, S. 316–328.

Walsh J.B. The Effect of Cracks on the Uniaxial Compression of Rocks. —

J. Geophys. Res., 1965, vol. 70, N 2, p. 381–411.

Wittke W. Verfahren zur Standsicherheitsberechnung Scharen, auf ebenen Flächen gelagerter Körper und die Anwendung der Ergebnisse auf die Standsicherheitsberechnungen von Felsböschungen. — Veröff. Inst. Bodenmech. und Grundbfu der Techn. Hochschule Fridericiana. Karlsruhe, 1965. N. 20. 245 S.

Wittke W. Three-Dimensional Percolation of Fissured Rocks. Planning open pit mines. — In: Proc. of the Sympos. on the theoretical Background to the planning of Open Pit Mines with special reference to Slope Stability. Johannesburg, 1970, p. 78–86.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5

Часть I

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ ТРЕЩИН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Глава 1. Терминология и классификации	11
§ 1.1. Трещины, сеть трещин и другие понятия	11
§ 1.2. Структура трещин и сети трещин	15
§ 1.3. Размеры трещин	23
§ 1.4. Степень трещиноватости массива	27
§ 1.5. Заполнение трещин	31
§ 1.6. Генетические классификации трещин	34
Глава 2. Основные генетические типы трещин в горных породах	38
§ 2.1. Геологические факторы, определяющие трещиноватость горных пород	38
§ 2.2. Первичные трещины	40
§ 2.3. Тектонические трещины	45
§ 2.4. Гипергенные трещины	60
§ 2.5. Симметрия сетей трещин в зависимости от генезиса	65
§ 2.6. Кливаж	69
Глава 3. Развитие трещин и их сетей в горных породах	71
§ 3.1. Унаследованное развитие тектонических структур	71
§ 3.2. Форма трещины и ее преобразование при тектонических движениях	74
§ 3.3. Статистическое описание системы трещин	77
§ 3.4. Унаследованное развитие трещин и их систем	87
§ 3.5. Возникновение порядков неоднородности в сети трещин	95
§ 3.6. Новообразование систем трещин в массиве горных пород	98
§ 3.7. Основные черты строения и стадии развития сетей трещин	107
Глава 4. Особенности трещиноватости магматических горных пород основного состава	110
§ 4.1. Трещины базальтов	111
§ 4.2. Трещины пород трапповой формации	115
§ 4.3. Трещины габбро	119
§ 4.4. Трещины Толстомысовского траппового силла	124

Часть II

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СЕТЕЙ ТРЕЩИН ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МАКРОСТРУКТУРЫ МАССИВА

Глава 5. Полевые измерения параметров трещин	141
§ 5.1. Цели и методы исследования трещин	141
§ 5.2. Геологическая крупномасштабная съемка сетей трещин	142
§ 5.3. Точность измерения параметров трещин при полевых геологических исследованиях	147
Глава 6. Камеральная обработка полевых измерений параметров трещин	155
§ 6.1. Методы графической обработки измерений одномерных параметров	155
§ 6.2. Проекция сферической координатной сетки, применяемые для построения структурных диаграмм	160

§ 6.3. Изображение прямой линии и плоскости на круговой диаграмме, построение диаграммы	163
§ 6.4. Обработка результатов измерений с помощью ЭВМ	166
Глава 7. Косвенные методы оценки трещиноватости	172
§ 7.1. Геофизические методы	173
§ 7.2. Другие косвенные методы	179

Часть III

РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О СТРУКТУРЕ СЕТИ ТРЕЩИН

Глава 8. Определение положения складок и разрывов по ориентировке тектонических трещин	185
§ 8.1. Метод поясов	185
§ 8.2. Метод вращения	188
Глава 9. Трещины и разрывы как показатель параметров прошлых землетрясений	193
§ 9.1. Многомерные регрессионные уравнения связи размеров максимальной сейсмодислокации с интенсивностью и магнитудой землетрясения	193
§ 9.2. Использование уравнений регрессии для реконструкции интенсивности и магнитуды землетрясений района ГОКа Эрдент в Монголии	199
§ 9.3. Реконструкция положения осей главных нормальных напряжений в эпицентре землетрясения	203
Глава 10. Определение коэффициента фильтрации и модуля деформации массива по параметрам трещин	208
§ 10.1. Определение коэффициента фильтрации	208
§ 10.2. Расчет модуля деформации скального массива	213
§ 10.3. Влияние минералогического состава горной породы на площадь скального контакта стенок трещины	223
Заключение	225
Литература	231

Сергей Николаевич Чернышев

ТРЕЩИНЫ ГОРНЫХ ПОРОД

*Утверждено к печати
Научным советом по инженерной геологии и гидрогеологии
Академии наук СССР*

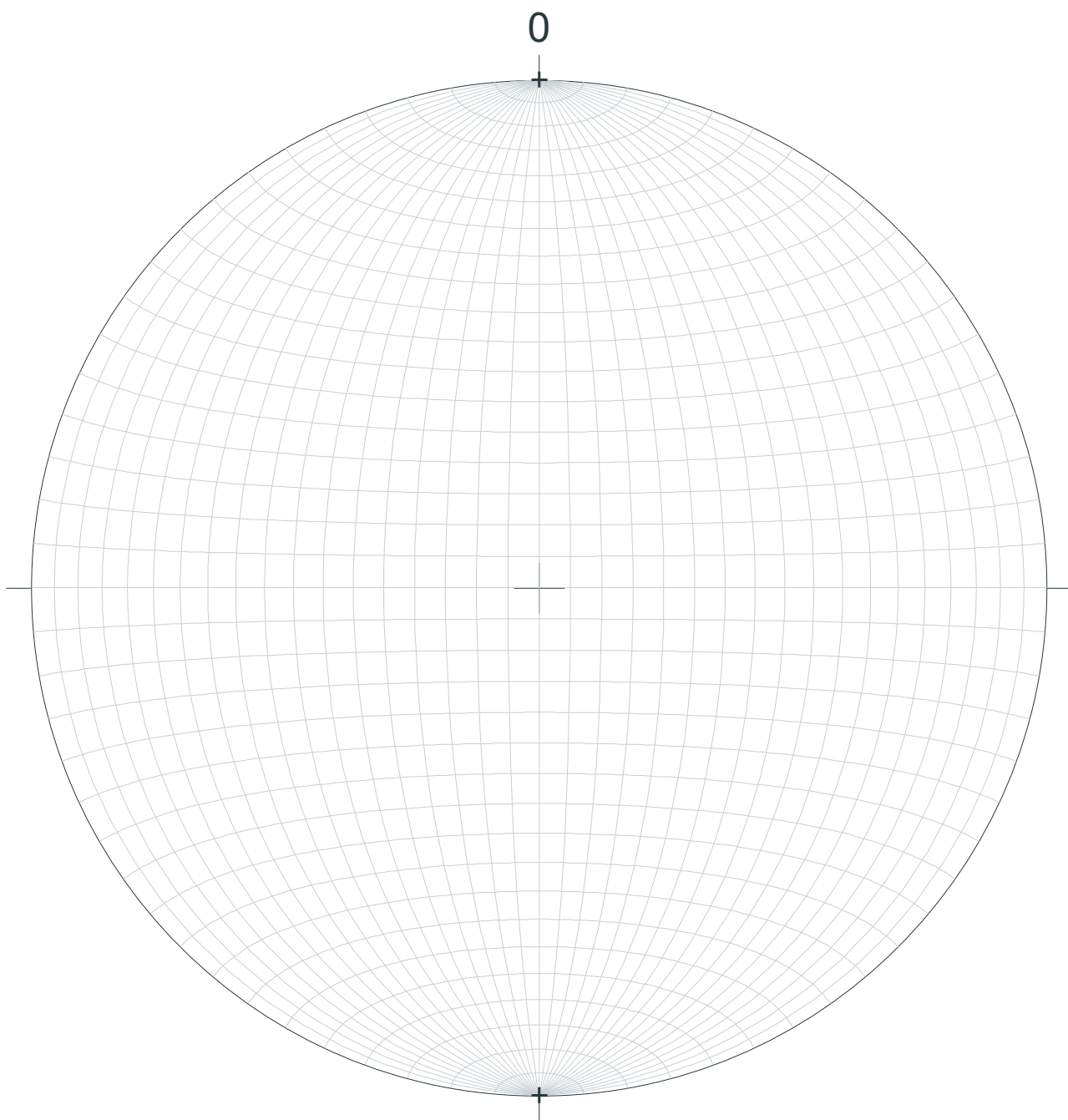
Редактор А.М. Гладкова. Художник Е.Н. Волков
Художественный редактор С.А. Литвак. Технический редактор Н.М. Бурова
Корректор Л.А. Агеева

ИБ № 27420

Подписано к печати 25.03.83. Т — 04591. Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная № 1
Печать офсетная. Усл.печ.л. 15,0 + 0,3 вкл. Усл.кр.-отт. 15,6. Уч.-изд.л. 19,1
Тираж 1200 экз. Тип.зак. 186. Цена 2 р. 90 к.

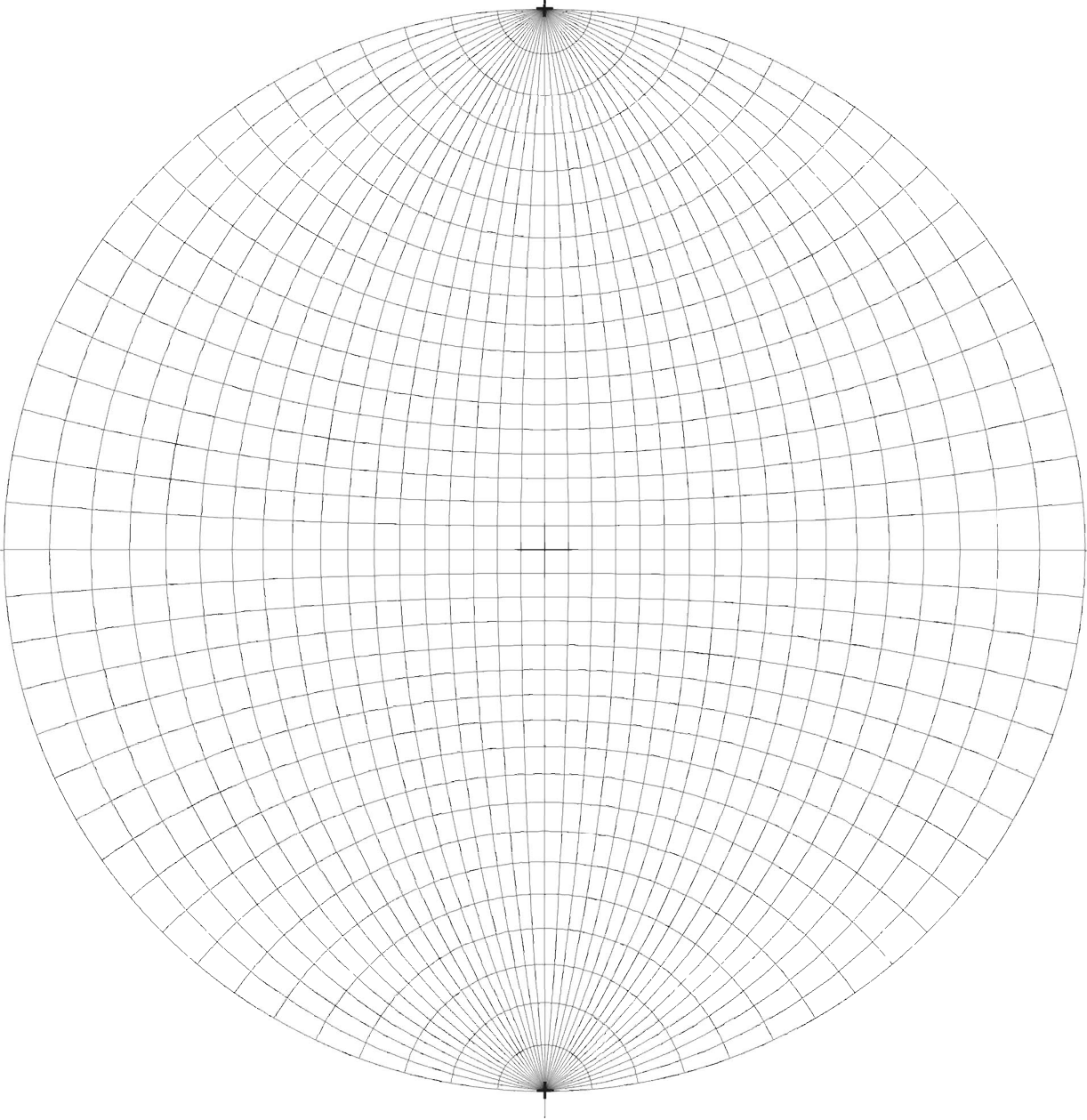
Издательство "Наука", 117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., д. 90
Ордена Трудового Красного Знамени 1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12

Приложение 1



Экваториальная сетка равноплощадной проекции (сетка Шмидта)

0



Экваториальная сетка равноугольной проекции (сетка Вульфа)