



М. В. РАЦ, С. Н. ЧЕРНЫШЕВ

ТРЕЩИНОВАТОСТЬ И СВОЙСТВА ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

М. В. РАЦ, С. Н. ЧЕРНЫШЕВ

ТРЕЩИНОВАТОСТЬ
И СВОЙСТВА
ТРЕЩИНОВАТЫХ
ГОРНЫХ ПОРОД



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва, 1970

Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. Рац М. В., Чернышев С. Н. Изд-во «Недра», 1970, стр. 164.

Монография состоит из двух частей. В первой части на основе собственных исследований авторов и обобщения отечественной и зарубежной литературы дается систематическое описание механизма образования, морфологии, геометрии и геологических закономерностей развития основных типов трещин в горных породах. Вторая часть книги посвящена вопросам построения моделей сети трещин, их применению для оценки инженерно-геологических свойств массивов горных пород и условий строительства крупных наземных и подземных сооружений, а также методике полевого изучения трещиноватости. Анализ ведется с привлечением обширного фактического материала, полученного при исследовании трещиноватости для строительства ряда крупных гидроэлектростанций.

Таблиц 21, иллюстраций 34, библиография — 272 названия.

3-2-6
301-70

*Рац Марк Владимирович
Чернышев Сергей Николаевич*

ТРЕЩИНОВАТОСТЬ И СВОЙСТВА ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Научный редактор *С. Е. Гречишев*
Редактор издательства *Л. Н. Федорова*
Техн. редактор *В. И. Калужина*
Корректор *Л. М. Кауфман*

Сдано в набор 7/VII 1970 г. Подписано в печать 20/X 1970 г. Т-14052. Формат 60 × 90^{1/16}.
Печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 10,87. Бумага № 1. Индекс 1—4—1. Заказ 1676/2803—2.
Тираж 2300 экз. Цена 1 р. 24 к.

Издательство «Недра». Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник» Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Московский пр., 91.

.....Отбор, классификация, выражение фактов, дошедших до нас, не продиктованы нам природой вещей; они должны представлять собой итоги анализа и отчетливых решений; на практике же они всегда отданы во власть навыков и традиционных способов мышления, которых случайности или произвольности мы не подозреваем.

ПОЛЬ ВАЛЕРИ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая читателю монография состоит из двух частей. В первой части дано описание трещиноватости горных пород, изложены сведения о геометрии и морфологии трещин, геологических закономерностях их развития и механизме образования. Во второй части приведено описание математической модели сети трещин, методика построения модели, анализ возможностей использования ее для решения конкретных инженерно-геологических задач и примеры решения некоторых задач.

В этой работе, так же как и в книге М. В. Раца «Неоднородность горных пород и их физических свойств» (1968), анализ ведется со статической точки зрения, причем основной упор делается на геологический и физический смысл исследуемых явлений.

Методам изучения трещиноватости для инженерно-геологических целей и при гидрогеологической съемке посвящены работы Н. И. Кригера (1951) и Л. И. Нейштадт (1957). В этих работах синтезирован большой фактический материал. Они на протяжении ряда лет использовались для изучения трещиноватости при инженерно-геологических изысканиях. Однако за последние 10 лет вышел в свет целый ряд монографий (Михайлов, 1956; Смехов и др., 1962; Букринский и Михайлова, 1965; Вистелгус, 1958; Müller, 1963 и др.) и множество статей, полностью или в значительной части посвященных изучению трещиноватости и ее инженерно-геологической оценке. За эти годы оформились целые направления в геологическом изучении трещиноватости: тектоно-физическое (работы М. В. Гзовского и его сотрудников), изучение трещинных коллекторов нефти и газа (группа Е. М. Смехова во ВНИГРИ и др.). Стали широко применяться статистические методы оценки параметров трещиноватости (Рац, 1962, 1963а, Полянский, 1963; Кворинг, 1963, 1965; Мякишев и Рац, 1967; Чернышев, 1963, 1966 и др.). Значительные результаты получены в области теории растрескивания в технической физике, механике (Баренблатт, 1961; Ивлев, 1967; Дроздовский и Фридман, 1960).

В последние годы предложены модели и расчетные схемы, позволяющие непосредственно использовать оценки параметров трещиноватости для расчета проницаемости (Роми, 1966), блочности (Тохтуев и Бетни, 1960; Колячко, 1966), деформируемости (Тарасова, 1968; Кондауров, 1966) и устойчивости горных пород в массиве (Фисенко, 1959; Кузнецов, 1961; Wittke, 1965) и др. Если раньше инженеры-геологи и проектировщики были вынуждены довольствоваться качественным учетом роли трещиноватости, то сейчас намечается реальная возможность расчета ряда важных инженерно-геологических свойств трещиноватых оснований и, что особенно важно, анизотропии свойств, обусловленной трещиноватостью.

Вместе с тем построение этих расчетных схем вызывает необходимость количественной оценки целого ряда параметров трещиноватости. Это требует нового подхода к изучению трещиноватости. Как свидетельствует практика, удовлетворительным с этой точки зрения является раздельное изучение параметров трещиноватости (длины, густоты, раскрытия) по типам и системам трещин (Соколов, 1947; Müller, 1963, Федоренко, 1959) с последующей статистической обработкой замеров (Рац, 1963а). Указанная методика начала развиваться с 1960 г. и была применена при изысканиях для строительства Селетинской плотины, Усть-Илимской, Цурекской, Токтогульской и Рогунской ГЭС. Со сходных позиций трещиноватость изучается при инженерных изысканиях за рубежом (Racher, 1959; Müller, 1959), а также при исследовании трещинных коллекторов нефти и газа (Смехов и др., 1962). Таким образом, развиваемый в настоящей работе методический подход в общих чертах является широко принятым при изучении трещиноватости для технических целей.

Следует отметить, что методы исследования трещиноватости для технических целей ни в какой мере не конкурируют с классическими методами, развитыми в структурной геологии Г. Клоосом, Б. Зандером, И. В. Кирилловой, А. В. Пэком, В. М. Крейтером, Ф. И. Вольфсоном и другими, а базируются на них и дополняют их в соответствии со специфическими задачами технических наук, в рамках которых развиваются описываемые методы. Настоящая работа рассчитана на инженеров-геологов, знакомых со структурной геологией в объеме вузовского курса, и может быть полезна инженерам-проектировщикам и строителям.

В книге изложены результаты исследований, проводившихся авторами первоначально порознь, а в последние годы совместно. М. В. Рацем написаны главы 1, 3, 4, С. И. Чернышевым — главы 5—8. В главе 2 М. В. Рацем написаны разделы, касающиеся литогенетической и тектонической трещиноватости и кляважа, С. И. Чернышевым — разделы о первичной трещиноватости изверженных пород и экзогенной трещиноватости.

Авторы благодарны Л. Д. Белому, В. Д. Галактионову, В. З. Чечоту, Л. А. Молокову, способствовавшим в разные годы развитию исследований, результаты которых изложены в этой книге, а также Э. Э. Алласу (Гидроениц-проект), С. Е. Гречищеву (ВСЕГИНГЕО), Г. А. Каледо (ВНИГНИ), Е. М. Морозову (МИФИ), П. И. Панюкову (МГИ), В. Н. Тутубалину (МГУ) и др., прочитавшим рукопись и сделавшим полезные замечания.

Авторы особенно признательны своему учителю Дмитрию Сергеевичу Соколову, принимавшему активное участие в развитии излагаемых идей. Он рецензировал первую статью о статистико-генетическом методе изучения трещиноватости (Бюлл. МОИП, отд. геол., вып. 6, 1963), обсуждал с авторами их работу по водопроницаемости трещиноватых пород. Глубокие и тонкие замечания Дмитрия Сергеевича в значительной мере определили направление исследований. Ряд приведенных в работе результатов явился развитием и продолжением идей Дмитрия Сергеевича, изложенных в его классической монографии об условиях возникновения карста.

ЧАСТЬ I

ТРЕЩИНОВАТОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Глава 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ТРЕЩИН ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕТРИЯ, МОРФОЛОГИЯ И ГЕНЕЗИС ТРЕЩИН

§ 1. Уровни трещиноватости

Различные дефекты строения горных пород литосферы и, в частности, поверхности раздела имеют самые разные размеры — от микроскопических до многих сотен и даже тысяч километров. Трещиноватость (макротрещиноватость) горных пород занимает промежуточное положение среди дефектов и должна изучаться с учетом всего ряда в целом.

По размеру дефектов целесообразно выделить пять уровней, примерно соответствующих описанным ранее уровням неоднородности (Рац, 1968а).

IV. Дефекты кристаллической решетки минералов, составляющих породу: вакансии, межузельные атомы, дислокации и т. п. (рис. 1), изучаемые в физике твердого тела.

III. Микротрещины, разбивающие отдельные кристаллы и небольшие участки горной породы (рис. 2). Размер их может быть условно ограничен величинами 0,01 мм — 10 см (по длине).

II. Макротрещины, видимые в обнажениях и изучаемые в ряде отраслей геологии (рис. 3). Условимся ограничить их линейные размеры интервалом 10 см — 100 м.

I. Разрывы, разбивающие массивы пород и связанные обычно с локальными складчатыми структурами (рис. 4). Условимся ограничить их линейные размеры интервалом 100 м — 10 км.

0. Крупные тектонические разрывы, связанные с региональными полями тектонических напряжений и разбивающие целые участки литосферы — вплоть до глубинных разломов.

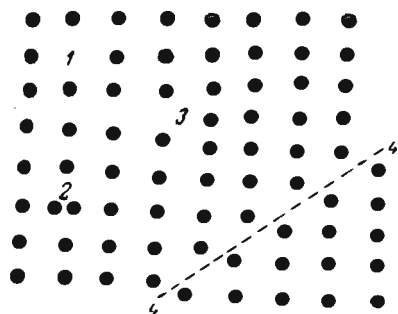


Рис. 1. Дефекты кристаллической решетки (по Иденблomu и Орлову)

1 — вакансия; 2 — межузельный атом; 3 — краевая дислокация; 4 — дефект упаковки. Плоскость рисунка отвечает плоскости (110), направление (001) горизонтально



Рис. 2. Микротрещины в шлифе порфирового базальта, ув. 70 (по Л. В. Шаумяну)

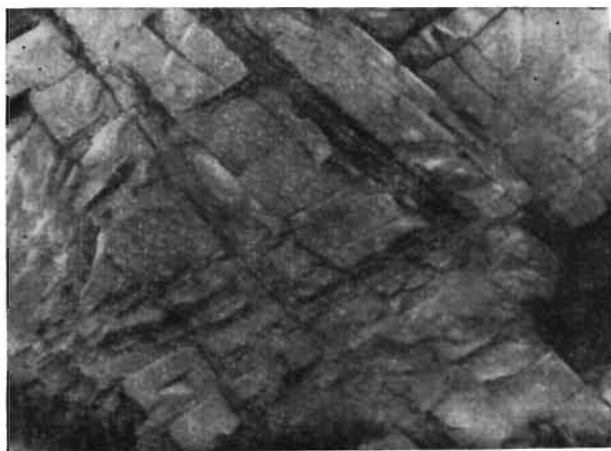


Рис. 3. Макротрещиноватость

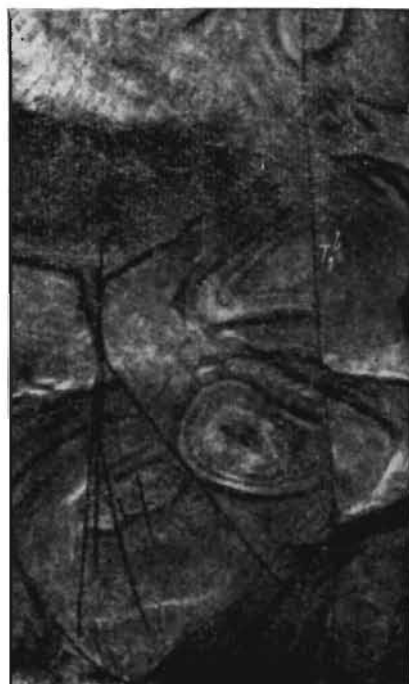


Рис. 4. Тектонические разрывы в красноцветах полуострова Челекен

В большинстве случаев существует корреляция линейного размера дефектов с частотой их расположения в массиве пород *. Поэтому примерно те же пять уровней дефектов можно было бы выделить, пользуясь не их размерами, а средним расстоянием друг от друга.

Учитывая прикладные задачи настоящей работы, трещины и разделяемые ими блоки горной породы естественно рассматривать как элементы неоднородности в том смысле, в котором это понятие введено ранее (Рац, 1966а; 1968а). Тогда по отношению характерных размеров трещин и размеров массива в решаемой задаче дефекты горных пород включаются в три класса неоднородности; высшего порядка, эффективную и низшего порядка. Неоднородность высшего порядка не препятствует рассмотрению среды как квазиоднородной; эффективная неоднородность обуславливает статистический разброс результатов экспериментов; неоднородность же низшего порядка должна специально учитываться в расчете сооружения. При этом рассматриваемые классы неоднородности выделяются относительно характерных размеров определяющей области экспериментов (т. е. размеров образцов, обнажений, деформируемого объема породы под штампами и т. п.).

Анализ неоднородности горных пород в массиве позволяет ввести достаточно строгое определение понятия структуры массива, удобное для инженерных приложений. Будем считать массив горных пород структурным, когда он обладает неоднородностью низшего порядка по отношению к принятому методу исследования. Элементы неоднородности низшего порядка образуют тогда множество элементов, для которых заданы некоторые отношения, т. е. образуют систему. Совокупность этих отношений и образует структуру массива. Иными словами, под структурой можно понимать тогда совокупность «закономерных» изменений свойств пород в массиве (Косыгин и др., 1966; Рац, 1967). При этом неоднородность высшего порядка и эффективная характеризуется как свойства материала, из которого построен массив. Массив есть естественная конструкция, созданная природой из этого материала. Понятно, что свойства материала (поскольку он включает элементы эффективной неоднородности) оказываются при этом подчиняющимися статистическому распределению.

При использовании обычных методов исследования, принятых в инженерной геологии (нагрузки и сдвиг штампов, опытные интервальные нагнетания в скважины, прессиометрия, лабораторные методы изучения свойств пород на образцах), и при обычных размерах крупных инженерных сооружений (порядка сотен метров или первых километров) возникает следующая характерная ситуация. Дефекты уровней IV и III, т. е. дефекты кристаллической решетки и микротрещины, выступают в роли неоднородности высшего

* Эта закономерность хорошо объясняется современной теорией трещин (см. гл. 3): вокруг трещин длиной l образуется разгруженная от напряжения область объемом порядка l^3 .

порядка и вносят свой вклад в формирование свойств пород как материала. Дефекты уровней 0 и I определяют инженерно-геологические условия территории строительства в целом (региональные разрывы) или выступают в роли крупных, относительно немногочисленных элементов структуры массивов горных пород. Дефекты II уровня (макротрещины) занимают промежуточное положение, обуславливая, во-первых, крайне нерегулярный характер изменчивости свойств пород в массиве и, во-вторых, различие между свойствами пород в образце и в массиве. Поэтому проблема учета макротрещиноватости является основной в комплексе задач инженерной геологии массивов горных пород.

Дальнейшее изложение посвящено в основном макротрещиноватости, для краткости именуемой просто трещиноватостью.

§ 2. Основные понятия, связанные с трещиноватостью

Строго говоря, трещиной называется поверхность раздела, на которой претерпевает разрыв вектор смещения (Баренблатт, 1961). Под трещиноватостью обычно понимают совокупность трещин в массиве горных пород. Трещины в горных породах могут различаться по геометрии, морфологии, генезису, возрасту и механизму образования*.

Системой трещин называется множество трещин, примерно параллельных друг другу. Это понятие является чисто геометрическим. Никакого генетического смысла в него не вкладывается. Примерная параллельность трещин внутри системы может реализоваться на большой площади (например, трещины в осадочных чехлах платформы) либо в небольшой части массива. Если, например, в связи с изменением ориентировки слоя на складке ориентировка литогенетических или складчатых трещин меняется, то параллельность их сохраняется лишь в пределах крыла или замка складки. Точно так же, если меняется ориентировка сместителя разрыва, может измениться и ориентировка оперяющих трещин. В таких случаях можно говорить об изменении ориентировки системы трещин или о возникновении новых систем. Мы будем говорить об изменении ориентировки системы.

Множество трещин, совместно развитых в той или иной части массива, образуют пространственную сеть трещин, составленную несколькими (как правило, не менее чем тремя) системами трещин, реже хаотически ориентированными трещинами; не группирующимися в системы. Следы трещин на произвольной (но фиксированной) плоскости образуют плоскую сеть трещин (сеть следов), а их следы на произвольной (но фиксированной) прямой образуют линейную сеть трещин (сеть точек на линии).

Сети трещин определяются рядом параметров. Параметрами называются величины, характеризующие различные элементарные

* Смысл, вкладываемый в эти термины, станет ясен из дальнейшего.

свойства трещиноватости конкретных пород в конкретных геологических условиях. К числу основных параметров пространственной сети трещин относятся:

1. Густота трещин той или иной системы, выражающаяся расстоянием между соседними трещинами этой системы (a см).

2. Ширина трещин (Δa мм).

3. Протяженность трещин в плоскости обнажения (l см).

4. Угол падения плоскости трещин (β°).

5. Азимут падения плоскости трещин (α°).

О трещинах говорят, что они принадлежат к одному морфологическому типу, если эти трещины обладают сходным обликом. Трещины одного морфологического типа могут делиться на несколько различно ориентированных систем, реже одна система может включать трещины разных морфологических типов.

О трещинах говорят, что они принадлежат к одному генетическому типу, если эти трещины сформировались под действием одних и тех же геологических причин. Понятие «генетический тип» трещин по объему может совпадать и не совпадать с понятием «морфологический тип».

Целесообразно различать геологический возраст (абсолютный и относительный) и локальный возраст трещин. Понятие геологического возраста общезвестно. Под локальным возрастом понимается относительный возраст трещин внутри множества трещин одного и того же геологического возраста. Например, все трещины, возникшие при усыхании ила, отложенного на участке поймы паводком реки в этом году, по геологическому возрасту — современные. Однако они возникли не одновременно и, как будет показано ниже, существует способ установить их относительный локальный возраст.

Наконец, по механизму образования различают трещины отрыва, перпендикулярные к направлению максимального растягивающего напряжения, и трещины скалывания, возникающие под действием максимальных касательных напряжений.

Некоторые исследователи предлагают различать трещины и по типу деформаций, в ходе которых они возникли. Тогда выделяются трещины, возникшие при растяжении, изгибе, сжатии и т. д. Иногда указанием типа деформации пытаются характеризовать механизм образования трещин, что принципиально ошибочно. При любом типе деформации возникают либо трещины отрыва, либо трещины скалывания, либо и те и другие. Иного механизма образования трещин не существует.

§ 3. Геометрические классификации трещин

Под геометрическими классификациями обычно подразумевают классификации систем трещин по их ориентировке относительно стран света, слоистости и т. п. Мы рассмотрим эти классификации

ниже, начнем же с более общих. Прежде всего по общему характеру сети трещин необходимо выделять три типа сетей.

1. Системные сети, образованные n ($n = 1, 2, \dots$) системами различно ориентированных трещин.

2. Хаотические сети, когда системы трещин не выделяются или (что то же) число систем очень велико (практически $n > 10$).

3. Полигональные сети, когда все трещины параллельны одной линии (обычно вертикальной) и в перпендикулярной к этой линии плоскости (обычно горизонтальной) образуют характерные замкнутые многоугольники с числом сторон в среднем более четырех.

Для того чтобы объемы понятий системной и полигональной сетей не пересекались, необходимо исключить из полигональных сетей трещины, образующие системы, хотя из генетических соображений можно выделить специальный случай системных полигональных сетей, т. е. сетей, в которых системы трещин (обычно их бывает три) параллельны одной линии (вертикали), как это делает Лакенбрак (Lachenbrack, 1962). Основные типы сетей трещин показаны на рис. 5.

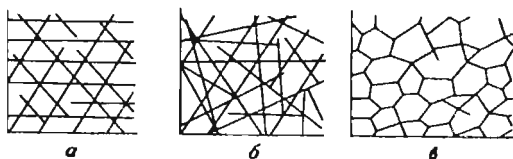


Рис. 5. Основные типы сетей трещин
а — системная, б — хаотическая, в — полигональная

Помимо приведенных «чистых» типов встречаются смешанные сети, когда на решетку одного из приведенных типов накладывается сеть другого типа. Наиболее характерным является сочетание хаотической и системной сетей, когда системы выделяются на фоне хаоса. Системная и хаотическая сети могут накладываться также на любой из типов полигональной сети.

Следует отметить, что перечисленные типы не исчерпывают всего многообразия сетей трещин, встречающихся в природе, но другие типы сетей встречаются относительно редко и могут считаться экзотическими. Отметим из них сфероидальные и ветвистые сети, известные под названием «структуры конского хвоста».

Системные, хаотические и ветвистые сети характерны для тектонических трещин, полигональные — для первичных. Наибольшее практическое значение имеют системные сети.

Для изучения системных и хаотических сетей введем еще один критерий — отношение средней длины трещин (\bar{l}) к среднему линейному размеру блоков (\bar{b}), вычлениваемых трещинами в массиве. Грубой оценкой этого отношения может служить отношение средней длины следов трещин на плоскости обнажения к среднему, видимому в обнажении, поперечнику блоков. Величина \bar{l}/\bar{b} вводится для неполигональных сетей трещин и характеризует, так сказать, «непрерывность» сети. Будем различать по этому признаку три градации: непрерыв-

ная сеть, когда $\bar{l}/\bar{b} \gg 1$ * (характерна для тектонических трещин); промежуточная сеть, когда $\bar{l}/\bar{b} > 1$ (встречается у контракционных трещин); прерывистая сеть, когда $\bar{l}/\bar{b} \approx 1$ (в практике авторов среди неполигональных сетей трещин не встречалась, но теоретически возможна). Строго говоря, поскольку длина трещины у разных систем совместно развитых в массиве, может быть разной, а блоки могут быть неизометричными, параметр \bar{l}/\bar{b} приобретает векторный характер и должен оцениваться для каждой системы отдельно. Однако в большинстве случаев (особенно для непрерывной сети) длина следов трещин с трудом поддается оценке, величина \bar{l}/\bar{b} оценивается на глаз и может в первом приближении считаться не зависящей от направления. На рис. 6 условно показаны сети системных трещин трех указанных типов. Как видно из рисунка, степень прерывистости сети

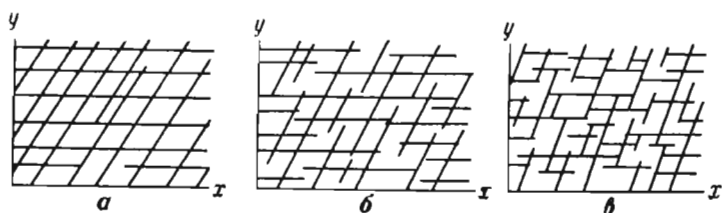


Рис. 6. Системные сети трещин
 а — непрерывная, б — промежуточная, в — прерывистая

тесно связана с числом «концов» трещин на единицу площади («плотностью концов»), что существенно облегчает визуальную качественную оценку прерывистости сетей по трем выделенным градациям. Можно наметить примерно следующее соотношение степени прерывистости сети с плотностью концов трещин (табл. 1).

Предложенные критерии позволяют в дальнейшем разработать более подробную классификацию сетей трещин по их прерывистости и дать характерные значения критериев \bar{l}/\bar{b} и v_1/v_2 для различных по генезису сетей.

С точки зрения приложений существенный интерес представляет оценка степени прерывистости сети трещин с учетом некоторых фиксированных масштабов. В этом смысле рассмотренное выше деление сетей по степени прерывистости является абсолютным. Рассмотрим возможности оценки «относительной прерывистости» сетей.

По отношению средней длины трещин (\bar{l}) к поперечнику, определяющей области эксперимента (V) и сооружения (θ), полезно различать три случая:

- а) $\bar{l} < V < \theta$,
- б) $V < \bar{l} < \theta$,
- в) $V < \theta < \bar{l}$.

* Знак \gg следует понимать как «больше по крайней мере на порядок».

Таблица 1

Степень прерывности сети трещин	Отношение длины трещин к поперечнику блоков \bar{l}/b	Отношение числа концов трещин к числу блоков на площадке n_1/n_2
Непрерывная	$\gg 1$	$< 0,1$
Промежуточная . . .	> 1	$0,1-0,5$
Прерывистая	~ 1	$> 0,5$

В качестве определяющей области эксперимента при этом чаще всего выступает площадка (обнажение), на которой производится измерение параметров трещиноватости.

Если выполняется условие (а), ориентировочная оценка величины l может быть выполнена путем прямых замеров.

В условиях (б) и (в) прямая оценка невозможна, и в качестве косвенной оценки предлагается использовать отношение числа n , видимых в пределах V концов следов трещин к удвоенному общему числу $2N$ видимых в пределах V трещин. Ориентировочную оценку можно тогда получить из несложных вероятностных соображений в виде

$$\bar{l} = V \left(\frac{2N}{n} - 1 \right), \quad (2)$$

полагая, что следы трещин расположены на площадке случайным образом (при условии $\bar{l} = C < V$). По соотношению абсолютной характеристики сети трещин и масштаба V (или θ), определяющего отношение \bar{l}/V , можно выделить относительно непрерывные и прерывистые сети. Непрерывная сеть характеризуется величинами $\bar{l}/V \rightarrow \infty$, $n/2N \rightarrow 0$, а для прерывистой сети \bar{l}/V мало, а $n/2N$ близко к 1. При фиксированной \bar{l} с ростом величины определяющей области эксперимента V отношение \bar{l}/V будет убывать, а отношение $n/2N$ возрастет. Таким образом, относительная прерывистость есть функция размера определяющей области. Это обстоятельство, как мы увидим далее, имеет важное значение для оценки механических свойств трещиноватого массива.

Для предварительной классификации сетей трещин по величине их относительной прерывистости можно предложить следующие градации (табл. 2).

Таблица 2

Классы относительной прерывистости сети	$n/2N$	\bar{l}/V
1	$< 0,01$	> 100
2	$0,01-0,10$	$100-10$
3	$0,10-0,50$	$10-1$
4	$> 0,50$	< 1

В конечном счете, величину прерывистости сети необходимо оценивать не только и не столько относительно определяющей области экспериментов (V), сколько относительно определяющей области сооружения (θ). Если по-прежнему исходить из случайного расположения трещин на площади, то легко видеть, что коэффициенты, определяющие величину прерывистости относительно θ , пропорциональны отношению θ/V .

Прикладное значение прерывистости сети трещин фундаментально. При прочих равных условиях водопроницаемость, деформируемость, прочность массива пород с прерывистой сетью могут кардинальным образом отличаться от свойств массива с непрерывной сетью трещин: проницаемость и деформируемость второго будут выше, а прочность ниже, чем у первого.

Обратимся теперь к «традиционным» геометрическим классификациям систем трещин, относящимся естественно, только к системным сетям.

Простейшие классификации осуществляются по углу или азимуту падения (простираения). По величине угла падения выделяются вертикальные трещины ($75-90^\circ$), крутые ($45-75^\circ$), пологие ($15-45^\circ$), горизонтальные ($0-15^\circ$). В простых геологических условиях (особенно на платформах) трещины удобно делить по простираанию относительно стран света. Обычно выделяются меридиональные, широтные и диагональные системы трещин.

При изучении трещиноватости на складчатых структурах более удобны классификации, основанные на двух параметрах. Так, И. В. Кириллова (1945) использовала деление трещин, основанное на измерении углов пересечения трещин с простираем складки и слоистостью. Полная классификация, основанная на этих признаках, приводится в табл. 3 (Рац, 1961).

Таблица 3

Ориентировка трещин по отношению				
к складкам	к слоистости			
	Параллельные	Косо секущие	Нормально секущие	
Поперечные	Только в периклинальных замыканиях складок	Поперечно-параллельные	Поперечные косо секущие	Поперечные нормально секущие
Диагональные		Диагонально-параллельные	Диагональные косо секущие	Диагональные нормально секущие
Продольные	Продольно-параллельные		Продольные косо секущие	Продольные нормально секущие

Более дробная классификация, предложенная В. Н. Калачевой и Л. Д. Кнорингом (1965), основана на ориентировке трещин относительно слоистости. Здесь выделяются*:

1) система трещин, перпендикулярных к пласту, простирающихся по падению пласта (система I);

2) система трещин, перпендикулярных к пласту и параллельных его простиранию (система II);

3) две системы трещин, перпендикулярных к пласту и диагональных к элементам его залегания (системы III и IV);

4) две системы трещин, наклонных к слою, простирающихся по его падению (системы V и VI);

5) две системы трещин, наклонных к пласту, но имеющих то же простирание, что пласт (системы VII и VIII);

6) четыре системы трещин, наклонных к пласту и расположенных косо по отношению к элементам его залегания (системы IX, X, XI, XII);

7) система трещин, параллельных пласту (система согласных трещин XIII).

Перечисленные системы трещин никогда не развиты совместно в одной и той же точке массива. Что касается инженерных приложений, то здесь, по-видимому, вообще бесполезно рассматривать массивы, разбитые более чем 3—5 системами трещин: при большом числе систем массив, как правило, может считаться квазиизотропным, а сеть трещин — хаотической.

Полезно различать наиболее характерные формы блоков, вычленимые трещинами в массиве горных пород: призматические и, в частности, плитчатые и параллелепipedальные, пирамидальные, сфероидальные** и т. д. Ясно, что форма блоков существенно связана с геометрическим типом сетей трещин.

§ 4. Морфология трещин

При геометрическом рассмотрении сети трещин последняя сводится к довольно «бедной» модели — системе плоскостей или щелей с плоско-параллельными границами. Эта модель является основой изучения трещиноватости для любых приложений, но она должна сопровождаться морфологической характеристикой трещин. Морфология трещин складывается из ряда элементов и включает в себя характеристики формы трещин, поверхностей стенок, заполнения, взаимопересечения, окончания следов трещин, изменения пристеночного слоя.

1. Разделяя трещины по форме, геолог обычно подразумевает форму следа поверхности трещины на поверхности обнажения. При этом выделяются трещины прямолинейные, криволинейные

* В классификацию внесены некоторые изменения.

** Природа сфероидальной отдельности не ясна. Скорее всего сфероидальные отдельности связаны с объемными деформациями (типа усадки и т. п.).

(изогнутые), волнистые и т. д. Иногда эти характеристики удается привязать к направлению (например, трещина волнистая по падению и прямолинейная по простиранию, рис. 7, а). Если трещина прямолинейна по падению и по простиранию, она называется плоской.

Такая характеристика формы трещины является заведомо неполной, хотя обычно единственно доступной геологу. Для ряда приложений (в сейсмологии и инженерной геологии) существенна форма трещины в плане, т. е. фигура, образованная контуром трещины. Чтобы пояснить это понятие, возьмем плоскую трещину, нацело заполненную, например, кварцем. Представим себе, что заполнитель без разрушения его сплошности «вынимается» из массива, кладется на стол и обводится карандашом по периметру. Полученная линия называется контуром трещины, а образованная ею фигура — формой трещины в плане. По-видимому, форма трещин в плане обычно близка к овальной. Прямые экспериментальные исследования формы трещин отрыва в прозрачных материалах показали, что трещины (в трехмерном пространстве) имеют дискообразную (чечевицеобразную) форму (Журков и др., 1959) *.

2. По характеру поверхностей стенок трещин выделяются поверхности гладкие, беспорядочно шероховатые и текстурные. Текстуры поверхности особенно важны, так как позволяют сделать ряд важных генетических выводов. Текстуры стенок трещин делятся на три большие группы: 1) следы ряби, следы трещин усыхания, следы ударов дождевых капель, следы механического воздействия в процессе седиментации — нероглифы; 2) борозды, штрихи и зеркала скольжения (см. рис. 7); 3) перистые текстуры (рис. 8). Отнесение текстур к тому или иному виду производится визуально на основании приведенных типовых фигур и опыта. Подробное описание текстур на поверхностях трещин (в особенности текстур первой группы) можно найти в монографии Р. Широка (1951) и в «Атласе структур и текстур осадочных пород».

Текстуры первой группы свойственны исключительно трещинам, разделяющим слои осадочных пород (диастромам**), и являются достаточным признаком для отнесения трещин к названному виду.

Текстуры второй группы не дают однозначного ответа на вопрос о происхождении трещин. Эти текстуры доказывают лишь, что по данной трещине вдоль происходило смещение стенок друг относительно друга. Относительно дальнейшей интерпретации этих текстур нужно сделать три замечания.

* На неявном предположении о круговой форме сместителя разрыва в плане основано известное эмпирическое правило, согласно которому глубина заложения разрыва примерно равна половине его длины. При этом еще допускается, что глубина эрозионного среза равномерно распределена по «высоте» сместителя.

** В практике укоренилось не совсем верное наименование их как «трещин напластования». Природа этих трещин далеко не выяснена, поэтому следует употреблять короткий и удобный термин «диастрома», предложенный Н. Б. Вассоевичем (1948) и не несущий никакого генетического оттенка.

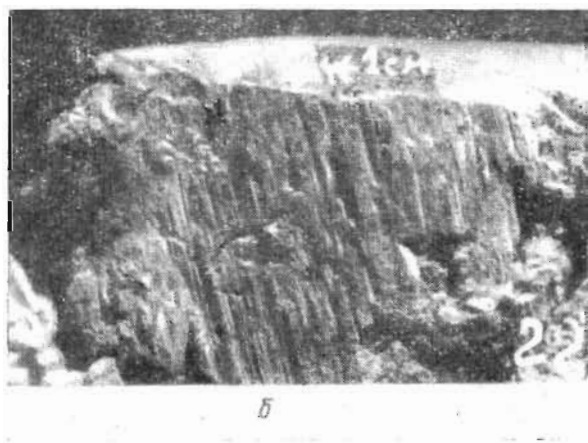


Рис. 7. Тектонические текстуры на поверхности трещин
 а - зеркало скольжения в известняках бассейна р. Сулак,
 б - оприходовка на поверхности микрограницы в кварцевом
 порфире, участок свода Ванчагайской ГЭС (по Э. И. Ткачуку,
 увеличено)

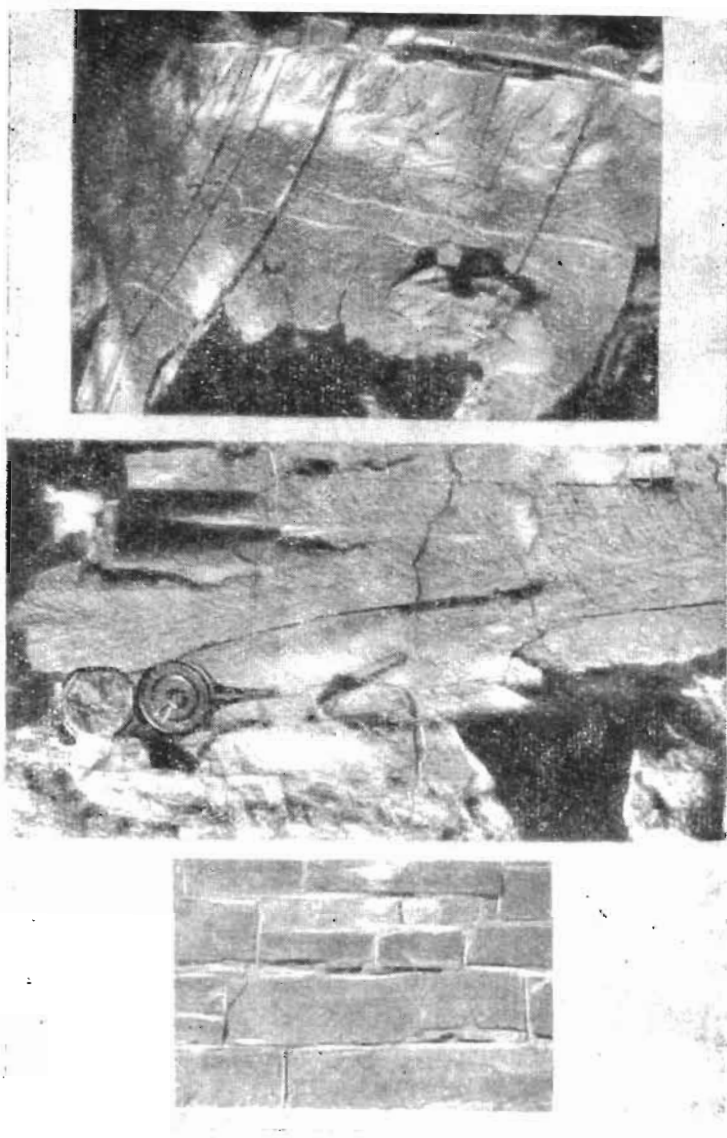


Рис. 8. Перистые текстуры на поверхности стенок туннели (по Мулбергеру). Видны слои из колотого камня.

а. В большинстве случаев, но не всегда эти текстуры свойственны тектоническим трещинам. Они могут быть также следствием консолидационных деформаций (например, подводных оползней) или экзогенных деформаций позднейшего времени. Различать эти ситуации обычно нетрудно, но может потребоваться специальный анализ.

б. В большинстве случаев, но не всегда эти текстуры свойственны трещинам скалывания. Они могут быть также результатом подвижек по уже существовавшей ранее трещине отрыва вследствие перемены плана напряжений в массиве. Решение этой дилеммы требует реконструкции истории тектонических деформаций массива и удастся далеко не всегда.

в. Наличие штрихов и борозд скольжения не является достаточным основанием для суждения о величине и направлении смещения. Согласно А. В. Пэку (1947, стр. 44), «... большие зеркала (скольжения) даже весьма совершенной полировки могут быть следствием смещений ничтожно малых». Вместе с тем, как отмечал еще И. А. Молчанов (1939), смещение по трещинам может быть многоэтапным и разнонаправленным. «Штриховка же на плоскости сместителя сохранится та, которая соответствует последнему из этих элементарных перемещений, а потому ее направление может более или менее сильно отклоняться от направления общего суммарного вектора» (стр. 142).

Текстуры третьей группы привлекли внимание геологов сравнительно недавно (Muehlberger, 1961; Hodgson, 1961; Roberts, 1961; Hill, 1965; Balkwitz, 1965), хотя были известны ранее. Они дают мало информации о геологических условиях и причинах возникновения трещин, так как являются следами роста трещин и характерны, по-видимому, для случая быстрого роста трещин. Американскими геологами высказаны противоречивые суждения о развитии перистых текстур по трещинам отрыва и скола. Согласно данным металловедения (Фирдман и др., 1961), перистые текстуры характерны для трещин хрупкого разрушения. Все исследователи, однако, сходятся на том, что «перья» являются следами распространения фронта (контура) трещины на ускоренном этапе ее роста. Поэтому изучение перистых текстур позволяет оценивать положение точки зарождения трещины и форму ее в процессе роста. Опубликованные данные позволяют предположить, что перистые текстуры указывают на овальную форму трещин в плане.

3. По характеру заполнения выделяют трещины раскрытые, или при большом раскрытии зияющие (т. е. заполненные воздухом или водой), и с заполнителем кристаллическим (кварц, кальцит и т. п.), битуминозным (нефти, битумы) или рыхлым (глинка трения, продукты выветривания).

По степени заполнения различают трещины, заполненные полностью (если заполнитель кристаллический, то говорят о «залеченных» трещинах или прожилках), трещины, частично занятые заполнителем, и трещины с налетами (натечками) по стенкам (особенно характерны налеты гидроокислов железа и натечки кальцита).

Заполнитель трещин имеет огромное значение при решении прикладных задач (оценка устойчивости, проницаемости и т. п.) и, кроме того, дает возможность сделать ряд выводов о последовательности событий в период формирования и заполнения трещин. Для прикладных целей особенно важна степень различия (или сходства) свойств горной породы как материала (разбитого трещинами) и свойств заполнителя трещин как материала (и те и другие могут быть изучены на образцах). Если полагать трещины нацело заполненными и заполнитель «спаянным» со стенками трещин, то различие свойств пород в образце и в массиве будет определяться как раз различием свойств материала породы и заполнителя. Видимо, было бы полезно ввести специальные «коэффициенты различия» свойств породы и заполнителя трещин, определяемые, например, как отношения средних модулей деформации, сопротивлений сдвигу и т. п. К сожалению, свойства заполнителя трещин (в особенности тонких) с трудом поддаются изучению. Это направление в исследовании остается пока в сущности «белым пятном».

4. По характеру пересечений трещин выделяют следующие: а) трещины не пересекаются, а заканчиваются, как правило, сами; б) трещины пересекаются без видимого смещения; в) одна трещина заметно смещает другую; г) одна трещина резко заканчивается у второй, дойдя до нее, но не пересекая ее. За исключением случая «в» и иногда «г» взаимопересечение зияющих трещин не дает ценной геологической информации. Но дело меняется, если трещины имеют кристаллический или битуминозный заполнитель. Предусмотреть здесь все ситуации, по-видимому, невозможно, но необходимо тщательно изучить места пересечения трещины в обнажении, шлифах и пришлифовках. При этом необходимо иметь в виду два обстоятельства: выводы, полученные на основании единичных соотношений, не являются достоверными; выводы об относительном возрасте заполнителя трещин сами по себе недостаточны для суждения об относительном возрасте трещин и должны увязываться с общей картиной трещинной тектоники и геологической историей района.

5. По характеру окончания следов трещин выделяют трещины затухающие; трещины с концами, отсеченными другой трещиной; трещины, ветвящиеся на конце.

6. По характеру изменений «пристеночного слоя» выделяют трещины без заметных изменений; трещины со стенками, несущими следы гидротермальной переработки; трещины со следами выветривания по стенкам. Чтобы различать трещины в двух последних случаях, могут потребоваться специальные химико-петрографические исследования.

§ 5. Генезис трещин (общие замечания)

Морфологические и геометрические особенности трещин воспринимаются нами непосредственно или выводятся (как, например, ориентировка трещин в координатах слоя) путем строго определен-

ных операций. В этом смысле понятие генезиса трещин в корне отличается от понятий геометрии и морфологии. Генезис трещин не воспринимается непосредственно, а выводится из комплекса морфологических и геометрических особенностей трещин и анализа соотношения трещин с геологической структурой массива в целом. При этом в общем случае нет строго определенных правил, формально определяющих процедуру этого вывода. В практике тот или иной генетический ярлык придается трещинам зачастую без достаточной аргументации, а иногда даже без четкого выделения морфолого-геометрических особенностей данной группы трещин.

С другой стороны понятие о генезисе трещин является сложным и включает сведения о геологических причинах, времени и условиях растрескивания и о физических (или физико-химических) причинах и условиях протекания этого процесса. Между тем информация, заключенная в генетических терминах «трещиной тектоники», резко неравноценна. Действительно, если мы говорим, что данная система трещин является системой отрыва, опережающей конкретный тектонический разрыв, то тем самым мы предполагаем сравнительно полными данными о генезисе этой системы. Если же мы говорим, что данная система трещин относится к группе «общих» трещин (термин В. В. Белоусова), то тем самым мы определяем (и то не однозначно) лишь некоторые морфологические особенности трещин данной системы, но не определяем их генезиса, ибо происхождение общих трещин до сих пор не выяснено. Хотя в этот термин и вкладывается определенный генетический смысл, но разными исследователями различный. Также обстоит дело и при отнесении трещин к диастромам. Эти определения лишь в какой-то степени сужают круг возможных гипотез о происхождении данной системы трещин, причем степень эта весьма неравноценна и далека от однозначного суждения о генезисе трещин.

Не исключено, что названные типы трещин в действительности являются «сборными» и включают трещины различного происхождения. Поэтому правомерно считать, что указанные термины в настоящее время определяют скорее морфологические, чем генетические типы трещин.

Далеко не ясны пока и условия формирования ряда экзогенных трещин, в особенности трещин разгрузки и трещин выветривания. Перечисленные типы трещин включают большую часть трещин, развитых в земной коре. Это приводит к сделанному ранее П. Н. Кропоткиным (1960) и Д. С. Соколовым выводу о том, что «крайне трудно установить критерии, позволяющие относить их (трещины — М. Р.) к той или другой генетической категории» (Соколов, 1962, стр. 158).

Возникает естественный вопрос: если определение генезиса трещин столь сложно, то стоит ли тратить на это усилия при изучении трещиноватости для прикладных целей. Ведь ни проницаемость, ни деформируемость массива горных пород не зависят от происхождения трещин, а определяются лишь их морфологией и геометрией.

Однако практически, когда генезис трещин ясен, между морфологическими и геометрическими закономерностями развития трещин и их генезисом существует тесная связь. Знание генезиса трещин оказывается весьма полезным при решении прикладных задач, в особенности при изучении распределения трещин в пространстве. Сведения о происхождении трещин позволяют при этом высказывать те или иные гипотезы о закономерностях их распределения в пространстве и на этой основе планировать дальнейшие измерения.

Как известно, проверка сформулированной гипотезы требует меньшего числа измерений, чем исследование при отсутствии гипотезы. Кроме того, привлечение сведений о происхождении трещин дает возможность построить содержательную в геологическом смысле интерпретацию результатов обработки измерений, что позволяет избежать ошибок, возможных при формальном анализе.

Особо важно установить генезис трещин при исследованиях в сейсмических областях. Здесь генезис приобретает непосредственно прикладное значение для оценки сейсмичности и возможности подвижек по трещинам.

Резюмируя эти предварительные соображения, подчеркнем, что генезис трещин изучать необходимо, но «приписывать» им то или иное происхождение без исчерпывающей аргументации не нужно и вредно.

§ 6. О генетической систематизации трещин

Из предыдущего раздела следует, что составить удовлетворительную единую генетическую классификацию трещин пока невозможно. В литературе известно несколько десятков генетических классификаций, отражающих весьма разнообразные взгляды и вкусы их авторов. Сопоставление этих классификаций или разбор каждой из них вряд ли могут существенно изменить сложившееся положение. Наиболее разумно, по-видимому, увязать представление о генезисе трещин с эмпирически наблюдаемыми закономерностями их развития. К сожалению, в настоящее время такая увязка не может быть полностью выполнена. Однако мы попытаемся приблизиться к решению этой задачи.

Наметим основные таксономические единицы классификации, для которых могут быть хотя бы приблизительно указаны эмпирически наблюдаемые признаки, позволяющие относить трещины к той или иной из них.

Можно считать твердо установленным, что трещины в горных породах образуются в процессах петрогенезиса, тектогенезиса и в результате деятельности экзогенных процессов. В соответствии с этим выделяются (Лукин и Кушнарв, 1960) три основных генетических типа трещин: петрогенетические, тектонические и экзогенные. Трещины названных типов являются результатом хрупкого разрушения материала горных пород. Кроме того, в ходе интенсивной пластической деформации образуются иногда поверхности раздела, известные под названием кливажа. Они образуют отдельную группу структур,



занимающую промежуточное положение между структурами разрушения (трещины) и структурами пластической деформации.

Дальнейшее расчленение трех выделенных генетических типов трещин не удастся провести по единому признаку (табл. 4). Петрогенетические трещины естественно разделить по энергии растрескивания и одновременно по составу разбитых ими пород на трещины осадочных и изверженных пород. Как в той, так и в другой группе выделяются трещины, образующие полигональную в плане отдельность (трещины усыхания в осадочных породах, трещины столбчатой отдельности в базальтах), и трещины, дающие параллелепипедальные блоки (первичные трещины интрузивных массивов, «прямоугольные» системы трещин в пластах осадочных пород). В особую группу выделяются диастрома.

Тектонические трещины делятся по приуроченности их к тем или иным структурам на «планетарные» (Шульц, 1966) или «общие» (Белоусов, 1962) и локальные, связанные со складками (соскладчатые) и разрывами (приразрывные). Приразрывные трещины могут быть в свою очередь разделены по характеру их связи с разрывами на оперяющие и опережающие (Рац, 1966б).

Экзогенные трещины целесообразно разделить прежде всего на две группы: естественного и искусственного происхождения (т. е. связанные с инженерной деятельностью человека). Среди естественных экзогенных трещин выделяются трещины разгрузки, возникающие за счет накоплений в массиве упругой энергии, трещины выветривания и трещины, связанные с локальными физико-геологическими процессами (оползни, просадка). Группа искусственных трещин включает две разновидности: трещины разгрузки (отличающиеся от соответствующих естественных трещин тем, что разгрузка массива производится человеком) и взрывные.

Некоторые авторы помимо перечисленных видов выделяют еще «сейсмические» трещины, подразумевая под ними вторичные трещины, образующиеся в результате деформации пород при сильных землетрясениях. Выделение сейсмических трещин (наряду с обычными тектоническими) необоснованно, так как возникающие при сильных землетрясениях видимые на поверхности земли вторичные трещины представляют собой обычные приразрывные структуры и ничем не отличаются от соответствующего класса тектонических трещин. Таким образом, их можно было бы выделять по времени образования как современные приразрывные трещины, но отнюдь не по генезису. Сказанное ничуть не умаляет необходимости тщательного их изучения.

Очевидно, что разделение трещин по генезису может быть использовано на практике, если будут указаны морфологические и геометрические признаки, позволяющие относить трещины к тому или иному классу, и закономерности развития, свойственные различным классам трещин. Перейдем к описанию этих признаков и закономерностей.

ОСНОВНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

§ 7. Петрогенетическая трещиноватость

По определению к петрогенетическим (первичным) относятся трещины, формирующиеся в ходе процессов петрогенеза за счет внутренней энергии, запасенной в осадке (горной породе). Естественно поэтому, что изменение параметров первичных трещин контролируется только литологическими факторами. В пределах однородного слоя или массива пород сеть первичных трещин обладает относительной устойчивостью. Общей чертой первичных трещин является примерное постоянство обусловленной ими трещиной пустотности (Рац, 1963; Толокопников, 1966). Этот факт закономерно вытекает из того, что большинство первичных трещин формируется в результате уменьшения объема твердой фазы в массиве горных пород. Естественно поэтому, что в пределах единой геологической позиции трещинная пустотность, формирующаяся таким образом, неизменна. В тех (довольно обычных) случаях, когда первичные трещины формируются при значительном воздействии тектонических полей напряжений, указанные закономерности могут быть затуплены.

Ниже описывается первичная трещиноватость осадочных и изверженных пород.

*Первичная трещиноватость осадочных пород
(литогенетические трещины)*

Литогенетические трещины осадочных пород (как и первичные трещины лавовых покровов) образуются обычно в слоях, толщина которых мала по сравнению с площадью распространения. Поэтому подробнее остановимся на закономерностях их планового расположения.

Общеизвестно, что трещины усыхания, морозобойные трещины, так же как и контракционные трещины в лавовых покровах, обычно образуют полигональную сеть. Закономерности строения этой сети исследовались астрономами и механиками, а не только геологами.

Рассматривая возможные гипотезы о происхождении марсианских капалов, астрономы в качестве одной из альтернатив принимают гипотезу о том, что каналы суть трещины в коре планеты. В связи с этим А. Вебом (Филиппов, 1966) были изучены топологические особенности сетей трещин на глазури и в лавовых покровах. Автором по этой же методике проведено исследование трещин усыхания в пле и тектонических трещин. Методика исследования предельно проста и сводится к подсчету числа «узлов сети», в которых сходятся 1, 3, 4, 5 и т. д. трещин (цифра 1 обозначает просто конец (начало)

трещины); узлы, в которых сходятся две трещины, не рассматриваются, так как они топологически неразличимы с изгибами трещин. Результаты подсчетов сведены в табл. 5.

Таблица 5

Число лучей на узел	Процент узлов с данным числом лучей							
	По А. Вебу				По М. Рацу			
	Литогенетические трещины							Тектонические трещины
	Трещины глаури	Лавовый покров		Трещины усыхания в иле (4 выборки из равных совокупностей)				Соскладчатые трещины в алевритах у Нурика
крупные трещины, $l \sim 10$ м		мелкие трещины, $l \sim 1$ м						
1	0,6	0,8	2,7	1,5	3,3	4,2	6,5	10
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	77,5	71,8	72,0	83,2	88,5	86	75	18
4	21,5	23,9	22,0	14,8	8,2	8,4	18,5	72
5	0,4	2,3	1,8	0	0	1,4	0	0
6	0	0,8	0,6	0,5	0	0	0	0
7	0	0,4	0,6	0	0	0	0	0
8	0	0	0,3	0	0	0	0	0

Как явствует из таблицы, сети литогенетических (первичных) трещин характеризуются резким преобладанием узлов, в которых сходятся три трещины (в среднем 79%). Количество узлов с большим числом трещин быстро падает. Свободные концы также встречаются редко. В отличие от литогенетических трещин среди узлов сетей тектонических трещин могут преобладать как трех-, так (чаще) и четырехлучевые (из этого, между прочим, вытекает ошибочность выводов Филиппова о природе марсианских каналов: преобладание четырехлучевых узлов не противоречит гипотезе о трещинной природе каналов). Вторая особенность сетей литогенетических трещин состоит в стремлении трещин сопрягаться под прямым углом. Трещины при этом, как правило, не пересекаются, а одна из них заканчивается, «уткнувшись» в другую (в виде буквы Т). При этом в большинстве случаев трещина, образующая ножку Т, будет относительно моложе (Достовалов, 1961, стр. 249). Эта особенность развития трещин объяснена теоретически (см. главу 3).

Вопрос о форме полигонов, образуемых первичными трещинами, является в настоящее время дискуссионным. Известно, что в большинстве случаев (в базальтах, на такырах и т. п.) преобладают 5—6-угольные отдельности, но иногда встречаются и почти правильные ортогональные сети с преобладанием четырехугольных отдельностей. Исследуя сети морозобойных трещин, Б. Н. Достовалов

(1961) пришел к выводу, что для однородных массивов характерна ортогональная сеть, а 5—6-угольные полигоны образуются в результате искривления трещин на неоднородностях. Эту точку зрения Достовалов обосновывает, анализируя процесс формирования сети трещин в сторону от уже существующей прямолинейной трещины. Однако согласно существующим представлениям о механизме раскрекивания (см. главу 3), возникновение трещин начинается равномерно по всему деформированному объему. Полагая материал изотропным, приходим к выводу, что в случае первичной трещиноватости (т. е. при отсутствии внешних сил) зарождающиеся трещины будут ориентированы в породе беспорядочно. Дж. Смолли (Smally, 1966) предлагает рассматривать две произвольные точки на плоскости как некие центры «стягивания» материала. Вокруг этих точек можно представить концентрические окружности, изображающие изолинии равных растягивающих напряжений. Если напряжения превысят прочность материала на разрыв, то возникнет трещина, наиболее вероятное положение которой будет в точности посередине между центрами окружностей, причем трещина ориентируется нормально к растягивающим напряжениям, т. е. нормально к линии, соединяющей центры стягивания. На этом представлении основан метод воспроизведения полигональных сетей, предложенный Смолли.

На плоскость чертежа размером 100×100 единиц наносятся случайно расположенные точки. Вокруг каждой точки строится окружность диаметром 20 единиц. Пересекающиеся окружности выбрасываются. Центры ближайших кругов соединяются друг с другом отрезками прямых. В середине каждого отрезка строятся нормали к ним. Нормали продолжаютя в обе стороны до пересечения друг с другом. Сеть нормалей моделирует полигональную сеть трещин. Полученные Смолли в результате этой процедуры хаотические полигональные сети по конфигурации, числу лучей на узел и числу сторон полигонов близки к реальным сетям трещин в горных породах.

Среднее число сторон полигонов Смолли равно шести, в то время как в базальтах, например (см. табл. 6), среднее число граней столбов несколько меньше. Это расхождение Смолли объясняет тем, что в природе не реализуются очень короткие стороны полигонов, получающиеся на модели. Отбросив эти короткие стороны, Смолли получает лучшую сходимость с фактическим материалом, однако число шестигранников на модели по-прежнему превосходит число пятигранников, хотя в природе они встречаются в среднем одинаково часто. Это может быть связано с недостаточным числом экспериментов, но скорее свидетельствует о некотором расхождении модели с природой.

Существует возможность теоретически подойти к объяснению числа граней полигонов, исходя из энергетических соображений. Этот подход будет описан в главе 3 (§ 11), где также показано, что 5—6-угольная форма полигонов является общим случаем. По мнению М. В. Раца, ортогональная сеть возникает либо под действием каких-то внешних сил, либо в анизотропном массиве, либо при

наличии с самого начала вертикальных прямолинейных свободных границ (бровка обрыва, тектоническая трещина и т. п.) *. В последнем случае, однако, ортогональность должна быстро нарушаться по мере удаления от границы.

Важные закономерности строения сетей трещин выявлены А. В. Думанским при анализе трещин усыхания и трещин коры деревьев (Думанский и др., 1934; Думанский, 1936; Думанский и Ишлинский, 1952) и подтверждены впоследствии при исследовании растрескивания стекла при резком охлаждении. Сходные эксперименты проводили и геологи Новикова и Оффман (1953), Ливанов (1961), не знавшие, к сожалению, о результатах А. В. Думанского.

В итоге перечисленных исследований установлено «правило одинаковых периметров» полигонов, образующихся при растрескивании. Согласно этому правилу периметры полигонов (для растрескивающегося слоя фиксированного состава и толщины) примерно одинаковы. Равенство периметров выдерживается с точностью 8,3% для суспензии крахмала, 40% — для глины и 15,6 — 22% — для стекла. Величина периметра подчиняется при этом нормальному распределению. Правило одинаковых периметров выражает равномерность растрескивания макрооднородного слоя по площади. Величина полигонов определяется тем, что существует некоторый критический размер площадки в стягиваемом слое $S_{кр}$, такой, что если $S < S_{кр}$, то трещины на этой площадке не образуются, и наоборот, при $S > S_{кр}$ площадка рвется трещиной. Легко показать, что «правило равных периметров» в сущности равносильно «правилу равных площадей» полигонов, но коэффициент вариации площадей примерно вдвое больше коэффициента вариации периметров просто в силу геометрических соотношений.

Исследуя процесс растрескивания коры деревьев, А. В. Думанский и А. Ю. Ишлинский нашли зависимость критического линейного размера площадки от относительного удлинения «основы» (периметра ствола дерева). Эта зависимость сохраняется и в рассматриваемой ситуации, если заменить удлинение основы относительной величиной стягивания материала слоя.

Ясно, что растрескивания в равномерно стягиваемом слое не произошло бы, если бы ничто не препятствовало стягиванию: слой просто сокращался бы, как «бальзаковская шагреневая кожа». Предполагается, что силой, препятствующей стягиванию, является сцепление слоя с жесткой основой. Тогда, согласно А. В. Думанскому и А. Ю. Ишлинскому

$$E\varepsilon \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \left(\frac{a_{кр}}{2} \sqrt{\frac{K}{EM}} \right)} \right] = \sigma_p, \quad (3)$$

где E — модуль упругости материала;

σ_p — прочность на разрыв;

* Последнее условие равносильно действию внешнего нагружения.

K — коэффициент пропорциональности;

ε — относительное удлинение основы (относительное стягивание материала слоя);

$a_{кр}$ — критическая длина площадки (расстояние между трещинами);

M — мощность (толщина) слоя.

Заменяя sh степенным рядом и ограничиваясь первыми двумя членами разложения, получим формулу для расстояния между трещинами.

$$a \approx \sqrt{\frac{8\sigma_p EM}{(E\varepsilon - \sigma_p) K}} \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что расстояние между трещинами пропорционально корню квадратному из мощности слоя. Этот вывод независимо от А. В. Думанского и А. Ю. Ишлинского позже был получен Г. К. Васильевым и Рацем (1963б) *. Фактический материал, полученный как в технике (Думанский и др., 1934), так и в геологии (Ливанов, 1961; Оффман и Новикова, 1953), подтверждает наличие этой зависимости, но не дает однозначного ответа на вопрос о ее форме.

В заключение подчеркнем еще раз, что особенности литогенетической трещиноватости (в рамках описанных общих закономерностей) полностью контролируются литологическими факторами: составом пород, их структурой и текстурой.

Первичная трещиноватость изверженных пород

Первичные трещины в изверженных породах появляются во время или непосредственно после затвердевания расплава. Сеть первичных трещин является одной из главных черт внутреннего строения массива и поэтому на нее распространяется общее правило, сформулированное А. А. Полкановым (1946) и касающееся условий формирования внутреннего строения интрузий: «Каждое интрузивное тело в целом выражает собой состояние равновесия между эндогенными силами активной магмы, с одной стороны, и тектоникой и кинематикой, заключающей его рамы, с другой стороны. Внутреннее строение каждой интрузии контролируется отношением периода процесса кристаллизации магмы к периоду ее эндогенной кинематики и к синхронной кинематике рамы». Поэтому сети первичных трещин в глубинных интрузиях, в гипабиссальных интрузиях и в лавовых покровах и потоках существенно различаются между собой. Мы рассмотрим отдельно первичную трещиноватость глубинных интрузий на примере грапитных батолитов, первичную трещиноватость эффузивов на примере базальтовых покровов и первичную трещиноватость гипабиссальных тел на примере траптовых интрузий.

* В работе Раца показано, что и ширина трещин пропорциональна корню квадратному из мощности слоя.

Классическое исследование трещиноватости гранитных батолитов выполнено Г. Клоосом (Cloos, 1924 и др.). Его работы не утратили значения до сего времени, хотя они и встретили некоторые существенные возражения, сводившиеся главным образом к критике физико-механической интерпретации полевых и экспериментальных данных (Пэк, 1939; Кушнарев и Лукин, 1960), которая пока, видимо, не может быть общепринятой, поскольку на происхождение батолитов и условия их растрескивания имеется несколько точек зрения. Морфологическая классификация первичных трещин интрузий, предложенная Г. Клоосом, была подвергнута критике и усовершенствована, но в основных своих чертах принята сейчас большинством исследователей. Г. Клоос различал в гранитных батолитах три основные взаимно перпендикулярные системы. Они закономерно ориентированы относительно структур течения. Две из трех систем имеют крутое падение и простираются одна поперек структур течения (по номенклатуре Г. Клооса — поперечные трещины Q), другая вдоль структур течения (продольные трещины S). Третья система имеет небольшой угол падения. Она располагается также вдоль линий течения (пологие трещины L). Кроме трех основных взаимно ортогональных систем обычно присутствует система косо секущих трещин (диагональные трещины D). Эта система по простиранию обычно не отличается от системы поперечных трещин, но резко отличается по углу падения, который представляет собой среднюю величину между углами падения систем Q и L . Все названные системы первичных трещин возникают в еще не окончательно затвердевшем гранитном массиве. С ними связаны аплитовые и пегматитовые жилы и дайки (Болк, 1946).

Системы трещин Q , S , L , D различаются не только ориентировкой, но и другими параметрами. Наибольшая густота трещин обычно наблюдается в системе S . Помимо видимых трещин в этой системе обычно присутствуют в большом числе скрытые трещины, вследствие чего вдоль трещин S порода обладает наилучшей делимостью. Наименьшая густота характерна для трещин системы D . Трещины систем Q и L обладают средней густотой. Причем скрытые трещины в системе Q обычно отсутствуют, вследствие чего порода обладает плохой делимостью в этом направлении. Вдоль трещин L делимость лучше, что может быть связано с процессом разгрузки, поскольку трещины L обычно параллельны рельефу дневной поверхности. Ширина трещин также различна. Особенно большую ширину имеют в идеальном случае трещины системы Q . Эти же трещины характеризуются наибольшей длиной. Трещины системы S значительно короче и уже. Трещины других систем по длине и ширине занимают промежуточное положение.

Из-за отсутствия структур течения в массиве часто нельзя различить, какая из систем является продольной, а какая поперечной. В этом несовершенство систематики Г. Клооса, отмеченное уже В. Н. Лодочниковым (1926). Однако обычно в гранитном массиве можно наблюдать три основные системы трещин, которые создают

характерную для гранитов параллелепипедальную отдельность, трансформирующуюся в зависимости от соотношения расстояний между трещинами в системах в так называемые матрацевидную и плитчатую формы отдельности. Повсеместное равноправное существование в гранитах трех ортогональных систем трещин является основной чертой их первичной трещиноватости, отличающей их от эффузивов и гипабиссальных тел. Эта особенность сети трещин гранитов — непосредственное следствие особенностей поля напряжений, в котором она формируется. Еще Г. Клоос (1921) подчеркивал, что не только сжатие породы и соответственно растяжение массива при остывании (контракция) является ведущим фактором в образовании первичных трещин в гранитах. На тех глубинах, где кристаллизуются граниты, всестороннее сжатие настолько велико, что контракционные трещины растяжения не могут возникнуть без влияния напряжений, передаваемых на затвердевший массив со стороны вмещающих пород и со стороны еще подвижной части расплава [по терминологии А. А. Полканова (1946) без влияния тектоники и кинематики рамы и магмы]. В силу подвижности рамы и магмы главные нормальные напряжения не равны между собой. Одно из них преобладает и диктует положение трещин. Во внутренней части гранитного батолита, удаленной на десятки километров от контактов, видимо, может иметь место поле напряжений, близкое к изотропному. Вследствие этого внутренние части батолита, по Р. Болку (1946), могут быть лишены первичных трещин. О существовании гранитных массивов без трещин пишут Л. Мюллер и другие исследователи.

В пределах интрузивного массива трещиноватость закономерно изменяется, следуя изменениям структур течения и в конечном счете подчиняясь форме массива. Заметные изменения трещиноватости можно наблюдать при движении от контакта к внутренним частям батолита. В. К. Монич (1957) описывает гранитный батолит, в пределах которого у контакта в полосе шириной 1 км первичные трещины гуще и короче, чем во внутренней части массива. Густота трещин в приконтактной зоне более изменчива, чем во внутренней части. Наблюдаются сгущения трещин на отдельных участках. Здесь больше разнообразие ориентировки трещин: у контакта наблюдается пять-шесть систем крутопадающих трещин, тогда как во внутренней части массива их две (Q и S).

Положение системы трещин L диктуется положением контакта. У пологого контакта она обычно параллельна ему. У крутых контактов, по наблюдениям Монича, трещины L секут контакт, имея простирание контакта. Простирание системы во всех случаях близко к простиранию контакта.

Излившиеся на земную поверхность лавы застывают в совершенно иной обстановке, чем гранитные батолиты. Активность магмы и подвижность рамы, если за раму можно считать поверхность земли, здесь проявляются своеобразно. С этим связаны особенности трещиноватости лавовых потоков.

Изливаясь на поверхность земли, лава избавляется от всестороннего сжатия, под которым неизменно пребывает магма. Поэтому на лавовый поток не передаются тектонические напряжения рамы, за исключением сейсмических, которые кратковременны и возникают лишь эпизодически. Лава растрескивается под влиянием напряжений, обусловленных силами контракции (сжатия, стяжения) тела потока. Поскольку сначала ничто не препятствует сжатию потока в вертикальном направлении, а сжатие его по горизонтали сопряжено с преодолением сил сцепления с подстилающими породами, естественно, что вначале формируются вертикальные трещины, ориентированные хаотически (как и в осадочных породах) и образующие пяти-шестиугольные отдельности.

Затем в столбах отдельности возникают горизонтальные трещины, формирование которых может быть связано с неравномерным по высоте остыванием столбов. Сверху вниз сечение столбов часто уменьшается (Левинсон-Лессинг, 1940). В плане столбы обычно имеют пяти- и шестигранную форму. По наблюдениям Дж. Берда (Beard, 1959), в лавах со столбчатой отдельностью преобладают пяти- и шестигранные столбы. Затем в убывающем порядке по частоте встречаемости следуют семигранные и четырехгранные столбы. В единичных случаях встречаются восьмигранные и трехгранные столбы (табл. 6).

Роль формы и кинематики рамы является второстепенной при формировании сети контракционных трещин в массивах излившихся пород. Однако в некоторых случаях она заметна. Известно, что столбы отдельности часто отклоняются от вертикального положения и изгибаются. Отклонения и изгибы столбов подчиняются форме ложа потока. Столбы отдельности стремятся ориентироваться перпендикулярно поверхности ложа. Там, где в ложе имеются выступы, столбы веерообразно расходятся от них; там, где ложе имеет уклон, столбы наклоняются вниз по потоку. Такая ориентировка столбов, видимо, связана с существованием силы сцепления лавы с породами ложа. Влияние ложа по мере удаления от него снижается. В связи с этим столбы отдельности по мере удаления от ложа стремятся к вертикальному положению.

Кроме столбчатой отдельности в лавах наблюдаются некоторые другие формы отдельности. Наиболее распространенные из них глыбовая (или брекчиевидная) и шаровая (или скорлуповатая). В случае глыбовой отдельности порода расчленена сетью хаотически ориентированных трещин. Такая отдельность, видимо, возникает при подвижках твердеющей лавы. Она характерна для верхних зон эффузивов, которые твердеют на еще движущемся потоке. Глыбовая отдельность наблюдается и во внутренних частях массивов. Возникновение ее здесь может быть объяснено землетрясениями, которые обычно сопровождают изливания (Толоконников, 1966). Землетрясения в данном случае являются тем элементом кинематики рамы, который влияет на внутреннюю структуру массива — форму отдельности.

Местоположение	Количество и процент столбов с числом граней						Среднее число граней	Общее число граней
	3	4	5	6	7	8		
Плейстоценовый базальтовый поток района лунных кратеров, Айдахо	—	14	28	8	—	—	4,9	50
	—	28,0	56,0	16,0	—	—		
Плейстоценовый базальтовый поток, Дансмур, Калифорния	1	29	92	67	9	2	5,3	200
	0,5	14,3	46,0	33,5	4,5	1,0		
Миоценовый базальтовый поток, Лавистон, Айдахо	—	5	30	28	7	—	5,5	67
	—	7,5	45,0	41,5	6,0	—		
Базальты «Дороги гигантов», Северная Ирландия	—	18	140	204	37	1	5,7	400
	—	4,5	35,0	51,0	9,25	0,25		
Базальты горы Родэ, Овернь, Франция	—	30	100	65	5	—	5,2	200
	—	15,0	50,0	32,5	2,5	—		
Фонолиты, Девилс Туазэр, Восточный Вайоминг	—	17	42	35	6	—	5,3	100
	—	17,0	42,0	35,0	6,0	—		
Базальты Девилс Постпайл, Восточная Калифорния	2	38	150	178	32	—	5	400
	0,5	9,5	37,5	44,5	8,0	—		
Базальты Сиденхам, Австралия (по А. Джеймсу)	—	—	—	—	—	—	6,2	
	—	3	22	40	22	13		
Базальты Армении (по И. С. Толоконникову, осреднено)	—	—	—	—	—	—	5,5	
	1	13	36	36	13	1		
Андезитовые лавы Грузии (по Н. В. Короновскому, осреднено)	—	—	—	—	—	—	—	
	—	4,4	32	63,6	—	—		

Лавовые потоки с шаровой отдельностью представляют собой как бы скопление валунов, пригнанных и частично вогнанных друг в друга. Каждый отдельно взятый «валун» обладает внутренней скорлуповатой отдельностью, вследствие чего часто говорят не о шаровой, а о скорлуповатой отдельности. Эта форма отдельности возникает в лавах при быстром охлаждении, например при подводных излияниях, поэтому она характерна для стекловатых и слабо раскристаллизованных пород (Михайлов, 1956), в особенности спилитов. Как и для столбчатой отдельности, для шаровой отдельности характерна вытянутость сечения блоков по направлению течения лавы.

Первичная трещиноватость гипабиссальных тел имеет много общего с трещиноватостью излившихся массивов. Но наряду с этим она имеет черты, характерные для трещиноватости глубинных интрузий. Это понятно, поскольку гипабиссальная фация занимает проме-

жучочное положение по условиям кристаллизации и растрескивания между глубинными интрузиями и эффузивами.

Двойственность природы первичной трещиноватости гипабиссальных трапловых тел заметил К. И. Богданович (1896). Он наблюдал в трапловых интрузиях «отдельности — пластовую, матрацевидную (часто гранитного типа, например, около Берендинского порога на р. Уфа), столбчатую и шаровую» (стр. 52), которые породам одного и того же петрографического состава придают совершенно различный внешний вид, так что в одних обнажениях они напоминают глубинные породы, а в других эффузивы.

Форма отдельности в интрузивных трапах в значительной мере обусловлена формой тел. Расстояние между трещинами зависит: 1) от расстояния до контакта интрузии и 2) от степени зернистости долерита. Растрескивание породы шло в определенной последовательности. Можно различать вертикальные трещины первой генерации, ограничивающие столбы, и вертикальные и горизонтальные трещины второй генерации, образующие системы внутри столбов (Лебедев, 1957; Hill, 1965).

Представление А. П. Лебедева о формах отдельности получило развитие в работах М. К. Савинской (1963) и Г. Д. Феоктистова (1964). По Савинской, для нижней части силлов характерны призматически-столбчатая и столбчатая форма отдельности, для верхней части — более типичны массивно-столбчато-глыбовая и наклонно-столбчатая отдельности. В приконтактных зонах развита плитчатая отдельность, встречается шаровая отдельность.

Автором была детально исследована трещиноватость одной трапловой интрузии на р. Ангаре (С. Н. Чернышев, 1963, 1966). Статистическое описание решетки трещин позволило выявить закономерности ее пространственной изменчивости, причины которых следует искать в закономерном изменении условий растрескивания при переходе от одной части интрузии к другой, в частности от контакта к внутренней части силла. Изменение условий сказывалось, во-первых, в изменении ориентировки главных напряжений и, во-вторых, в изменении скорости растрескивания. Поле напряжений в остывшей интрузии складывалось из контракционных, гравитационных и тектонических напряжений. Сложение контракционных и гравитационных напряжений давало эллипсоид напряжений в форме эллипсоида вращения с минимальным нормальным напряжением, направленным вертикально, подобно тому как это имеет место в эффузивах. Под воздействием таких напряжений, которые в наиболее чистом виде имеют место внутри пластовой части силла, вначале возникают вертикальные трещины отрыва и затем горизонтальные трещины. Тектонические напряжения, передающиеся на остывающую интрузию с рамы, искажают сравнительно простое поле напряжений, складывающееся под воздействием контракционных и гравитационных сил, усложняют картину трещиноватости. У контактов интрузии увеличивается дисперсия углов падения трещин (рис. 9, б), в куполовидном вздутии интрузии крутые трещины отклоняются от верти-

кали. Характерно, что в первый момент после внедрения, когда магма и рама еще подвижны, оба названных искажения сети первичных трещин проявлены наиболее сильно. Вероятно, только под влиянием тектонических напряжений возможно возникновение определенных простираний трещин. Ни контракционные, ни гравитационные силы создать его не могут по причине изотропности трапшов.

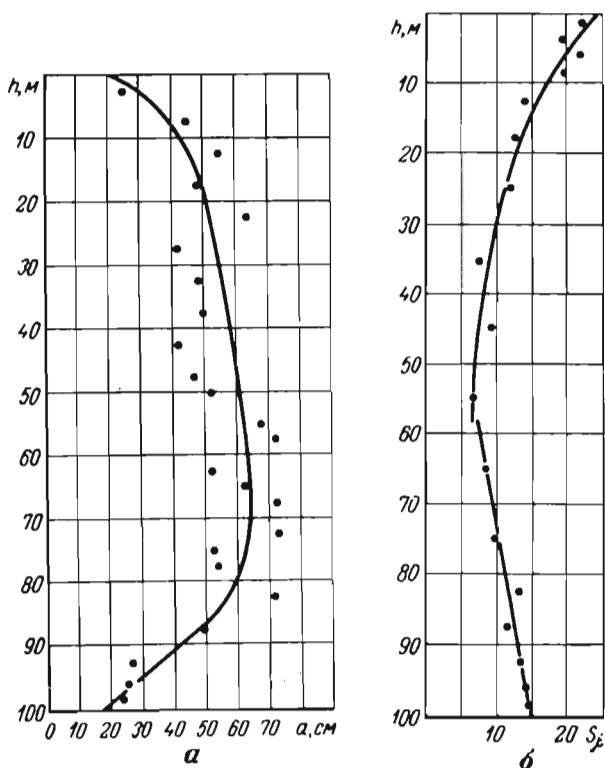


Рис. 9. Закономерные изменения в теле сила расстояний между горизонтальными трещинами (a) и средне-квадратичного отклонения углов падения трещин, δ^2 (b)

Увеличение густоты трещин (рис. 9, а) вблизи контактов интрузии можно объяснить, по-видимому, большей скоростью деформации, отвечающей большому температурному градиенту.

Резюмируя сказанное о трещиноватости гипассибальных интрузий, отметим, что трещиноватость этих интрузивных тел, как указывал Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, в основных чертах сходна с трещиноватостью других интрузивных тел. Основными чертами сходства надо считать: 1) преимущественное развитие трех систем ортогональных трещин; 2) гидротермальное заполнение трещин; 3) приконтактные изменения трещиноватости в эндо- и экзоконтакте.

Наряду с этим трещиноватость гипабиссальных интрузий имеет черты сходства с трещиноватостью эффузивов. Наиболее четко проявленной чертой сходства с эффузивами является почти повсеместное развитие вертикальных столбов отдельности, а также проявление местами неправильноглибовой и шаровой отдельности.

Итак, глубокие, полуглубинные и излившиеся магматические горные породы обладают разной трещиноватостью и отдельностью. Чисто контракционными можно считать лишь трещины столбчатой отдельности в эффузивах. Иные формы отдельности в эффузивах возникают, вероятно, не без влияния кинематики расплава и рамы. Первичные трещины интрузивов всегда возникают при том или ином влиянии кинематики рамы и магмы. Поэтому эти трещины в схеме генетической классификации (см. табл. 4) должны быть отнесены к контракционным трещинам, возникающим при заметном влиянии внешних напряжений.

§ 8. Тектоническая трещиноватость

В настоящее время трудно указать какие-нибудь общие закономерности развития тектонических трещин. Можно лишь охарактеризовать закономерности, присущие каждому из трех выделенных классов тектонических трещин в отдельности.

Наблюдаются некоторые различия в тектонических деформациях и, как следствие, в тектонической трещиноватости осадочных, метаморфических и изверженных пород. Если в осадочных и метаморфических породах имеются как складчатые, так и разрывные нарушения, то в изверженных породах — почти исключительно разрывные нарушения. Лишь эффузивные породы, залегающие слоями среди осадочных и пирокластических пород, да пластовые интрузии способны давать складки. Однако складки эти всегда пологи и осложнены разрывами (Малютин, 1940; Burnett, 1963). В зонах интенсивных складчатых деформаций пластовые магматические тела обычно разбиты на отдельные блоки, отторгнутые друг от друга (Белоусов, 1961).

Соскладчатые трещины

Анализ напряжений и деформаций, связанных со складкообразованием, приводит к выводу о существовании двух видов соскладчатых трещин (Пэк, 1939, 1947). Относительно крупные трещины, соизмеримые по размеру со складками, рассматриваются как результат однородной деформации складчатой толщи в целом. Положение этих трещин в пространстве связано с ориентировкой складки как единого целого. Относительно мелкие трещины, разбивающие отдельные слои или пачки слоев, рассматриваются Пэком как результат локальной, неоднородной деформации. Их ориентировка, естественно,

связана с элементами залегания слоя *. По принятому нами соглашению трещины первой группы следует отнести к разрывам. Закономерности развития соскладчатых трещин второй группы были изучены И. В. Кирилловой (1945, 1949).

Результаты Кирилловой подтвердились, были дополнены последующими исследованиями (Скарятин, 1962; Калачева и Кноринг, 1965; Рац, 1966; Погребиский, 1967) и могут считаться твердо установленными. Закономерность, эмпирически найденная Кирилловой, может быть сформулирована так: ориентировка внутрислойных соскладчатых трещин жестко связана с элементами залегания слоев и меняется вместе с изменением последних. На периклинальных замыканиях складок трещины как бы концентрически огибают складки. Эта закономерность отчетливо проявляется уже при геометрической классификации трещин. С переходом от одного элемента складки к другому в номенклатуре какой-либо системы соскладчатых трещин по классификации (табл. 4) меняется только первое определение (отражающее ориентировку трещин относительно оси складки), а по классификации Калачевой и Кноринга ничего не меняется. Иными словами, ориентировка соскладчатых трещин в координатах слоя при переходе с одного элемента складки к другому не меняется.

Для проверки этого соотношения И. В. Кирилловой разработан способ «приведения слоев к горизонту», дополненный затем В. Д. Скарятиным и Л. Д. Кнорингом. Этот прием заключается в следующем (рис. 10). Полюса слоистости и максимумы исследуемых систем трещин с двух элементов складки (характеризующиеся существенно разными элементами залегания) наносится на одну диаграмму. Один из полюсов слоистости поворачивается по азимуту (т. е. концентрически вокруг центра диаграммы) до совпадения с азимутом падения другого полюса. Соответственно поворачиваются и максимумы систем трещин первого слоя. Затем оба полюса по экватору сетки сносятся в ее центр (эта операция отвечает повороту слоев вокруг линии простирания на величину угла падения, т. е. приведению слоев в горизонтальное положение). Максимумы систем трещин при этом переносятся по тем параллелям сетки, на которых они оказались, в ту же сторону и на то же число градусов, что и полюсы слоистости. Если траектория движения какого-нибудь максимума дошла до окружности сетки, то на оставшуюся часть дуги перенос осуществляется от противоположного конца диаметра сетки.

Приведение слоев к горизонту может быть сделано и без предварительного поворота слоев по азимуту. Эти операции могут привести к одному из трех результатов (Кириллова, 1949, стр. 80).

1. Системы, различно ориентированные на разных элементах складки, после приведения слоев к горизонту «сливаются». Эти

* Существует и другая точка зрения на соотношение мелкой трещиноватости со складками. Так, Е. Н. Пермяков (1949), Л. У. де Ситтер (1960) считают, что ориентировка мелких трещин определяется положением складки в целом. Это мнение в настоящее время не может считаться достаточно аргументированным.

системы сформировались до складкообразования и являются либо литогенетическими, либо (в особенности если они не внутрислойные) тектоническими, связанными с какой-то более древней и крупной структурой, чем рассматриваемая.

2. Системы, различно ориентированные на разных элементах складки, после приведения слоев к горизонту не сливаются, но сливаются после поворота азимутов падения слоев на разных элементах

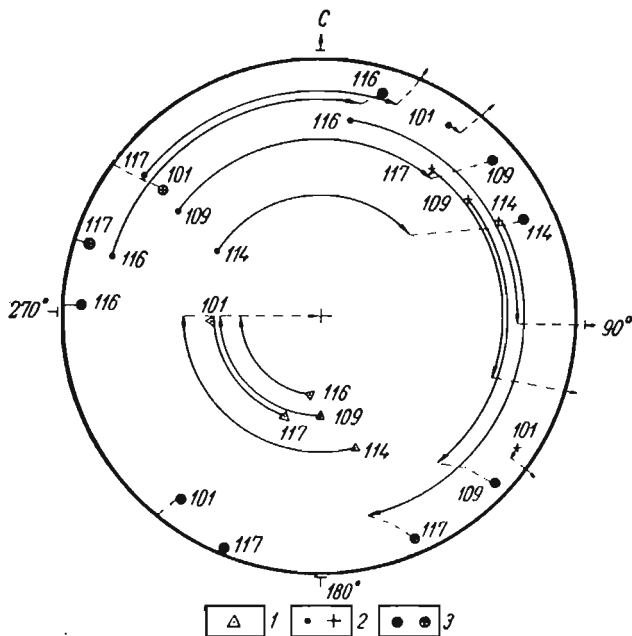


Рис. 10. Приведение слоев к горизонту по методу И. В. Кирилловой — В. Д. Скарятин на сетке Вальтера-Шмидта

1 — полюсы слоистости; 2 — центры максимумов двух систем трещин до приведения; 3 — то же после поворота и приведения к горизонту. Сплошные линии — траектории точек при повороте по азимуту, пунктирные — траектории точек при приведении к горизонту. Числа на диаграмме — номера обнажений

структуры к одному и тому же азимуту (безразлично какому) и приведения к горизонту. Эти системы трещин генетически связаны со складкообразованием.

3. Системы, одинаково или по-разному ориентированные на разных элементах складки, после приведения слоев к горизонту (а также и после поворота азимутов и приведения) «разбегаются». Эти трещины возникли в уже консолидированном массиве и связаны с разломами.

Жесткая связь ориентировки трещин с ориентировкой слоя является основной закономерностью ориентировки соскладчатых трещин. Кроме того, в работах Горина и Везириной (1957) и Раца (1962) приводятся данные о влиянии мощности слоев на ориентировку

трещин. В неравномернослоистых толщах складчатые трещины располагаются зачастую перпендикулярно слоистости в сравнительно тонких (до 0,5 м) слоях и под острым углом к слоистости в мощных слоях. В мощных слоях происходит как бы «раздвоение» систем трещин (рис. 11). При этом в координатах слоя меняется лишь угол трещин, простирание же остается неизменным. Это явление вынуждает при прочих равных условиях изучать три системы трещин вместо

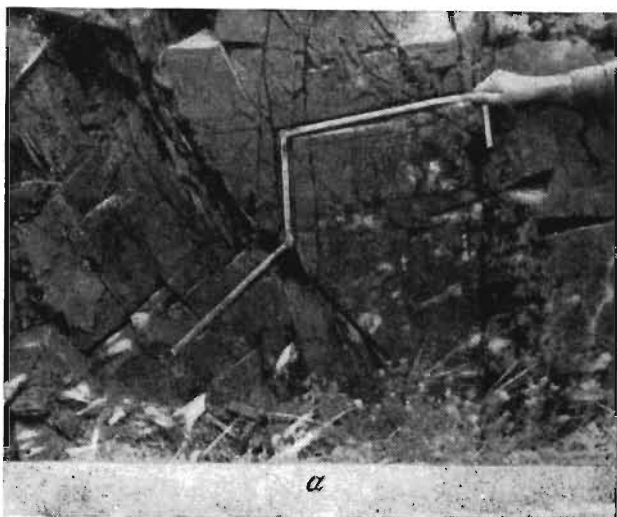
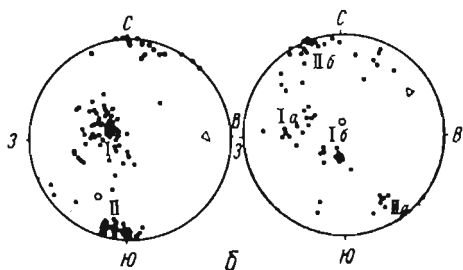


Рис. 11. Раздвоение систем складчатых трещин в мощных слоях

а — фотография обнажения, б — диаграмма трещиноватости (слева для сравнения дана диаграмма с нераздвоенными системами)



одной, однако учитывать его возможность необходимо, так как в противном случае «лишние» максимумы на диаграмме могут быть неверно интерпретированы. Природа «раздвоения» систем пока не ясна.

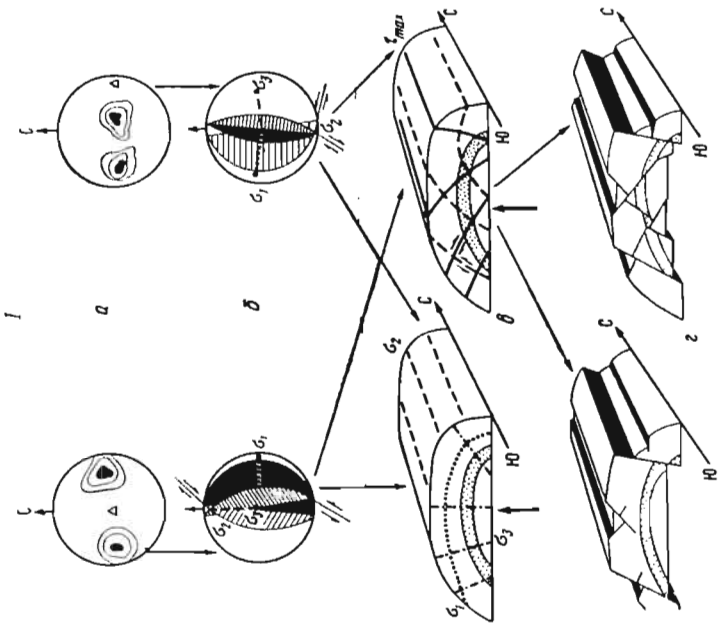
В мощных относительно жестких слоях появляется и еще одна система складчатых трещин, отсутствующая в тонких. Это система параллельных напластованию (согласных) трещин. Согласно трещины в отличие от диастром имеют ограниченную протяженность и располагаются в слое кулисообразно. Эти трещины, по-видимому, компенсируют невозможное внутри мощного слоя межпластовое

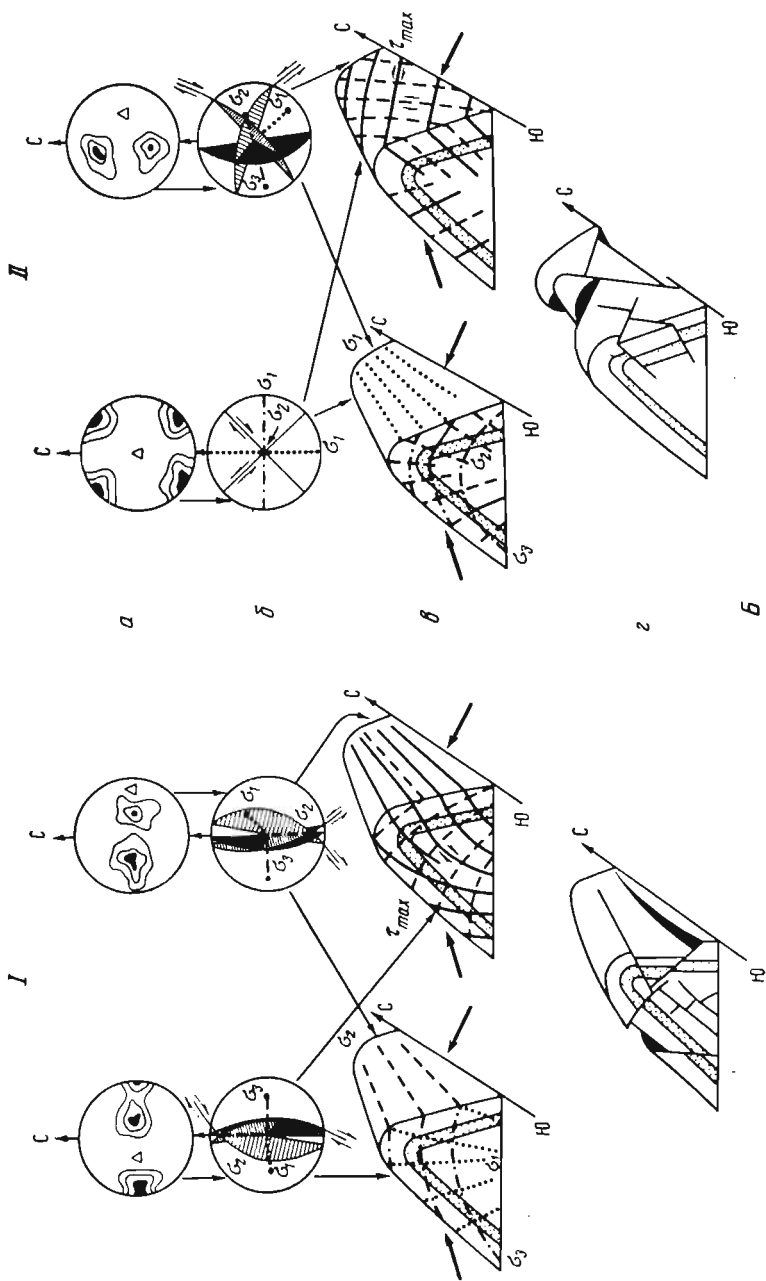
проскальзывание, происходящее в тонкослоистых пачках по диастромам.

Ориентировка складчатых трещин зависит при прочих равных условиях еще и от литологического состава слоев. В относительно более мягких (пластичных) породах трещины ориентируются под более острым углом к напластованию.

В простейшем случае складчатые трещины в однородной тонкослоистой толще образуют две сопряженные системы, ориентированные примерно под прямым углом к напластованию и друг к другу. Наложение перечисленных осложняющих факторов может привести к тому, что в более сложно построенном разрезе (слои разного состава и разной мощности) при прочих равных условиях будет наблюдаться уже не две, а более (до 6—8) систем трещин. Поэтому при генетической интерпретации диаграммы трещиноватости необходимо учитывать влияние на ориентировку трещин указанных факторов. Это особенно важно, если учесть, что при изменении ориентировки поля напряжений в ходе складкообразования могут образоваться не две, а более «основных» систем складчатых трещин. Основные схемы формирования мелких трещин и разрывов в ходе складкообразования и соответствующие им поля напряжений показаны на рис. 12.

Густота складчатых трещин определяется теми же факторами, что и их ориентировка, а именно: полем напряжений, мощностью





Продолжение рис. 12, IV

слоев, свойствами пород. В неизменном поле напряжений складчатые трещины сгущаются в более мягких породах и в более тонких слоях (Кириллова, 1949). Зависимость густоты складчатых трещин от мощности слоев, как установлено Л. Д. Кнорингом (1965), по своей форме не отличается от той же зависимости, выявленной ранее для общих трещин. В обоих случаях расстояние между соседними трещинами одной и той же системы возрастает замедленно по параболическому закону с ростом мощности слоев. При прочих равных условиях, как установил Кноринг, густота трещин возрастает при переходе к областям более интенсивной складчатости.

Приразрывные трещины

Приразрывные трещины обычно интерпретируются как опережающие, т. е. возникшие при смещении вдоль поверхности основного разлома. Однако, как было показано М. М. Тетяевым (1940) и М. В. Гзовским (1956, 1960), тектонические разрывы возникают не на «пустом месте», а формируются путем роста, сгущения и слияния существовавших ранее мелких трещин, именуемых «опережающими» (Рац, 1966б). Опережающие трещины опережают разрыв не только во времени, но и в пространстве, развиваясь по простиранию и падению разрыва дальше, чем прослеживается сместитель основного разрыва. Для опережающих трещин характерно



Рис. 13. Смещение пород по зоне опережающих трещин (каменноугольные известняки Ферганского хребта в долине р. Нарын)

развитие их группами, внутри которых густота трещин повышена, а трещины расположены кулисообразно. Как в плане, так и в разрезе опережающие трещины образуют локальные линейно вытянутые зоны, вдоль которых наблюдается небольшое смещение пород (рис. 13). Это смещение обычно складывается из незначительных смещений по отдельным трещинам и локальной пластической деформации пород внутри зоны. Такие зоны могут интерпретироваться двояко: либо как признак существования разлома, не выходящего на поверхность земли (пространственное опережение), либо как следствие так и не закончившегося процесса формирования разрыва на том месте, где наблюдается зона трещин (опережение во времени). Иногда опережающие трещины могут быть диагностированы и в случае выхода сместителя основного разрыва на поверхность. Такая ситуация имеет место

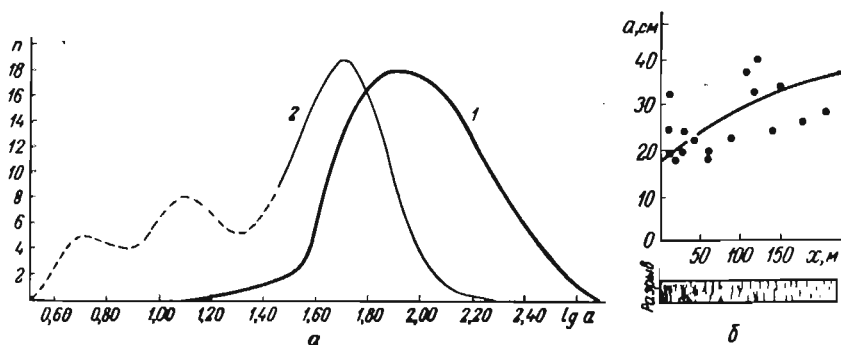


Рис. 14. Густота опережающих трещин в нижнемеловых красноцветах на участке строительства Нурекской ГЭС

a — гетерогенное распределение расстояний между опережающими трещинами; b — изменение густоты опережающих трещин по мере приближения к разрыву

в верхнемеловых красноцветах на северо-западном крыле Кизойской синклинали, где располагаются выходные порталы строительных туннелей Нурекской ГЭС. Одна из систем складчатых трещин резко сгущается здесь вблизи разрыва, параллельного этой системе и образует овальные зоны сгущения, вытянутые вдоль разрыва. Исследование густоты трещин этой системы позволило выявить особенности опережающих трещин (Рац, 1966б). Для них характерно (в отличие от складчатых трещин) гетерогенное распределение расстояний между трещинами, отражающее расположение трещин группами (рис. 14). Подробнее эти особенности будут рассмотрены в следующей главе в связи с проблемой формирования разрывов.

Сходные морфологически, но более крупные зоны повышенной трещиноватости описаны в работах Радкевич, Томсона и Горлова (1956), Радкевич, (1960), Томсона (1964), Скарятин (1964). Эти исследователи рассматривают вытянутые на десятки и сотни километров зоны (пояса) повышенной трещиноватости горных пород, имеющие несколько километров в ширину, как поверхностное отра-

жение крупных разломов, сместители которых не достигают поверхности земли * (рис. 15). Механизм формирования таких зон пока не ясен. Весьма вероятно, что наряду с опережающими трещинами и относительно мелкими разрывами в их образовании существенную роль играет механизм «отражения» трещин в перекрывающих пластах. Закономерности развития трещин внутри поясов повышенной трещиноватости изучены недостаточно. Согласно Томсону для опережающих трещин наблюдается примерно такое же распределение трещин, как и охарактеризованное выше. Меняются только масштабы. «При средней ширине поясов нарушений 5 км отдельные зоны параллельных мелких трещин прослеживаются на расстоянии до 1—5 км при ширине 50—20 м» (Томсон, 1964, стр. 121). Скарятин помимо перечисленных указывает на следующие особенности таких зон: отсутствие или слабое развитие в них крупных разрывов, проявление посторогенных молодых тектонических движений, независимость от пересекаемых складчатых структур, интенсификация соскладчатых и других систем трещин, генетически не связанных с самой зоной. В изверженных горных породах трещины, называемые нами опережающими, имеют примерно те же особенности (Lundgren, 1927; Cloos, 1936; Мониц, 1957; Burnett, 1963; Вознесенский и Перекалина, 1965).

Лучше всего изучены опережающие трещины разрывов. Опережающие трещины располагаются обычно по обе стороны от сместителя разрыва в полосе, ширина которой тем больше, чем крупнее основной разрыв. По мере удаления от разрыва густота этих трещин уменьшается и постепенно они исчезают. Основная закономерность ориентировки опережающих трещин, изучавшаяся Даниловичем (1951, 1961), Вольфсоном (1953), Будько (1958), была наиболее четко сформулирована последним; линии пересечения опережающих трещин друг с другом и с плоскостью сместителя разрыва параллельны друг другу и перпендикулярны направлению смещения крыльев разрыва. Таким образом, по своей структуре оперения сдвигов, сбросов, надвигов и т. п. идентичны и отличаются только ориентировкой в

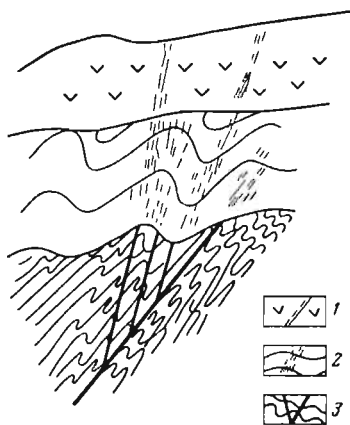


Рис. 15. Изменение характера трещин по мере развития их вверх по разрезу и во времени (Приморье) по Е. А. Радкевич

1 — единичные разрывы, пробивающиеся в верхний структурный этаж — слабо дислоцированные эффузивы верхнего мела; 2 — зоны мелкой трещиноватости, проявленные в верхнепалеозойских и мезозойских отложениях над глубже расположенными разломами фундамента; 3 — крупные разломы фундамента — надвиги

* Одна из таких зон проходит, между прочим, в непосредственной близости от строящейся Чиркейской ГЭС на р. Сулак в Дагестане (Скарятин, 1964).

пространстве. Схема оперения представлена на рис. 16, а, где выделяются три характерные системы трещин:

1. Трещины скалывания, параллельные сместителю разрыва (первая система скалывания).

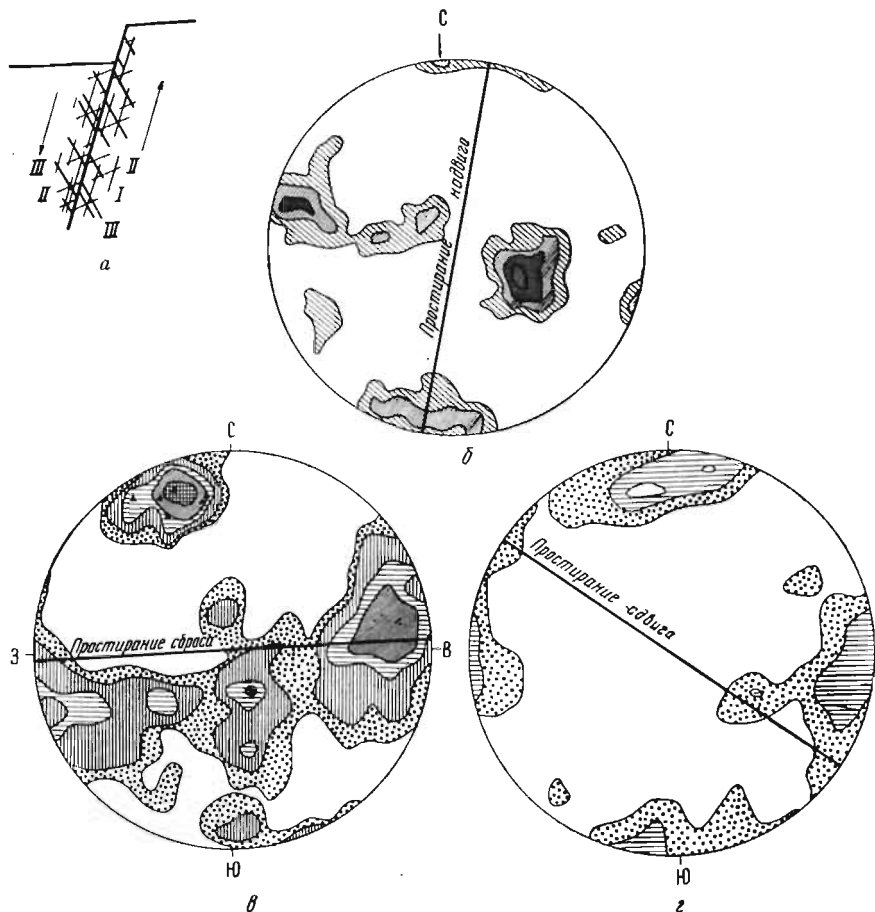


Рис. 16. Закономерности ориентировки приразрывных трещин

а — схема расположения трещин в крыльях разрыва (по В. М. Будько): I — трещины первой системы скалывания; II — трещины второй системы скалывания; III — трещины системы отрыва; б — оперение надвига в гранитах (район Рогунской ГЭС); в — оперение сброса в известняках (створ Токтогульской ГЭС); г — оперение Таласо-Ферганского сдвига в гранитах (посвал Кок-Бель в Ферганском хребте)

2. Трещины скалывания, наклоненные к плоскости сместителя в направлении перемещения (вторая система скалывания).

3. Трещины отрыва, наклоненные под углом 45° к плоскости сместителя в направлении, обратном направлению перемещения (система отрыва):

В. Н. Данилович выделяет еще «полярные» трещины, характерные для надвигов и расположенные перпендикулярно сместителю вдоль направления смещения.

Оперяющие системы трещин образуют характерные «пояса» на диаграммах трещиноватости, проходящие через полюс сместителя разрыва. Если ориентировка сместителя известна, вид пояса позволяет установить тип смещения по разрыву. Пояса сбросов, взбросов и надвигов проходят через центр сетки. Пояса сбросо-сдвигов, сдвиго-надвигов, взбросо-сдвигов занимают промежуточное положение. Характерные диаграммы трещин оперения приведены на рис. 16, б, в, г.

Изучение трещинного оперения разрывов позволяет установить также и направление перемещения. Методика этой оценки изложена в статье М. В. Будько (1958).

Планетарные (общие) трещины

Планетарные (Шульц, 1964), или общие (Белоусов, 1954), трещины пользуются чрезвычайно широким распространением, образуя (наряду с диастромами) «фон трещиноватости» осадочных пород на платформах. Эти трещины давно изучаются на Русской и Северо-Американской платформах (Parker, 1942; Шатский, 1945; Новикова, 1952; Пермяков, 1946 и др.), однако происхождение их до этого времени остается загадкой.

Общие трещины обладают следующими особенностями (Шатский, 1945; Новикова, 1951; Шульц, 1964; Рац, 1962).

1. Трещины развиты как в дислоцированных, так и в горизонтально залегающих осадочных породах; как в складчатых областях, так и на платформах.

2. В каждой точке земной поверхности трещины образуют две взаимно перпендикулярные системы, ориентировка которых меняется по площади. Так, для Русской платформы характерны ортогональная (С — Ю, В — З) и диагональная (СВ — ЮЗ, СЗ — ЮВ) ориентировки.

3. Системы общих трещин прослеживаются по разрезу платформенных отложений от докембрия до третичных отложений. Ориентировка их остается при этом неизменной, а густота вверх по разрезу уменьшается (Hodgson, 1965).

4. Общие трещины не приурочены к каким-либо тектоническим структурам.

5. Трещины лучше выражены в плотных породах, в которых они обычно перпендикулярны слоистости. Трещины, как правило, не выходят за пределы одного слоя (внутрислойные).

6. Наблюдается отчетливая зависимость густоты общих трещин от мощности разбитых ими слоев.

Последняя зависимость изучена А. С. Новиковой (1952) и М. В. Рацем (1962, 1963), показавшими, что среднее расстояние

между трещинами возрастает с ростом мощности слоев по параболическому закону (рис. 17) и удачно аппроксимируется формулами вида

$$a = bM^k,$$

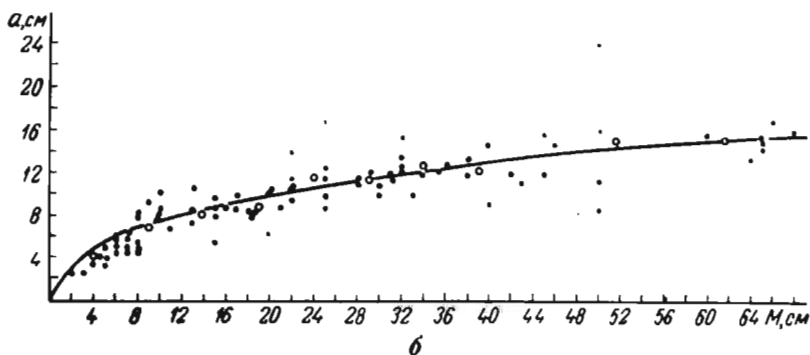
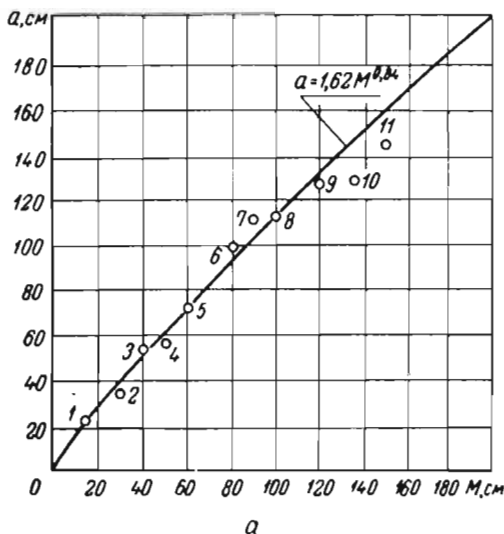


Рис. 17. Графики зависимости среднего расстояния между трещинами от мощности слоев (по М. В. Рацу)

a — в каменноугольных известняках Русской платформы (по данным А. С. Новиковой);
б — в песчаниках ордовика (Центральный Казахстан).

где *a* — расстояние между соседними трещинами в системе;
M — мощность слоя;
b и *k* — константы, оцениваемые эмпирически*.

* Эта же аппроксимация была позже использована Кноррингом при изучении складчатых трещин.

§ 9. Экзогенная трещиноватость

Решетка трещин у поверхности земли претерпевает изменения. Главными причинами изменений можно считать: 1) разгрузку выведенных на поверхность горных пород от давления пород, соседствовавших с ними и разрушенных денудацией; 2) выветривание; 3) инженерную деятельность человека.

Ниже рассмотрим трещины разгрузки, трещины выветривания и искусственные трещины в соответствии с этими основными причинами развития экзогенной трещиноватости.

Трещины разгрузки

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, вообще говоря, могут возникать трещины (Griggs, 1936), для которых в последнее время в отечественной литературе предложены названия трещин отпора, бортового (Лыкошин, 1953) и донного (Бондарик, 1959).

Поскольку время релаксации напряжений в литифицированных горных породах имеет величину порядка сотен и тысяч лет (Гутенберг, 1963; Магницкий, 1966), а время, потребное для эрозии и денудации мало-мальски значительной толщи пород, значительно больше, трудно ожидать, чтобы запас упругой энергии в выведенных на дневную поверхность массивах был велик. Следовательно, обусловленное им растрескивание должно быть связано с сильной концентрацией напряжений в отдельных местах. Практически это значит, что маловероятно образование трещин разгрузки в массиве, лишенном до этого трещин. Скорее следует ждать разрастания трещин, ранее существовавших (петрогенетических или тектонических).

Как сейчас представляется, в результате разгрузки в первую очередь наблюдаются изменения параметров трещиноватости в системе трещин примерно параллельной поверхности земли (которая не обязательно горизонтальна). Часто эти изменения затрагивают только ширину трещин, не касаясь других параметров трещиноватости. Такое развитие процесса разгрузки приходилось наблюдать авторам на Усть-Илимской (Чернышев, 1965) и Токтогульской ГЭС (Количко, Рац, 1966). Однако обычно 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; Про-

чухан, 1964). По мере приближения к поверхности земли, видимо, возрастает не только среднее значение ширины трещин, но и дисперсия ширины. Рост дисперсии ширины трещин наблюдается, в частности, в трапах на Усть-Илимской ГЭС (рис. 18).

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. Развитие разуплотнения идет, главным образом, за счет дальнейшего расширения трещин, оживших первыми. Именно в результате этого растет дисперсия ширины трещин. О росте неоднородности трещиноватого массива, в частности фильтрационной, в результате разгрузки писал Д. С. Соколов (1962). Рост фильтрационной неоднородности изверженных массивов был позднее подтвержден статистической обработкой результатов фильтрационного опробования массивов различных изверженных пород (Чернышев, 1966). Неоднородность других физических свойств массива, зависящих от трещиноватости в зоне разгрузки, также возрастает (Рац, 1968).

Изменение ширины и густоты трещин в системах, не параллельных поверхности земли, часто практически незаметно.

Изменение ширины Δa и расстояния между трещинами a по системам в каменноугольных известняках на Токтогульской ГЭС (данные А. В. Количко, М. В. Раца) приведены в табл. 7.

Таблица 7

Глубина от устья штольни, м	Система 1		Система 2		Система 3	
	a , см	Δa , мм	a , см	Δa , мм	a , см	Δa , мм
0,0—5,0	15	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

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.

Видимо, редко процесс разгрузки 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; затем простирание примерно параллельно поверхности земли и, наконец, зияние или заполнение злювием и даже четвертичными образованиями другого генезиса.

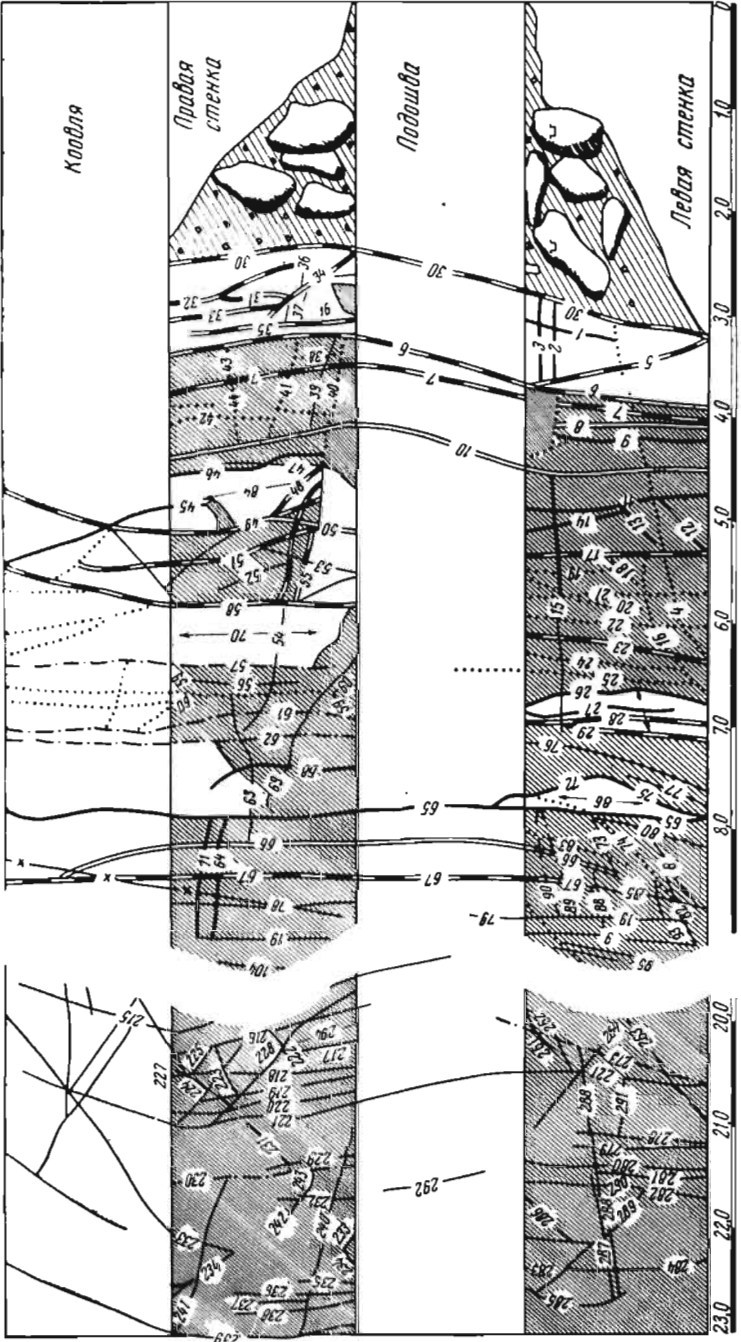
Глубина, на которую распространяется разуплотнение массива в результате разгрузки, показана в табл. 8, составленной по данным обработки массовых фильтрационных испытаний, мощность зоны разгрузки на Русской и Восточно-Сибирской платформах колеблется в пределах первых десятков метров. Причем для слабых пород и для участков относительно активных поднятий мощность зоны разгрузки выше, чем для пород более прочных, залегающих на участках менее активных поднятий.

Т а б л и ц а 8

Район	Породы	Мощность зоны разгруз- ки, м	Источник
Днепрогэс	Граниты	15	Саваренский, 1938
Кременчугская ГЭС	»	15	Конярова и Нейштадт, 1963
Украина	Гранито-гнейсы	30	То же
Башкирия	Известняки	30	Лыкошин, 1957
Братская ГЭС	Траппы	30	Бондарик, 1959
Усть-Илимская ГЭС	»	30	Чернышев, 1965
Красноярская ГЭС	Граниты	25	Конярова и Нейштадт, 1963
Братская ГЭС	Песчаники и алевролиты ордовикской системы	30	Тиздель, 1962
Усть-Илимская ГЭС	Песчаники и алевролиты каменноугольной системы	50	Чернышев, 1966

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.

а



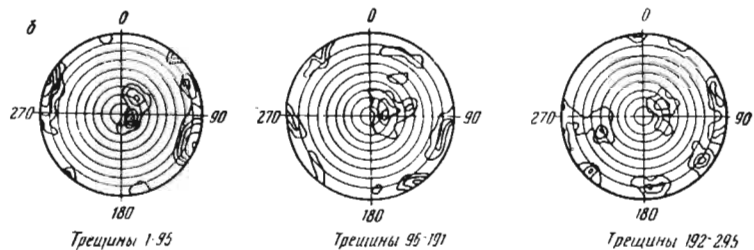
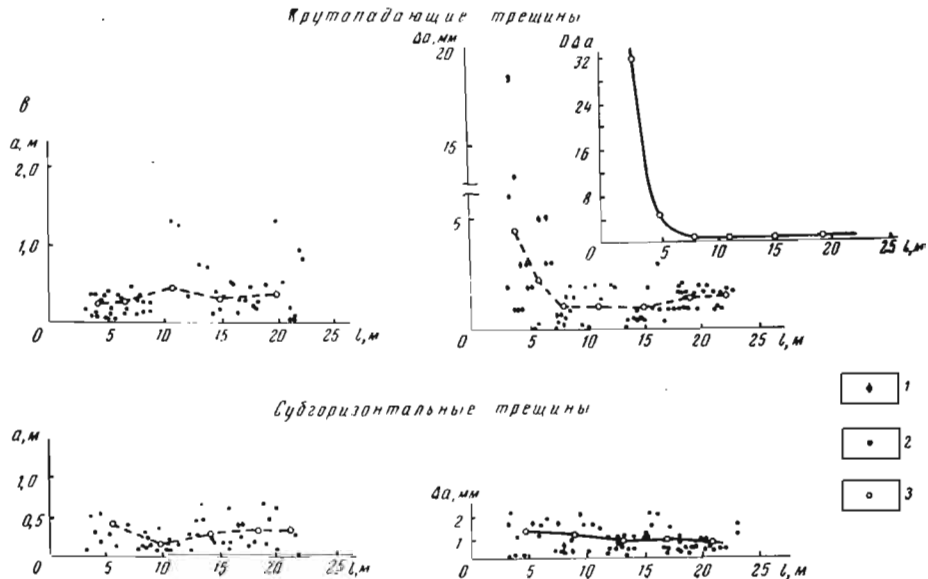


Рис. 18. Трещиноватость трапфов Толстомысовской интрузии по наблюдениям в штольне

a — зарисовка трещиноватости в штольне. 1 — суглинок со щебнем и валунами долерита; 2 — трещины открытые; 3 — трещины, заполненные суглинком; 4 — трещины, заполненные окислом железа; 5 — трещины, заполненные кальцитом; 6 — трещины, заполненные хлоритом; 7 — закрытые трещины; 8 — рваная поверхность на стенке штольни; 9 — поверхность отдельности на стенке штольни. *b* — диаграммы ориентировки трещин на сетке Вальтера-Шмидта. *в* — графики изменения расстояния между трещинами (*a*), ширины трещин (Δa) и дисперсии ширины трещин ($D\Delta a$) по глубине штольни (*l*). 1 — индивидуальные значения параметров трещин со следами выветривания; 2 — то же без следов выветривания; 3 — поинтервальные средние значения параметров



- 1
- 2
- 3

Трещины выветривания

Среди геологических процессов, формирующих трещиноватость горных пород, немного таких, которые были бы легко доступны для наблюдения. Выветривание составляет в этом смысле исключение: оно протекает на наших глазах у поверхности земли и иногда весьма быстро. «Тем не менее сколько-нибудь значительных работ по изучению трещин выветривания нет» (Соколов, 1962, стр. 176).

Выветривание сильно изменяет решетку трещин в горной породе. Оно ведет к расширению существующих трещин, к сгущению их в существующих системах и к образованию новых, часто многочисленных трещин своеобразной ориентировки. Выветривание, так же как и разгрузка, развивается по решетке существующих трещин (Коломенский, 1952; 1960), т. е. избирательно, унаследованно. В результате в ходе выветривания нарастает неоднородность массива. С одной стороны, в зоне выветривания имеются очень широкие трещины, заполненные глинистыми продуктами выветривания, с другой — рядом находятся почти 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 же в стороны по более мелким и так далее. 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) выделить четыре горизонта, или зоны: 1) монолитную, 2) глыбовую, 3) мелкообломочную и 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.). Какова же трещиноватость в названных четырех зонах.

Монолитная зона, самая нижняя, сложена породами, не измененными выветриванием. Здесь выветривание проявляется только в раскрытии первичных и тектонических трещин, результаты его трудно отличить от результатов разгрузки. Лишь изредка по отдельным трещинам здесь наблюдается выветривание заполнителя (Рац, 1963б).

В глыбовой зоне, расположенной выше, выветривание отчетливо проявляется в разрушении заполнителя трещин и стенок трещин.

В мелкообломочной зоне наблюдается активный рост специфических трещин выветривания, которые разбивают массив на блоки различного размера и прихотливой формы. Эти трещины ветвятся, изгибаются, пересекаются и образуют на первый взгляд бессистемную решетку. Однако в действительности эта решетка построена определенным образом (Коломенский, 1952). В разных породах она различна: «В андезитовых лавах Закарпатья в резуль-

тате выветривания образуются шаровые отдельности. Лёссы образуют при выветривании характерные столбчатые отдельности. Известняки Крымской Яйлы при выветривании обнаруживают стремление распадаться на крупные горизонтальные плиты. Глины оксфордского яруса (Москва) разбиваются в основном системой горизонтальных трещин на ряд средних и мелких плоских кусков, несколько неправильной формы» (Коломенский, 1952, стр. 22). Вообще, структура решетки трещин выветривания определяется структурой массива и структурой слагающих его пород, а также составом и активностью агентов выветривания.

В зоне тонкого дробления происходит разрушение породы на отдельные кристаллические зерна и разложение минеральных зерен. На этом этапе выветривания трещины кольматируются. По мере превращения породы в элювий различие по физическим свойствам между заполнителем трещин и материалом стенок сглаживается и трещины в принятом нами понимании исчезают.

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.

Искусственные трещины

В традициях отечественной геологии (В. И. Вернадский) и инженерной геологии (Ф. В. Котлов) рассматривать инженерную деятельность человека как самостоятельный важный фактор преобразования геологической среды. Следуя этой традиции, мы выделяем под названием искусственных трещины, образующиеся в горных породах в ходе инженерной деятельности человека. Искусственные трещины возникают под действием взрывов, вследствие развития процессов разгрузки и выветривания в обнаженных искусственно породах. Все они имеют аналогию среди трещин, образованных естественным путем*.

Механизм образования искусственных трещин разгрузки и выветривания совершенно такой же, как механизм образования соответствующих естественных трещин. Очень важно, что они, как и естественные трещины, развиваются унаследованно, т. е. растут по подготовленным плоскостям (Kieslinger, 1958). 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

* Естественные трещины взрыва встречаются, видимо, крайне редко, однако они описаны в литературе (Невский, 1960).

деталей архитектурных сооружений, постаментов и, наконец, самих каменных изваяний.

Трещины, возникающие при разгрузке массивов горных пород в ходе инженерной деятельности человека, в особенности при проходе котлованов, имеют очень большое практическое значение. Очевидно, с возникновением этих трещин связана была проблема «бухтения» скалы * в котловине Братской ГЭС, осложнения в ходе строительства Вилюйской ГЭС и др. Не исключено, что с относительно быстрой разгрузкой массива от естественных напряжений связано и явление горного удара.

Трещины взрыва, как и другие экзогенные трещины, развиваются преимущественно наследуя поверхности ослабления, уже существующие в массиве. После взрыва в массиве горных пород обычно расширяются и сгущаются трещины в существующих системах (Невский, 1961). Даже при разрушении массива, если породы обладают достаточной прочностью (ориентировочно $\sigma_{сж} > 700 \text{ кг/см}^2$) 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. При взрыве сосредоточенного заряда радиус трещинообразования (Кушнарев и Пахомов, 1959) равен

$$r_{тр} = 0,62 \sqrt[3]{K \cdot Q_{зар}},$$

где $Q_{зар}$ — вес заряда, кг;

K — коэффициент, зависящий от крепости породы.

Согласно В. К. Рубцову (1963) при взрывах линейных зарядов в скважинах системы естественных трещин экранируют массив от влияния взрывов. По мере удаления от бровки (карьера, котлована и т. п.) ширина заколов (Δa) уменьшается по гиперболическому закону

$$\Delta a = a \left(\frac{1}{L} \right)^n,$$

где L — расстояние от верхней бровки уступа. Глубина проникновения заколов при этом пропорциональна их ширине.

Инженерно-геологическое значение взрывных трещин может быть весьма существенным. Так, по данным Ф. Маковека (Macovec, 1962), при производстве взрывных работ в котловане ГЭС Ибс-Перзенбейг 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. Этот эффект, по-видимому, вызван совместным действием возникновения новых (собственно взрывных) трещин и приоткрытием естественных трещин, существовавших в массиве ранее.

* При вскрытии котлована Братской ГЭС качество породы перед укладкой бетона проверялось по звуку при ударе молотком. Было замечено, что вскоре после вскрытия «звонкая» порода начала «бухтеть» — издавать глухой звук, свидетельствующий о возникновении полостей.

§ 10. Кливаж

Кливажем принято называть делимость горных пород по системе очень частых (от долей *мм* до первых *см*) субпараллельных плоскостей, не совпадающих с поверхностями напластования.

Хотя по формальному определению понятия «трещина» (см. главу 1) эти поверхности делимости могут быть отнесены к трещиноватости, часто рассматривают это явление как «особую структурную форму» (Белевцев и Тохтуев, 1960).

Кливаж показывает явную связь с литологией и тектоническими условиями: он встречается только в интенсивно дислоцированных осадочных и метаморфических породах, характерен для глинистых пород (сланцы) и практически не встречается, например, в чистых кварцитах (Фурмарье, 1937).

Существует довольно много геометрических классификаций кливажа. Это связано с тем, что в отличие от трещин поверхности кливажа ориентируются далеко не всеми возможными способами относительно складок и слоистости. Поэтому возникают некоторые разночтения. На рис. 19 приводится геометрическая классификация кливажа И. В. Кирилловой (1949, 1962).

Установлено, что простирание кливажа существенно более выдержано, чем простирание складчатости. При этом на замыканиях складок кливаж сечет слои вкрест простирания. Углы падения кливажных поверхностей более изменчивы, но тесно связаны с наклоном осевых поверхностей складок. При этом углы падения кливажных поверхностей, как правило, круче, чем углы падения слоистости (Лизс, 1934; Кириллова, 1949, 1962).

На основании многолетних исследований П. Фурмарье (Fourmarier, 1951) установил, что кливаж фиксируется только в тех толщах, которые в ходе своей истории побывали на глубинах не менее 5—6 км от поверхности земли. При этом Фурмарье вслед за Ч. К. Лизсом различает кливаж течения, связанный со структурными преобразованиями самой породы (параллельное расположение кристаллитов в породе), и кливаж разлома — без видимых изменений в структуре породы. Согласно Фурмарье зона кливажа разлома сменяется по глубине зоной кливажа течения. Еще глубже располагается зона глубоких метаморфических преобразований. С глубиной уменьшается угол кливажных поверхностей со слоистостью.

При этом существенное влияние на развитие кливажа оказывает литология, в результате чего возникновение кливажа оказывается как бы избирательным, а различные его формы в разных породах могут наблюдаться одновременно. Эту ситуацию подробно анализирует Кириллова (1962, стр. 80): «если на одном участке развито несколько типов кливажа, то обычно обратный веерообразный кливаж приурочен к породам менее пластичным, а к породам более пластичным — прямой веерообразный, или же главный, т. е. параллельный осевым поверхностям складок. При этом прямой веерообразный кливаж встречается при малых мощностях пластичного

слоя или пачки, несоизмеримых с мощностями пластов более жестких, а главный кливаж — в том случае, когда эти мощности соизмеримы или при значительно больших мощностях пластичного слоя».

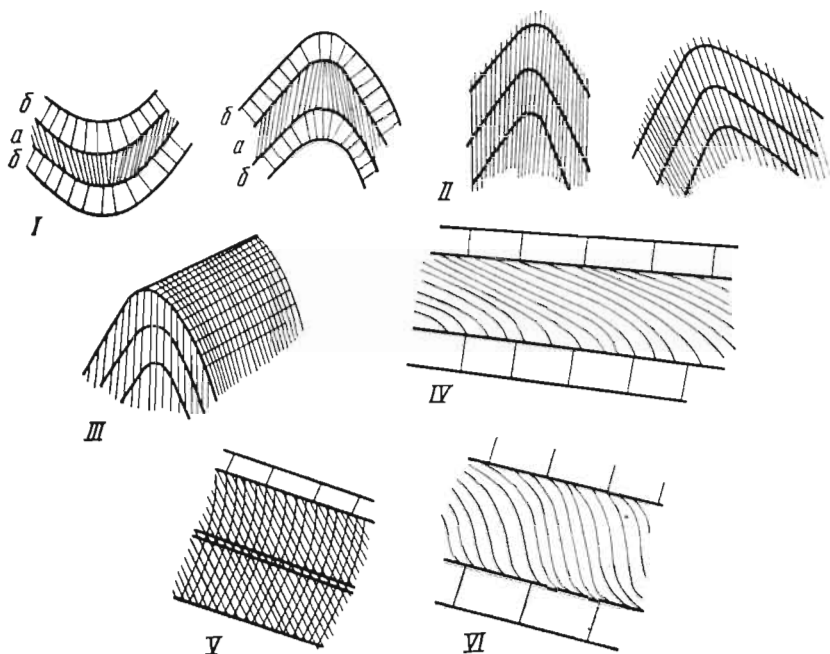


Рис. 19. Геометрическая классификация кливажа (по И. В. Кирялловой)

I — веерообразный: а — прямой, б — обратный; II — параллельный осевой поверхности (главный); III — параллельный осевой поверхности (главный) и поперечный. Искривления поверхности кливажа: IV — постепенные, связанные с изменением литологического состава слоя; V и VI — резкие, обусловленные последующими движениями по плоскостям напластования

По степени развития кливажа породы могут быть расположены в следующей последовательности (в порядке убывания интенсивности кливажа): глинистые породы → глинистые пелитоморфные известняки → мергели и глинистые песчаники → известковые песчаники и крупнокристаллические известняки. Существенно, что та же последовательность отмечается по степени изменения мощностей от крыльев к замкам складок.

М. А. Гончаров (1963), изучавший кливаж в терригенных породах верхнего девона в Зилаирском синклинии на Урале, установил, что такие важнейшие характеристики кливажа, как величина угла кливаж — слоистость и густота кливажных поверхностей, зависят от гранулометрического состава пород: в более тонкозернистых породах угол кливаж — слоистость уменьшается, а густота возрастает. Гончаров считает также, что точно так же эти характеристики ведут себя и в ходе складкообразования (во времени).

Исключительно интересны соотношения кливажа с тектонической трещиноватостью и разрывами (Кириллова, 1949, 1962). Разрывы секут раскливажированные толщи, не обнаруживая никакой связи ни с ориентировкой, ни с густотой кливажных поверхностей. Так называемый «приразрывной кливаж», выделенный А. Е. Михайловым (1956), образует лишь узкие зоны вдоль разрывов и отмечается далеко не всегда. Тектонические трещины тоже, как правило, секут кливаж и располагаются при этом в 10—100 раз реже, чем кливажные поверхности. Число систем трещин всегда больше, чем число кливажных поверхностей (последних бывает не более 2—3 в каждой точке). Иногда в менее пластичных слоях наблюдаются системы трещин, параллельные системам кливажа в пластичных слоях. Это характерно для поперечного и обратного веерообразного кливажа и не характерно для прямого веерообразного, трещинных аналогов которого не наблюдалось.

По поводу происхождения кливажа высказывались самые разнообразные, в том числе и диаметрально противоположные, точки зрения (Кириллова, 1962; Белевцев и Тохтуева, 1960).

Приведенные выше факты могут быть интерпретированы как доводы в пользу кливажа с пластическим течением вещества горных пород. В пользу этой точки зрения говорит также указание Э. Клооса о том, что кливаж проявляется в случаях, когда удлинение оолитов достигает 20% и более (Cloos, 1947), об этом же свидетельствуют эксперименты Кирилловой (1962). Наконец, Максвелл (Maxwell, 1962) приводит поразительный материал, из которого видно, что в толще переслаивающихся песчаников и сланцев песчаный материал оказывается «затянутым» в сланцы по поверхностям кливажа.

Таким образом, кливаж оказывается результатом движений переходных между непрерывной («плавной») и дискретной (разрывной) формами движения вещества горных пород в ходе складкообразования (Тетяев, 1934; Хаин, 1954).

ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

§ 11. Макроскопические теории деформации и разрушения

Математическая теория трещин

Основные макроскопические представления о деформации и разрушении многократно излагались в геологической литературе, в том числе и учебной. Поэтому здесь мы ограничимся лишь несколькими замечаниями. Для решения задач, связанных с поведением деформируемых тел под нагрузкой, в классической механике используется ряд допущений (постулатов) общего характера. В частности, полагают, что деформируемая среда является сплошной и однородной. Между тем известно, что механизм деформации и разрушения твердых тел существенно связан именно со структурой вещества. Эту связь мы далее будем рассматривать подробно. Поэтому модели, используемые в механике сплошных сред, по необходимости исключают возможность описания физического механизма деформации и разрушения. Соответствующие теории (упругости, пластичности, ползучести) являются поэтому макроскопическими феноменологическими теориями. Это положение ограничивает возможности использования классических теорий механики сплошных сред при изучении тектонических процессов.

Аналогичный характер носят и так называемые классические теории прочности. Так, первая из этих теорий исходит из предположения, что разрушение материала при растяжении или сжатии происходит тогда, когда наибольшее нормальное напряжение достигает некоторой критической величины. Согласно второй теории разрушение наступает по достижении критического значения главными относительными удлинениями. Третья теория основывается на гипотезе о том, что материал разрушается, когда критического значения достигают главные касательные напряжения. В геологии обычно пользуются теорией прочности О. Мора, связывающей нормальные и касательные напряжения в каждой точке тела. Согласно этой теории разрушение происходит тогда, когда касательные напряжения достигают критической величины, которая тем больше, чем больше сжимающие напряжения. Полезно отметить, что в общем случае решающих доводов в пользу какой-либо из теорий прочности (а их больше, чем здесь указано) нет. Каждая из них оказывается применимой лишь для определенных материалов и при решении лишь ограниченного круга задач.

Рассмотрим коротко основные особенности деформирования и разрушения, важные для анализа тектонических деформаций горных пород.

Деформация упругого тела, как известно, зависит только от его нагрузки в данный момент и не зависит от истории нагружения. Полагая, что деформация определяется историей нагружения (по

крайней мере, ближайшей предысторией), В. А. Магницкий (1953) приводит уравнение состояния тела Максвелла — модель упруго-вязкого релаксирующего тела, наиболее близкого по свойствам к горным породам в условиях тектонических деформаций

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma, \quad (5)$$

где ε — деформация;
 t — время;
 σ — напряжение;
 E — модуль упругости;
 η — вязкость.

Поведение тела Максвелла под нагрузкой обычно иллюстрируется механической моделью, состоящей из последовательно соединенных пружины (упругий элемент) и цилиндра с вязкой жидкостью, в которой перемещается поршень (вязкий элемент). Действительно, как легко видеть при $\eta \rightarrow \infty$, соотношение (5) обращается в обычный закон Гука, а при $E \rightarrow \infty$ в уравнение состояния вязкой жидкости. Применение линейного уравнения состояния (5) к решению задач геологии, вообще говоря, ограничено, так как на самом деле в горных породах связь между напряжениями и деформациями в условиях ползучести нелинейна. Тем не менее в ряде задач уравнение (5) дает удовлетворительные результаты.

Если зафиксировать величину деформации, то из выражения (5) легко получить

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_r}}, \quad (6)$$

где σ_0 — начальное напряжение в момент $t = 0$.

Величина $\tau_r = \frac{\eta}{E}$ называется временем релаксации. Физический смысл τ_r , очевидный из выражения (6), состоит в том, что за время τ_r напряжение в теле, деформация которого фиксирована, уменьшится в e раз.

Таким образом, тело Максвелла ведет себя как упругое, если время действия нагрузки намного меньше τ_r , и, наоборот, как вязкая жидкость, если время значительно больше τ_r . Величины τ_r и η экспоненциально возрастают с ростом всестороннего сжатия и экспоненциально убывают с ростом девиаторных напряжений*.

Модель тела Максвелла обладает одной особенностью, важной при анализе тектонических процессов, а именно: напряжения в этой модели зависят от скорости деформации. Действительно, для одномерного стержня, деформируемого с постоянной скоростью, напряжение выражается простой формулой (Ржаницын, 1968)

$$\sigma = \tau_r E \dot{\varepsilon}, \quad (7)$$

* Шаровой тензор объединяет ту часть напряжений, которая влияет лишь на объем деформируемого тела; девиатор напряжений, наоборот, включает лишь ту часть напряжений, с которой связано изменение формы тела.

где τ_0 — время релаксации по Максвеллу;

E — модуль мгновенной деформации;

w — постоянная скорость относительной деформации.

Из формулы следует, что в рассматриваемом простейшем случае напряжения в стержне пропорциональны скорости деформации.

При деформации твердых тел некоторая часть производимой при этом работы запасается в теле в виде упругой энергии (энергии упругой деформации). В случае одноосного сжатия или растяжения запас упругой энергии в единице объема тела

$$U = \frac{\sigma^2}{2E}. \quad (8)$$

В случае всестороннего сжатия вместо величины модуля Юнга E в формулу (8) надо подставить модуль всестороннего сжатия K .

Если удельная работа деформации превышает величину $U_{кр}$, тело начинает деформироваться пластически (либо разрушается). Пластическая энергоемкость материала зависит от его свойств и растет с увеличением температуры и всестороннего сжатия и с уменьшением скорости подвода энергии. С уменьшением пластической энергоемкости опасность макроразрушения резко возрастает (Фридман, 1960).

В механике (Прандтль, 1907 — см. Тимошенко, 1957, стр. 439) и в геологических приложениях (Белоусов, 1952; Гзовский, 1960 и др.) различают два вида разрушения: скол и отрыв. Разрушению путем скалывания под действием тангенциальных напряжений всегда предшествует пластическая деформация. Отрыв же в принципе может быть «почти» чисто хрупким (слово «почти» вызвано здесь тем, что вблизи контура растущей трещины всегда имеет место пластическая деформация, которая в случае хрупкого разрушения локализуется в очень узкой зоне). Тенденция к хрупкому или пластическому разрушению определяется соотношением шарового тензора и дивергатора напряжений, сопротивлением материала действию этих напряжений, скоростью деформирования и температурой: с ростом гидростатического давления, с увеличением температуры или уменьшением скорости деформации любой реальный материал имеет тенденцию к пластическому разрушению, в противном случае — к хрупкому. С ростом гидростатического давления прочность материалов возрастает по затухающему закону.

При решении задач, связанных с разрушением и анализом трещиноватости, в геологии давно и сравнительно успешно используются представления об эллипсоидах напряжений и деформаций. Эти представления позволяют изучать ориентировку трещин, но ничего не говорят ни о поведении индивидуальных трещин в деформируемой среде, ни о свойствах сетей трещин, с которыми всегда имеет дело геолог. Этот существенный недостаток объясняется не недостаточным использованием достижений классической механики в геологии, а органической недостаточностью самой классической теории: задачи, связанные с механизмом растрескивания представ-

ляют собой характерный пример тех задач механики деформируемых сред, которые для своего решения нуждаются в существенном внедрении физических представлений. Между тем «процесс слияния физики и механики в теории прочности твердых тел в настоящее время находится еще только в начальной стадии», что объясняется сложностью микроструктуры твердых тел и трудностями статистической физики в их описании (Седов, 1961, стр. 5). Характерным примером плодотворности введения физических представлений в механику является развивающаяся в последние годы математическая теория трещин, некоторые сведения о которой приводятся ниже.

В механике материалов принято выделять три стадии разрушения.

1. Образование дефектов равномерно по всему объему тела.

2. Сгущение дефектов из-за концентрации напряжений и объединение их в микротрещины.

3. Слияние микротрещин в систему макротрещин и развитие с наибольшей скоростью одной из макротрещин (называемой «магистральной») вплоть до полного разрушения тела.

Из сказанного понятно, почему теория трещин рассматривается в механике сплошных сред как математическая теория хрупкого разрушения. Хрупкий характер разрушения относится при этом к телу в целом, на контурах же растущих трещин и вблизи них существенный характер могут иметь процессы пластического деформирования. Трещина определяется как поверхность разрыва сплошной среды, т. е. как поверхность, на которой претерпевают разрыв нормальная или (и) касательная составляющие вектора смещения. В первом случае мы имеем дело с трещиной отрыва, во втором — с трещиной скола. В настоящее время почти все имеющиеся в теории трещин результаты относятся к плоским трещинам, под которыми подразумеваются «ограниченные замкнутыми кривыми (контурами трещин) куски плоскости», на которых претерпевает разрыв вектор смещений (Баренблатт, 1961, стр. 4).

В отличие от классической линейной теории упругости применительно к трещинам не выполняется предпосылка о малости изменения границ тела при нагружении (рис. 20). Поэтому задача о равновесии тела с трещинами нелинейна.

Основы теории трещин заложены в работах Гриффитса (Griffith, 1921, 1923), не потерявших значения до сего времени. Гриффитсом впервые был осуществлен последовательный энергетический подход к теории хрупкого разрушения. Он показал, что в зависимости от энергетического баланса трещины в нагруженном теле могут быть разделены на группы: развивающиеся и не развивающиеся без дополнительного подвода энергии извне. Причём расти без подвода энергии трещины могут лишь в том случае, если прирост поверхностной энергии тела будет компенсироваться соответствующим уменьшением энергии деформации.

Если в растягиваемой на бесконечности пластинке в условиях плоской деформации имеется трещина длиной l , то согласно Гриффитсу энергия деформации пластинки уменьшается на величину

$\frac{\pi(1-\nu^2)l^2\sigma^2}{4E}$. Из условия компенсации прироста поверхностной энергии тела уменьшением энергии деформации следует

$$\frac{d}{dl} \left(\frac{\pi(1-\nu^2)l^2\sigma^2}{4E} \right) dl = 2\gamma dl, \quad (9)$$

где γ — поверхностное натяжение материала;

ν — коэффициент Пуассона.

Отсюда легко получить соотношение, связывающее длину равновесной трещины с напряжением σ

$$l = \frac{4\gamma E}{\pi\sigma^2(1-\nu^2)}. \quad (10)$$

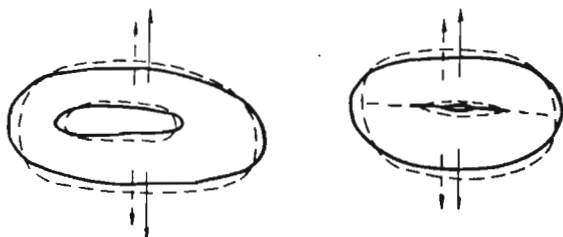


Рис. 20. Различие упругого тела с полостью и тела с трещиной (по Г. И. Баренблатту).

Пунктирная стрелка — дополнительное усилие, приложенное к телу. Пунктирные контуры — форма после приложения этого усилия.

Соотношение (10) подтверждено Гриффитсом экспериментально. Качественно не противоречат ему и эксперименты с разрушением горных пород.

Гриффитс высказал предположение, подтвержденное в дальнейшем, что рост трещины начинается от дефектов, уже существующих в материале. Чрезвычайно важным оказался и вывод Гриффитса о том, что образование трещин сопровождается выделением части упругой энергии, запасенной телом, и тем большей, чем больше величина трещины. Этот вывод Гриффитса в последние годы получил экспериментальное подтверждение в работах С. Д. Виноградова, А. Г. Константиновой и др.

Трещина начинает расти только тогда, когда разрывающие нагрузки достигают максимально возможной интенсивности сил сцепления на контуре трещин*. При этом в отличие от представле-

* Максимально возможная интенсивность сил сцепления есть не что иное, как «теоретическая прочность» материала. В результате концентрации напряжений на контурах трещин фактическая прочность оказывается на несколько порядков меньше теоретической.

ний Гриффитса по современным представлениям быстрый рост трещины после достижения этого максимума — частный случай. Трещина может и медленно переходить от одного равновесного состояния к другому.

Если трещина выходит на поверхность полупространства, растягиваемого, как и раньше, на бесконечности, то, по данным американских исследователей (Баренблатт, 1961), длина равновесной трещины будет примерно на порядок выше.

Г. П. Черепанов (1966) рассмотрел задачу о развитии трещин в сжатых телах. Полагая, что разрушение наступает по одной трещине поперечного сдвига, и «размазывая» остальные трещины по объему тела, Черепанов установил связь длины трещины с разрушающим напряжением для условий одноосного сжатия в виде

$$\sigma = \frac{2}{\sqrt{1+\varphi^2}-\varphi} \left(c + \frac{\sqrt{2} L}{\pi \sqrt{l}} \right), \quad (11)$$

где φ и c — угол трения и коэффициент сцепления по плоскости трещины;

L — константа материала («сдвиговой модуль сцепления»).

Существенно важно (см. § 14), что длина трещины зависит от напряжения лишь при достижении трещиной некоторых не слишком малых размеров. Для каждого материала существует минимальный размер трещины, при котором разрушающее напряжение не зависит от ее длины (Леонов и Панасюк, 1961; Баренблатт и др., 1967). В полимерах этот размер порядка долей миллиметра, и его существование доказано экспериментально.

Результаты математической теории крупного разрушения существенно зависят от условий и истории нагружения тела с трещинами. Поэтому в настоящее время трудно получить эффективные аналитические решения для ситуаций, изучаемых в геологии. Однако некоторые выводы теории как будто хорошо увязываются с фактами, известными геологам. Так, например, известно (Irwin, 1958), что коллинеарные трещины, расположенные по одной линии (друг за другом), ослабляют друг друга. Трещины же, расположенные в шахматном порядке (кулисно), наоборот, при некоторых условиях взаимно усиливают друг друга (Партон, 1965). Первое обстоятельство отлично увязывается с механизмом роста разрывов путем слияния мелких трещин. Второе объясняет часто встречающееся кулисообразное расположение тектонических трещин, которое энергетически наиболее выгодно, а потому и наиболее устойчиво.

Легко видеть, что в приведенных формулах при $l = 0$, $\sigma = \infty$, т. е. тело без трещин оказывается бесконечно прочным. Более естественные результаты получаются в случае применения в теории трещин вариационных принципов (Морозов и Партон, 1968) или при учете сил сцепления на конечном участке вблизи края трещины (Леонов, Панасюк, 1959).

Так, для равномерного растяжения на бесконечности пространства с плоской, круглой в плане трещиной Морозов и Партон получили выражение

$$l = \frac{\pi E \gamma}{2(1 - \nu^2 \sigma^2)} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2 \right], \quad (12)$$

где σ_T — теоретическая прочность материала без трещин.

Рассматривая следы («траектории») трещины на поверхности тела с точки зрения вариационных принципов, Морозов и Фридман приходят к выводу, что в условиях однородного на поверхности тела напряженного состояния следы трещин должны совпадать с обычными геодезическими линиями на поверхности тела *. Из этого вытекает, в частности, что, например, на поверхности расширяющейся однородной сферы следы трещин должны совпадать с дугами больших кругов (гипотеза расширяющейся Земли!) На поверхности однородного изотропного полупространства при равномерном двухосном растяжении возникает либо сеть параллельных прямых линий, либо гексагональная сеть (Морозов и Фридман, 1961). Это утверждение имеет прямое отношение к механизму формирования полигональных сетей трещин (см. главу 2).

Основываясь на гипотезе Смолли о случайном расположении центров стягивания материала, учитывая статистическую неоднородность горных пород и исходя из теории Гриффитса, можно показать, что среднее число сторон полигонов должно находиться между пятью и шестью. Действительно, вывод о гексагональности сети трещин делается исходя из представления о необходимости сплошного заполнения плоскости правильными многоугольниками. Если число и длину сторон полигонов полагать случайными, то непрерывное заполнение плоскости получается не только 3-, 4- и 6-угольниками, но и полигонами с произвольным числом сторон. Согласно теории Гриффитса, возникающая трещина длины l снимает напряжение на площади, пропорциональной $\pi l^2/4$. Исходя из этого для последовательности n -угольников ($n = 3, 4, \dots$) можно рассчитать отношение площади S_1 , с которой снимается напряжение и высвобождается энергия, к площади S_2 , на которой запасается упругая энергия, т. е. к площади полигона. Первая пропорциональна $\frac{n \cdot \pi l^2}{4}$, вторая — площади многоугольника. Результаты расчета приведены в табл. 9.

Таблица 9

n	3	4	5	6	7	8	...	∞
S_1/S_2	2,71	1,57	1,14	0,91	0,76	0,65	...	0

* Напоминаем, что геодезическими называются кратчайшие линии, соединяющие две точки поверхности.

Отношение $S_1/S_2 = 1$ является энергетически наиболее выгодным (высвобождаемая трещинами энергия в точности равна запасенной) и достигается при среднем числе сторон полигонов $n = 5,5$, что вполне удовлетворительно совпадает с фактическим материалом по базальтам*. Можно полагать, кроме того, что зависящая от n величина $(1 - \frac{S_1}{S_2})$ связана с вероятностью возникновения n -угольных полигонов.

Основываясь на вариационных принципах и обобщая результаты теории трещин, Е. М. Морозов и Я. Б. Фридман (1966) сформулировали еще ряд важных для анализа трещиноватости положений. Так, ветвление трещины (структура «конского хвоста») свидетельствует о хрупком разрушении, причем скорость подвода энергии превышала скорость ее поглощения трещиной. Конец трещины двигался при этом со скоростью порядка половины скорости звука. Этот вывод хорошо увязывается с наблюдавшейся (Рихтер, 1963) структурой, «конского хвоста» возникшей при сильном коровом землетрясении. Очевидно, эти структуры можно рассматривать как свидетельство весьма интенсивных тектонических деформаций.

Коллинеарные трещины начинают взаимодействовать лишь при достижении достаточно малого (по сравнению с длиной трещин) расстояния между ними. Это обстоятельство должно, по-видимому, регулировать процесс роста разломов путем разрастания и слияния мелких трещин.

Существуют определенные соотношения также между углом выхода трещины на свободную поверхность и механизмом ее роста (хрупкость, пластичность, стационарность или нестационарность роста трещины). Эти соотношения могут оказаться полезными при анализе загибов разломов у поверхности земли и т. п. Из них, в частности, вытекает возможность расшифровать возрастные соотношения трещин, когда они не пересекаются, а одна трещина утыкается в другую под прямым углом (см. главу 2, § 1): позже при этом возникает трещина — ножка «Т».

§ 12. Статистическая картина деформации и разрушения

В макроскопических теориях рассматриваются процессы, взятые в целом, и суммарные результаты деформирования и разрушения. Хотя в известных работах по сопротивлению материалов О. Мора, П. Кармана и др. уделяется много внимания описанию механизма деформации и разрушения, анализ этого механизма по существу выпадает из формальной теории, оставаясь лишь качественной иллюстрацией к ее результатам.

Как установлено экспериментами, механизм деформирования и разрушения реальных тел носят существенно статистический

* Предлагаемый способ расчета числа граней полигонов является слишком приближенным, а совпадение с фактическими данными несколько неожиданно (Прим. ред).

характер. Поэтому макроскопическая теория должна здесь так же, как и в термодинамике, получить статистическое обоснование. Применительно к изучению трещиноватости статистическая теория должна была бы объяснить свойства ансамблей (систем) трещин и некоторые особенности механизма роста разломов, поскольку последние формируются путем слияния отдельных трещин (Тетяев, 1940; Гзовский, 1956, 1960).

В настоящее время такой теории еще нет. Поэтому ограничимся описанием ряда экспериментов, проведенных в последние годы металловедцами, и описанием некоторых результатов статистической теории хрупкого разрушения.

Статистическое исследование деформаций металлов ведется путем нанесения на поверхность, деформируемых образцов делительной сетки и измерения с ее помощью деформации отдельных кристаллитов или соизмеримых с ними участков. Очевидно, что деформации всего образца представляет собой сумму таких микродеформаций. Как показали эксперименты (Асатауров и др., 1964), корреляционная функция пластических микродеформаций носит периодический характер и быстро затухает. Последнее обстоятельство является выражением известного принципа Сен-Венана и дает возможность рассматривать в качестве математической модели распределения деформаций распределение суммы независимых или так называемых *т*-зависимых * случайных величин. При достаточно большом числе вкладаемых распределение такой суммы, как известно из теории вероятностей, сходится к нормальному. Действительно, распределение как упругих (Мехонцева и др., 1966), так и пластических (Рыбалко, 1959; Струнин, 1960) деформаций в металлах оказывается не противоречащим нормальному распределению. Помимо этого, из названной математической модели вытекают еще два важных следствия. Средняя величина деформируемости ** оказывается независимой от размера образцов (Шейнин, 1965), а коэффициент вариации деформации обратно пропорционален корню квадратному из размера образца. Последнее обстоятельство подтверждено для пластических деформаций металлов (Струнин, 1960) и упругих деформаций горных пород (Рац, 1968а, стр. 64) экспериментально и приводит к интересному выводу: с уменьшением рассматриваемого объема деформируемой среды коэффициент вариации деформации растет, асимптотически стремясь к бесконечности, что, очевидно, соответствует «точечному» разрушению и «точечному» же отсутствию деформации. Таким образом, пластическая макродеформация тела может оказаться суммой микроразрушений, что отвечает физической картине явления (см. § 14). Очевидно, также, что с уменьшением рассматриваемого объема нарушаются условия центральной предельной теоремы и распределение микродеформаций уже не будет нормальным.

* Т. е. обладающих конечным радиусом автокорреляции.

** Деформируемость — величина, обратная модулю деформации.

В экспериментах Рыбалко и Струнина выяснилось также, что с ростом величины деформации (при фиксированном размере тела) дисперсия деформации возрастает, что связано с явлениями местного упрочнения и локализации деформации. По мере увеличения деформации (или с ростом температуры) вслед за увеличением дисперсии появляется существенная асимметрия распределения деформаций, отвечающая формированию шейки (Рыбалко, 1959). Дальнейшее деформирование должно привести к появлению двухвершинного распределения деформаций (в шейке и вне ее) и разрушению образца. Таким образом, рост дисперсии, нарушение нормальности распределения, возникновение асимметричных или гетерогенных распределений величины деформации является характерным признаком приближающегося разрушения. Таким образом, здесь имеет место некая инвариантность статистической картины деформации относительно масштабов рассматриваемого и степени деформирования тела: нормальность распределения деформаций теряется равным образом как с увеличением степени деформации, так и с уменьшением рассматриваемого объема. Следовательно, прогноз о поведении деформируемого материала при увеличении деформации можно сделать на основании поведения материала при фиксированной деформации на более глубоком уровне. Иными словами, пластическая деформация и последующее разрушение приходят на смену упругой деформации по мере возрастания деформации как бы изнутри материала.

К сожалению, существующие статистические теории разрушения относятся в основном к хрупкому разрушению и не связывают разрушения с деформациями. В простейшем варианте теория основывается на следующих предположениях. В реальных телах всегда имеется множество дефектов, начиная от дефектов кристаллической решетки до микротрещин (Griffith, 1921). Предполагается, что дефекты равномерно распределены в объеме тела, т. е. количество дефектов в некотором малом объеме пропорционально величине объема и не зависит от его положения в пределах тела, и что разрушение тела наступает при разрастании трещины от наиболее опасного дефекта, независимо от остальных. Таким образом, прочность образца определяется наличием одного (наиболее опасного) дефекта и не зависит от всех остальных дефектов. Роль наиболее опасного можно с равной вероятностью приписать любому из имеющихся в теле дефектов. Следовательно, в рамках статистической теории хрупкого разрушения задача о прочности тела сводится к отысканию функции распределения $F_n(R)$ минимальной прочности n элементов неоднородности, имеющихся в данном объеме, по известной функции распределения $F_1(R)$ прочности каждого из них. Эта функция имеет следующий вид:

$$F_n(R) = 1 - [1 - F_1(R)]^n. \quad (13)$$

Выражение (13) представляет собой функцию распределения пределов прочности тела.

Из статистической теории хрупкого разрушения вытекает, что с увеличением размера образцов средняя прочность и дисперсия

прочности убывают. Непротиворечивость этих выводов фактам для горных пород была показана в ряде исследований (Протодьяконов и Чирков, 1964; Руппнейт, Долгих, Матвиенко, 1964; Рац, 1968).

В работе Ф. Боржа (Borges, 1960) показано, что в случаях, когда разрушение не является хрупким, масштабные эффекты проявляются совершенно иначе.

Результаты Боржа в значительной мере объясняют то многообразие в проявлении масштабных эффектов при разрушении горных пород, которое отмечается экспериментаторами и которое связано, кроме того, с различной ролью поверхностных и внутренних дефектов.

Из результатов Боржа вытекает также интересный, в особенности для рассматриваемых здесь задач, вывод о том, что при прочих равных условиях с увеличением объема деформируемой горной породы ее прочность при хрупком разрушении будет снижаться, в то время как прочность при вязком разрушении будет возрастать. Уменьшение хрупкой прочности тел с ростом их размеров отчетливо прослеживается при растяжении и несколько хуже при сжатии. М. М. Протодьяконов (Протодьяконов и Чирков, 1964) объясняет это смыканием трещин. С другой стороны, влияние размера образцов на прочность заметно усиливается при медленной деформации и исследовании длительной прочности (Irwin, 1960).

Ввиду отсутствия прямых экспериментов в настоящее время неясно, насколько существенным может быть влияние масштабов на длительную прочность горных пород в условиях высокого всестороннего сжатия, характерного для условий тектонических дислокаций в толще литосферы. Что же касается распределения деформаций и его динамики с увеличением нагрузки, то изложенные выше закономерности, по-видимому, не должны претерпевать существенных изменений в условиях высокого давления, поскольку они связаны с таким фундаментальным свойством разрушения, как локальность.

§ 13. Атомный механизм деформации и разрушения

Предпосылка о малости изменения формы тела при нагружении, лежащая в основе классической теории упругости, для кристаллических тел имеет глубокий физический смысл: незначительное изменение формы обусловлено тем, что атомы тела при упругой деформации не покидают своих «насиженных» мест в кристаллической решетке, где они имеют минимальную потенциальную энергию, а лишь немного перемещаются. При снятии нагрузки атомы немедленно возвращаются на свои места. Этим объясняется механизм накопления упругой энергии (у смещенных атомов энергия выше) и обратимость упругих деформаций.

Остаточные деформации (пластичность, ползучесть) обусловлены тем, что атомы кристаллической решетки меняют свои места необратимо. Пластическая деформация на микроскопическом уровне существенно неоднородна: известные линии Людерса представляют собой

выражение микродвигов, локализованных в отдельных плоскостях, довольно далеко отстоящих друг от друга. Переход от одного равновесного состояния к другому при сдвиге внутри кристалла происходит не одновременно по всей плоскости скольжения (для чего потребовалось бы очень высокое напряжение), а постепенно, путем перемещения дислокации. Дислокации «стекают» в микротрещины, которые при этом растут как бы «питаются» дислокациями (Орлов, 1961), скапливаются у препятствий (атомов-примесей, границ зерен и т. д.), порождая зародыши микротрещин. «Распространяющаяся трещина подобно клину создает у своей вершины локальную область очень высоких напряжений, под действием которых дислокации сближаются до предельных расстояний, в результате чего перед трещиной создается зона микротрещин» (Северденко и др., 1964, стр. 1319).

Дислокационный механизм характерен и для первой (замедленной) стадии ползучести. Однако установившаяся (стационарная) ползучесть связана, по-видимому, с другим механизмом. Как показали эксперименты С. Н. Журкова и его сотрудников (Журков и др., 1958, 1963), установившаяся скорость ползучести v связана с напряжением σ и температурой T соотношением

$$v = v_0 \cdot e^{-\frac{\{\gamma_0^* - \gamma^* \sigma\}}{KT}}, \quad (14)$$

где v_0 , γ^* — постоянные;

v_0^* — начальный потенциальный барьер (в отсутствие нагрузки), т. е. величина энергии, необходимая атому, чтобы покинуть свое место в кристаллической решетке;

K — постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град).

Экспериментами Журкова была доказана тесная связь ползучести с прочностью. В опытах (Журков и др., 1953, 1957, 1962) фиксировались длительность жизни образцов, находящихся под определенной нагрузкой в зависимости от величины этой нагрузки и температуры.

Оказалось, что логарифм длительности жизни $\tau_{сек}$ линейно уменьшается с ростом нагрузки σ кГ/мм, причем угол наклона графика увеличивается с уменьшением температуры почти до 90° к оси σ , т. е. зависимость аналогична (14). Отсюда стал понятен смысл (вернее, стала ясна физическая бессмысленность) понятия «предел прочности» материала: при низких температурах время жизни образца столь сильно зависит от напряжения, что при грубом анализе кажется либо нулевым (мгновенное разрушение при превышении предела прочности), либо бесконечным (тело не разрушается, пока предел прочности не достигнут).

Полученные экспериментально зависимости совпадают с таковыми для скорости ползучести и хорошо описываются выражением

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{v_0 - \gamma \sigma}{KT}}, \quad (15)$$

где τ_0 — минимальное время жизни образцов, не зависящее от температуры и свойств материала и равно 10^{-13} сек;

K — постоянная Больцмана;

v_0 — начальный потенциальный барьер (в отсутствие нагрузки);

γ — коэффициент снижения начального барьера.

Физический смысл выражений (14) и (15) состоит в том, что ползучесть и разрушение происходят за счет тепловых колебаний атомов (имеющих частоту около 10^{13} колебаний в секунду), роль же приложенной нагрузки сводится к снижению потенциального барьера, что в свою очередь приводит к тому, что случайные разрывы межатомных связей становятся чаще, чем случайные восстановления нарушенных связей.

Особый интерес представляет коэффициент γ в выражении (15). Величина $\gamma\sigma$ — работа внешней силы (нагрузки) при разрушении тела. Если бы на атомном уровне нагрузка распределялась в теле равномерно, величина γ должна была бы быть близкой к объему атомов V_a (10^{-23} см³) и примерно одинаковой для любых материалов. В действительности это не так. Величина γ в несколько десятков и даже сотен раз превосходит объем атомов и существенно меняется даже для одного материала в зависимости от особенностей его надмолекулярной структуры. Из этого следует, что в тех местах тела, где происходит разрыв атомных связей, действующая нагрузка существенно превосходит среднюю, макроскопическую нагрузку на тело, причем величина $\frac{\sigma_D}{\sigma} = \frac{\gamma}{V_a} C'$ есть не что иное, как коэффициент концентрации напряжений. Как уже упоминалось, C' достигает величины нескольких десятков и даже сотен. Характер влияния концентрации напряжений на прочность легко выявить из выражения (15) при постоянных T и τ . Переписав выражение (15) в виде

$$[\sigma = (v_0 - KT \ln \frac{\tau}{\tau_0}) \frac{1}{\gamma}], \quad (16)$$

легко убедиться, что прочность обратно пропорциональна степени концентрации напряжений и величина γ^{-1} может служить мерой прочности для данного материала. Оказалось, что (Журков и др., 1963) для металлов

$$\gamma^{-1} \propto \sqrt{N_D}, \quad (17)$$

где N_D — плотность дислокаций, т. е. число дислокаций, пересекающих единичную площадку. Следовательно, надо полагать, что в результате генераций и перемещения дислокаций в ходе пластической деформации формируется стабильная структура, которая и определяет прочность материала.

Существенный интерес представляет то обстоятельство, что зависимость (15), полученная в опытах с относительно «чистыми» материалами (металлы, полимеры), сохраняется и для крайне неоднородных материалов, например торфяных брикетов (Гамаюнов, Цепляев, 1966), весьма близких по своей структуре к горным породам.

Таким образом, исследования на атомном уровне подтверждают тесную связь пластической деформации и разрушения (см. предыдущий раздел). Однако связь эта не является простой. С одной стороны, рост и локализация пластической деформации способствуют росту трещин и разрушению, с другой — рост трещин требует накопления определенной упругой энергии. Если энергия деформации будет слишком быстро рассасываться пластическим течением материала, то энергии на образование трещин не хватит (Александров и Журков, 1933; Гарбер и Гиндин, 1960; Кузнецова, 1962). В этом смысле процессы пластического течения и разрушения конкурентны.

Постоянные v_0^* и γ^* в выражении (14) и v_0 и γ в выражении (15) для чистых металлов и некоторых сплавов численно совпадают, для большинства же материалов они различны. При фиксированной температуре формулы Журкова можно упростить

$$v = A^* e^{\alpha^* \sigma}, \quad (18)$$

$$\tau = A \cdot e^{-\alpha \sigma}, \quad (19)$$

полагая соответственно $A^* = v_0 \cdot e^{\frac{v_0}{KT}}$, $\alpha^* = \frac{\gamma^*}{KT}$ и $A = \tau_0 \cdot e^{\frac{v_0}{KT}}$,

$\alpha = \frac{\gamma}{KT}$. Тогда очевидно, что соотношение интенсивности процессов

ползучести и роста трещин регулируется постоянными материала. К. И. Кузнецова показала, что для литосферы в процессе роста сейсмогенных разрывов $\alpha > \alpha^*$, т. е. скорость ползучести (и время релаксации) зависит от напряжений значительно меньше, чем время жизни «тела» (т. е. скорость роста трещин).

Соотношение флуктуационной теории разрушения и математической теории трещин выяснено в последнее время Г. И. Баренблатом, В. М. Ентовым и Р. Л. Салгаником (1967). Они показали, что флуктуационный механизм доминирует на первой стадии разрушения (равномерное растрескивание по всему объему), когда трещины еще очень малы. Эта стадия наиболее длительная, поэтому формула Журкова хорошо описывает время жизни образцов материалов. При больших же длинах трещин их развитие становится динамическим: трещины растут с субзвуковой скоростью. Поэтому флуктуационная теория оправдывается до тех пор, пока в теле нет крупных трещин.

С этим связано, по-видимому, и то, что выводы теории трещин теряют силу для очень маленьких трещин (см. раздел 11). Граничная величина трещин (выше которой разрушающее напряжение зависит от длины, а ниже — не зависит) является константой материала. Эту величину можно условно назвать «минимально возможной трещиной», имея в виду, что трещины меньшего размера уже не подчиняются общим для макротрещин закономерностям.

Резюмируя изложенное, заметим, что существующие физические и феноменологические теории деформации и разрушения (классическая механика сплошных сред, математическая теория трещин,

флуктуационная теория, статистические теории хрупкого разрушения) справедливы лишь в каких-то пределах, при соблюдении тех или иных ограничений. Они отражают, может быть, очень точно лишь отдельные стороны процессов деформации и разрушения.

В свете сказанного очевидно, что исследования в области теории формирования трещин и разрывов в геологии могут развиваться двумя равноправными путями.

1. Путем построения и исследования теоретических моделей, с необходимостью основанных на той или иной из рассмотренных выше теорий и уже в силу этого ограниченных. Этим путем идут обычно в сейсмологии, причем физическая близость применяемых моделей (трещины обычно заменяют дислокациями) природе представляется сомнительной (Ризниченко, 1966; Рац, 1965б). Существенно более адекватные модели построены в последнее время и учитывают уже результаты математической теории трещин (Костров, 1964) и флуктуационной теории ползучести и прочности (Кузнецова, 1962).

2. Путем обобщения фактического сеймотектонического материала с учетом результатов теории и построения качественной картины механизма роста разрывов. Этот путь, более или менее традиционный для геологии, реализовался в работах В. В. Белоусова (1952), М. В. Гзовского (1957, 1960) и других и принят в этой работе.

Разумеется, возможны и, вероятно, наиболее перспективны всяческие комбинации этих двух полярных способов.

§ 14. Факты и гипотезы о механизме роста тектонических разрывов

В § 11 — 13 изложены общие физические закономерности, которые необходимо учесть при исследовании механизма роста трещин (разрывов). При этом нужно, очевидно, учитывать еще факты геологические и сейсмологические. А это сопряжено с определенными методологическими трудностями, поскольку метод геологии остается до сего времени преимущественно «качественным естественноисторическим», в то время как методы геофизики количественные (Белоусов, 1962, стр. 4). В связи с этим в каждой из названных наук становится необходимым «отыскание таких форм представления доступных ей данных, которые были бы не посредственно (разрядка моя — М. Р.) сопоставимы с данными других наук» (Ризниченко, 1965, стр. 56). В этом направлении проводил исследования по обсуждаемому вопросу М. В. Гзовский (1956, 1960) и другие. В настоящем разделе дается некоторое развитие идей Гзовского, причем специфика нашего подхода заключается в последовательном статистическом анализе геологического материала и непосредственном сопоставлении его результатов с результатами статистического исследования сейсмичности.

Необходимо подчеркнуть, что в настоящем разделе не ставится задача построения теории формирования тектонических разрывов. Мы преследуем здесь гораздо более скромную цель:

путем анализа фактического сейсмотектонического материала по возможности сузить круг возможных гипотез о механизме роста разрывов. Излагаемые ниже идеи ни в коем случае не претендуют ни на роль теории, ни на законченность и бесспорность.

Говорить о разрушении можно лишь применительно к какому-то определенному объему (Фридман, 1957). Это существенно важно в геологии, где обычной моделью толщ горных пород и литосферы является сплошная среда, объемы которой во многих задачах не ограничиваются (рассматривается, например, полупространство, ограниченное только дневной поверхностью, или слой бесконечной толщины и т. п.). Таким образом, одно и то же явление (разрастание трещины) может рассматриваться как разрушение применительно к одному объему горных пород и не может рассматриваться как разрушение применительно к другому, большему объему. «Незавершенный» характер разрушения при образовании тектонических разрывов уже давно подчеркивал В. В. Белоусов (1952). Я. Б. Фридман выделяет субмикроскопическое разрушение (разрушение элементов неоднородности порядка IV в нашем понимании); микроскопическое (разрушение элементов неоднородности порядка III); макроскопическое (вплоть до разрушения всего тела). Очевидно, что в геологии этот перечень можно было бы продолжить, говоря о разрушении последовательно на всех намеченных во вводящей главе уровнях неоднородности. Учитывая, что при этом разрыв увеличивается в длине более чем на 10 порядков, в широком интервале величин процесс разрушения в геологии можно принять бесконечным в том смысле, что за разрушением на уровне неоднородности порядка n всегда может последовать разрушение на уровне неоднородности $n - 1$. Если разрушение доходит до n -го уровня, то на $n - 1$, $n - 2$ и т. д. уровнях оно представляется лишь как «повреждение» (Фридман, 1957), причем сумма таких повреждений, как ясно из предыдущего, составляет остаточную деформацию среды. Относительность понятий разрушение — повреждение и дискретность — сплошность деформации отчетливо прослеживаются на диаграмме структурной неоднородности (Фридман, 1960). Отложив на вертикальной оси диаграммы «уровень» (масштаб) разрушения или величину смещения по отдельным сколам, получим, что диагональ разделяет поля разрушения (вверху) и повреждения (внизу) или поля дискретных смещений (вверху) и квазисплошной деформации (внизу).

Таким образом грань между разрушением и остаточной деформацией, дискретностью и сплошностью деформации стирается — все зависит от масштаба рассматриваемого явления. При этом возникает эффект, впервые, по-видимому, указанный К. И. Кузнецовой: с увеличением рассматриваемого объема горных пород свой вклад в пластическую деформацию вносят все более и более крупные «повреждения» (сколы). Так, если речь идет об относительно крупных тектонических разрывах, то сопровождающая их развитие «пластическая деформация» не только складывается из микросколов, но включает и сумму макро-

скопических смещений по трещинам *. Ниже будут приведены факты, подтверждающие этот вывод.

Увеличение пластической энергоемкости (при прочих равных условиях) снижает вероятность макрохрупкого разрушения системы. Одним из способов «компенсации» повышения пластичности является при этом повышение скорости деформации. Следовательно, для формирования относительно крупных разрывов (при неизменных температуре и всестороннем сжатии) нужны большие скорости деформации, чем для формирования мелких. Таким образом, каждому значению скорости деформации отвечает некоторый верхний предел возможной величины образующихся в ходе деформации тектонических разрывов.

Соотношения между числом крупных и малых трещин могут быть получены лишь исходя из тех или иных модельных представлений. В упоминавшейся уже работе Кузнецовой исследовалась модель упругой релаксирующей среды с постоянным временем релаксации (тело Максвелла) и временем релаксации, экспоненциально зависящим от напряжения. Прочность характеризовалась при этом функцией, связывающей скорость роста трещины с напряжением (см. §13). Неоднородность среды принималась только за счет модуля упругости, который задавался распределенным нормально. Распределение «концентраторов напряжений» в пространстве предполагалось при этом случайным.

Для случая чистого сдвига в среде с временем релаксации, зависящим от напряжения слабее, чем прочность (что, как показала Кузнецова, отвечает свойствам земной коры), получено следующее. Оказалось, что в среде Максвелла при определенных скоростях деформации развивается практически одна-две трещины, длины которых на 6—7 порядков превышают длины остальных. Это различие сглаживается при более медленной деформации. Возникающие при этом трещины будут, очевидно, мало различаться по своим размерам.

Кинетика развития трещин в ходе разрушения тела экспериментально изучалась В. Р. Регелем (1956) и А. Г. Константиновой (1966). При этом было выяснено, что в каждый момент времени в теле растут трещины существенно разного размера. Рост как числа трещин, так и их величины при фиксированной нагрузке на образец во времени замедленный, но сначала преобладает рост числа трещин, а затем их величины.

Этот факт хорошо коррелирует с указанными в § 11 тремя стадиями разрушения. М. В. Гзовский (1960) выделил сходные стадии формирования тектонических разрывов. Отличие схемы Гзовского от схемы, принятой в настоящее время в физике (см. § 11), состоит в следующем: Гзовский объединяет первые две стадии и добавляет в конце еще одну — вместо полного разрушения тела процесс завершается замедленным разрастанием образовавшегося разрыва. Таким образом, практически процесс разрушения оказывается

* Иными словами, при прочих равных условиях относительная остаточная деформация большого объема материала больше, чем у малого объема.

одинаковым как для небольших тел, так и гигантских в масштабах земной коры. При этом необходимо лишь придавать относительный смысл понятиям «дефект», «микротрещина», «макротрещина» в описанных выше трех стадиях. Независимость феноменологии процесса от масштаба разрушения отмечалась уже К. И. Кузнецовой. Ниже будут приведены некоторые доводы в пользу этого положения, которое мы для краткости будем именовать далее принципом инвариантности (феноменологической картины разрушения относительно его масштабов).

Учитывая принцип инвариантности и сделанные замечания, мы будем последовательно рассматривать на геологическом материале следующие три стадии разрушения:

- 1) равномерное растрескивание по всему объему деформируемого тела;
- 2) сгущение и слияние трещин;
- 3) образование и разрастание разрыва.

При этом, как это обычно делается в геологии, будем рассматривать не последовательность стадий процесса, а последовательность результатов этого процесса, дошедшего до разных стадий развития. Анализ будем вести на уровне макротрещиноватости.

Стадия 1. Равномерное растрескивание по всему объему деформируемого тела.

Относительно равномерное распределение макротрещин в массивах горных пород и даже на обширных участках земной поверхности хорошо известно геологам.

На рис. 21 приведены примеры непрерывных последовательностей расстояний между соседними трещинами $\{a_i\}$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) по системам, полученные в результате замеров на обнажениях. Как видно из рисунка, трещины часто имеют тенденцию к образованию локальных сгущений. Однако между сгущениями располагаются достаточно длинные куски последовательностей, в пределах которых гипотеза о равномерном распределении трещин не отвергается (табл. 10). Фиксируемые в обнажениях зоны сгущения трещин трактуются уже как неслучайные, т. е. время их образования относится ко второй стадии растрескивания.

Рассмотрим отрезки последовательностей, в пределах которых трещины расположены относительно равномерно. Можно показать (Струнин, 1964), что если бы трещины на первом этапе возникли независимо друг от друга, то величина a должна была бы подчиняться экспоненциальному распределению. Однако предположение о взаимной независимости соседних трещин физически труднообъяснимо: обычно наблюдаемое расстояние между соседними трещинами по крайней мере на порядок меньше их длины, по-видимому, трещины взаимодействуют в процессе своего роста *. Для проверки этой гипотезы

* Из этого следует между прочим определенный физический (или, если угодно, генетический) смысл введенных в главе I представлений о прерывистости — непрерывности сети трещин.

на геологическом материале были построены гистограммы значений a_i для тех отрезков последовательностей $\{a_i\}$, где не отвергалась гипотеза о равномерном расположении трещин. Практически все гистограммы имели левую нисходящую ветвь, неслучайную в смысле критерия Пирсона, и хорошо аппроксимировались логнормальным распределением (табл. 11).

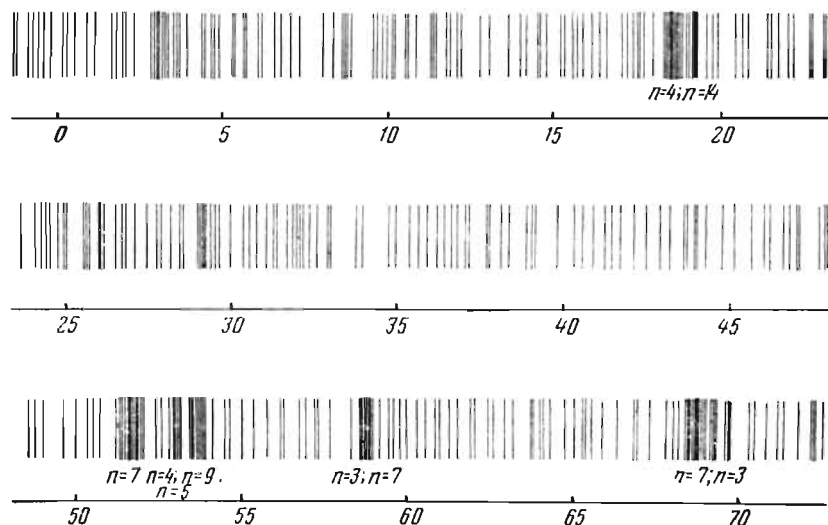


Рис. 21. Последовательности расстояний между трещинами (соскладчатые трещины в палеогеновых алевролитах Таджикской депрессии)

Таблица 10

Номер станции	№ п/п	Местоположение, порода, возраст	Длина ряда	Число степеней свободы	Критерий согласия χ^2	$\chi^2_{0.05}$	P
1	139—1	Таджикская депрессия, алевролиты, палеоген	84	6	7,07	12,59	0,32
2	139—2		84	7	2,90	14,07	0,89
3	139—3		154	7	2,10	14,07	0,95
4	139—4		121	8	4,54	15,51	0,80
5	139—5		36	3	0,67	7,82	0,88
6	139—6		49	2	1,10	5,99	0,58
7	139—7		35	2	1,14	5,99	0,57
8	139—8		106	7	5,32	14,07	0,62
9	127—1	Таджикская депрессия, песчаники и алевролиты, нижний мел	99	3	13,30	7,82	0,007
10	127—2		110	4	4,80	9,49	0,31
11	127—3		57	2	0,98	5,99	0,62
12	123		115	4	6,56	9,49	0,17
13	125		45	8	13,42	15,51	0,10

Таблица 11

Местоположение изучаемого участка	Породы	Генетический тип трещин	Ориентировка системы		Число замеров n	Критерий Пирсона χ^2	Число степеней свободы ν	Вероятность P получения расхождений больше наблюдаемых за счет случайных причин при данном n
			азимут падения α	угол падения β				
Юго-западная часть Тунгусской синеклизы, Толстомысовская траповая интрузия	Недифференцированные траппы T_1	Контракционные	170	80	56	1,90	3	0,58
То же	То же	То же	—	0	163	5,43	6	0,49
Таджикская депрессия, Кизойская синклиналь	Известняки C_{T_2}	Тектонические	320	70	97	3,21	2	0,20
То же	Песчаники C_{T_1}	То же	320	70	80	2,56	3	0,47
»	То же	»	320	70	62	1,56	3	0,66
»	»	»	80	80	63	2,21	2	0,32
Центральный Казахстан, Селетинский прогиб	Песчаники первого элемента ритма флиша O_3	Общие	—	—	112	5,02	3	0,15

Была предпринята попытка получить информацию о характере взаимодействия соседних трещин путем корреляционного анализа последовательностей $\{a_i\}$ $i = 1, 2, 3, \dots$ (по-прежнему на участках равномерного расположения трещин). Для этой цели выполнен расчет автокорреляционных функций по ряду реализаций последовательностей a_i , содержащих от 120 до 300 замеров.

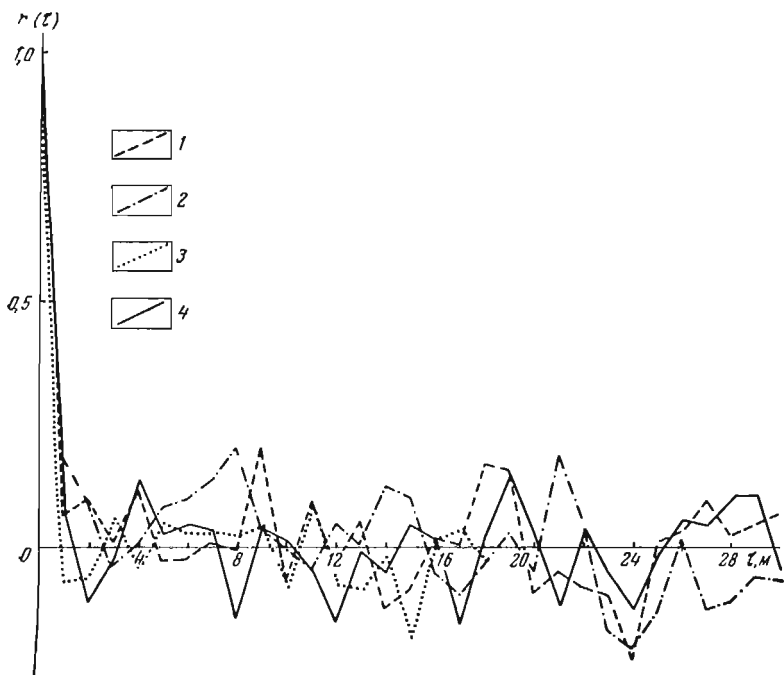


Рис. 22. Автокорреляционные функции последовательностей расстояний между соседними трещинами

1 — субгоризонтальные контракционные трещины в трапах Толстомысовской интрузии; 2 — приразрывные трещины в палеогеновых алевролитах Дагестана; 3 — складчатые трещины в силурийских песчаниках Ферганского хребта; 4 — последовательность случайных чисел

На рис. 22 приведены характерные графики нормированных корреляционных функций для последовательностей a_i системы субгоризонтальных контракционных трещин Толстомысовской траптовой интрузии триасового возраста (р. Апгара) и системы приразрывных трещин в палеогеновых алевролитах известнякового Дагестана (кривые 1—2 соответственно). Для наглядности на тот же график нанесена автокорреляционная функция последовательности 120 случайных чисел (кривая 4). Заметных различий между графиками нет. Таким образом, последовательности a_i практически могут считаться последовательностями некоррелированных величин.

Приведенные факты требуют, по-видимому, дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Пока можно предположить следующее. Растрескивание начинается одновременным разрастанием множества трещинок, расположенных в деформируемом объеме породы равномерно и случайно (разумеется, речь идет о макроскопически однородной породе, находящейся под действием макроскопически однородного поля напряжений). В силу флуктуаций расстояний между трещинами на некоторых участках образуются при этом зоны концентрации напряжений. В этих местах рост уже существующих трещин может ускориться, и здесь же (раньше, чем на других участках) начинается рост следующего поколения трещин, их слияние (на второй стадии разрушения) и в дальнейшем формирование разрыва. Таким образом, процесс разрушения как бы унаследуется.

Одновременно происходит повсеместный рост средней длины трещин, в ходе которого первоначально прерывистая сеть трещин переходит в непрерывную (§ 3). Даже если считать, что новые трещины при этом уже не возникают, в результате роста длины трещин густота сети увеличивается и рано или поздно трещины начинают взаимодействовать. Таким образом, наблюдая непрерывные сети трещин (а именно к таким сетям относится приведенный выше фактический материал), мы изучаем существенно видоизмененную картину результатов первой стадии растрескивания, для которой вообще-то должна быть характерна прерывистая сеть трещин.

Можно предположить, что искажение первоначального гипотетического экспоненциального распределения расстояний между соседними трещинами в системе связано именно с увеличением длины трещин в условиях их механического взаимодействия. Действительно, поскольку вокруг трещины возникает зона, частично разгруженная от напряжений, дальнейший рост близлежащих трещин, концы которых достигают разгруженной зоны, замедляется или прекращается вовсе. По образному выражению М. А. Гончарова, происходит как бы взаимное отталкивание трещин. В результате модальное значение расстояния между соседними трещинами смещается вправо (по сравнению с исходным экспоненциальным распределением), и распределение приобретает отчетливо выраженную левую нисходящую ветвь, которая и наблюдается в действительности.

Приведенная гипотеза (которую можно назвать гипотезой флуктуационного растрескивания) не противоречит наблюдаемым фактам и позволяет связать их с имеющимися в физике представлениями о начальной стадии разрушения.

Стадия 2. Сгущение и слияние трещин. М. В. Гзовский, развивший концепцию формирования тектонических разрывов путем слияния макротрещин (1953, 1956, 1960), указал, что в этом процессе могут участвовать трещины скола и отрыва, различно ориентированные по отношению к возникающему разрыву. Рацем (1966б), а затем М. И. Погребиским был получен фактический материал, позволяющий дать статистический анализ процесса сгущения трещин,

скола, параллельных возникающему разрыву. При этом тренд параметров трещиноватости по направлению от относительно сохранных участков к разрыву рассматривался как временной — от первой ко второй стадии разрушения. Как видно из рисунка 14, б, по мере приближения к разлому среднее расстояние между трещинами заметно уменьшается.

Исследование закона распределения расстояний между трещинами свидетельствует, что во всех случаях, за исключением узкой приразломной зоны, это распределение может быть аппроксимировано логарифмически нормальной моделью. Нормальность распределения логарифмов расстояний между трещинами нарушается лишь вблизи разлома, где распределение становится гетерогенным, отражая концентрацию трещин в локальные линейно-вытянутые вдоль разлома зоны (рис. 14, а). Бросается в глаза удивительное сходство динамики распределения густоты трещин и распределения микродеформаций в металлах (см. § 12) по мере приближения к моменту (или месту) разрушения. И в том и в другом случае последовательно наблюдается: увеличение степени «повреждения» материала, возрастание дисперсии, локализация повреждений и возникновение гетерогенного распределения. По-видимому, это сходство глубоко закономерно и отражает статистическую сторону процессов деформации и разрушения. При этом интенсивность (густота) трещиноватости выступает как мера остаточной деформации*.

Стадия 3. Образование и разрастание разрыва. Процесс быстрого разрастания образовавшегося при слиянии трещин разрыва в геологическом масштабе времени мгновенен и не оставляет за собой следов, которые можно было бы анализировать. Зато именно в силу своей «мгновенности» этот процесс может наблюдаться непосредственно. Систематизация результатов наблюдений за разрывами, выходящими на поверхность земли при сильных коровых землетрясениях, совместно с данными об энергии этих землетрясений позволяет кое-что узнать об этой стадии. Большая часть информации получена здесь, естественно, сейсмологами. Поэтому в дальнейшем изложении мы широко пользуемся сейсмологическими данными.

Как указывалось в § 11, возникновение и разрастание трещин (разрывов) длиной l сопровождается выделением энергии пропорционально $\pi l^2/4$. Согласно существующим представлениям, землетрясения (по крайней мере коровые) возникают в результате подвижек по разрывам сколового типа. Прослеживается отчетливая корреляционная связь энергии сильных коровых землетрясений с амплитудами подвижек, выходящих на поверхность разрывов, и длинами разрывов (или их частей), по которым фиксируется смещение (Тошер,

* Некоторые исследователи предлагают рассматривать густоту трещин как меру интенсивности напряжений. Это предположение неправомерно, так как, если в породе вмещаются трещины, значит напряжения достигали предела прочности породы, независимо от густоты трещин.

1958, 1960; Iida, 1959; Рац, 1965б). По расчетам Раца эти связи имеют вид * (рис. 23, а, б):

$$\lg E = 1,86 \lg a_0 + 22,18, \quad (20)$$

$$\lg E = 1,80 \lg l_0 + 14,24, \quad (21)$$

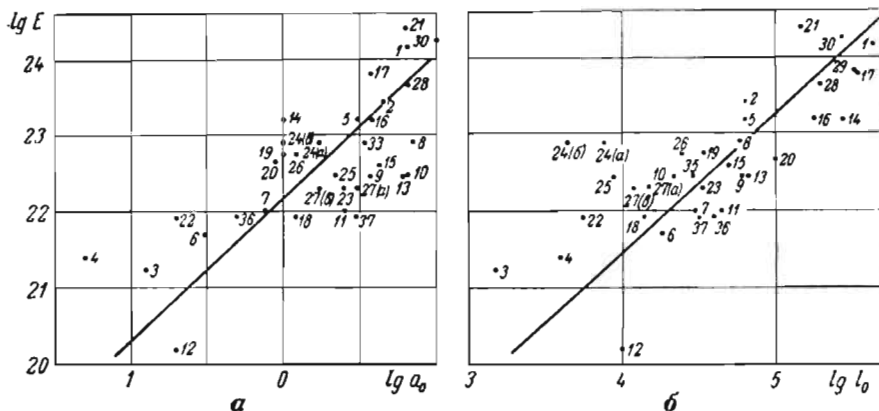


Рис. 23. Зависимость энергии землетрясения от амплитуды «элементарной» подвижки по разрыву, видимой на поверхности земли (а), и от длины разрыва, по которой прослежена подвижка (б)

* При вычислении коэффициентов уравнений (20) и (21) использованы материалы, опубликованные Точером, Иидой, Рихтером (1963) и другими исследователями.

В расчетах мы исходили из предположения, что между параметрами разрывов и энергией землетрясений существует функциональная зависимость, осложняемая ошибками при измерении каждой из переменных. Целью исследования является приближение именно к этой неизвестной функциональной зависимости, а отнюдь не оценка одной из переменных по известной второй. Таким образом, возникает довольно редкая ситуация, требующая расчета не обычных уравнений регрессии $y(x)$, а вычисления параметров так называемой ортогональной регрессии, имеющей уравнение

$$Y = \frac{2r}{S_0 + \sqrt{S_0^2 + 4r^2}} (x - \bar{x}) + \bar{y},$$

где \bar{x} и \bar{y} — оценки средних значений каждой из переменных;
 r — оценка коэффициента корреляции;

$$S_0 = \frac{S_x}{S_y} - \frac{S_y}{S_x}, \quad S_x \text{ и } S_y \text{ — выборочные стандарты переменных.}$$

Все уравнения, приводимые далее в настоящем разделе, являются уравнениями ортогональной регрессии, причем уравнения, связывающие переменные, имеющие равные размерности, существенно зависят от принятых единиц измерения. Желательно разработать строгие методы сравнения линий ортогональных регрессий, построенных по разным выборкам, и методы построения доверительных интервалов для параметров ортогональных регрессий. Отсутствие таких методов приводит к потере значительной части информации, имеющейся в фактическом сейсмотектоническом материале.

где E — энергия землетрясений в эргах, вычисленная в зависимости от магнитуды землетрясения M по формуле (Gutenberg, 1956):

$$\lg E = 11,8 + 1,5M;$$

d_0 — максимальная наблюдаемая амплитуда подвижки на поверхности земли, м;

l_0 — длина разрыва, по которой прослежено смещение, м.

Коэффициенты корреляции равны соответственно 0,73 и 0,77 (существенно отличны от нуля).

Заметим, что соотношение (20) близко к результатам А. Г. Константиновой (1962, 1964), изучавшей связь энергии упругих импульсов, возбуждающихся при разрушении горных пород в лаборатории, с размерами трещин. Эти результаты хорошо увязываются с изложенной в § 11 теорией трещин.

Закон распределения энергии землетрясений (закон повторяемости землетрясений), впервые полученный Б. Гутенбергом и Ч. Рихтером в 1954 г., также сохраняет свою форму применительно к энергии акустических импульсов при разрушении образцов (Виноградов, 1959, 1964; Mogi, 1962) при подготовке горных ударов и применительно к энергии горных ударов (Мысина, 1966)

$$\lg N = \alpha - \gamma \lg E, \quad (22)$$

где N — число землетрясений (ударов, импульсов), обладающих энергией E ;

α и γ — эмпирические коэффициенты, γ имеет величину порядка 0,4, а α колеблется в широких пределах в зависимости от уровня сейсмичности.

Независимость вида распределения (22) от масштабов разрушения является важным доводом в пользу сформулированного ранее принципа инвариантности.

Закон распределения (22) в силу связей (21) и (20) накладывает некоторые ограничения и на возможные законы распределения длин и амплитуд разрывов, растущих в ходе разрушения. В частности, из приведенных соотношений следует, что количество разрывов должно монотонно убывать с ростом их длин и амплитуд. Исходя из сходных соображений, это подчеркивал М. В. Гзовский (1960). Однако сделанный вывод нельзя относить к трещинам и разрывам, фиксирующимся в земной коре геологическими методами. Почему это так, станет ясно из дальнейшего. Здесь же отметим только, что фактическое распределение длин и амплитуд разрывов, фиксируемых геологическими методами, не отличается от логарифмически нормального (Будько, 1958; Куклин и др., 1964), т. е. имеет максимум и левую нисходящую ветвь.

Максимальная амплитуда смещения при землетрясениях связана с длиной возникающего разрыва (Cailleux, 1958; Amilien, 1963; Рац, 1965б). По расчетам Раца *

$$\lg l_0 = 1,15 \lg a_0 + 4,25^{**}. \quad (23)$$

Коэффициент корреляции, равный 0,57, существенно отличен от нуля. Формула (23) показывает, что длина разрывов, выходящих на поверхность земли при сильных коровых землетрясениях, в среднем в 10^4 — 10^5 раз больше величины максимального смещения по ним. Между тем геологам известны совсем другие соотношения: длина сколовых разрывов, как правило, бывает лишь в 10—100 раз больше амплитуды смещения крыльев разрыва.

Детальный анализ этих соотношений позволяет наметить (хотя бы в самых грубых чертах) общую картину формирования тектонических разрывов. Рассмотренные выше три стадии формирования разрывов, как уже отмечалось, не зависят от масштаба разрушения: они характеризуют процесс разрушения на любом, но фиксированном уровне.

Геологам хорошо известно, что крупные разломы имеют длительную историю развития, а не образуются «условно мгновенно» (в геологическом масштабе времени), причем история их развития не может быть сведена к трем стадиям разрушения. Если геологической истории крупных разломов посвящена обширная литература, то физический механизм их роста практически не обсуждался. Насколько известно автору, лишь в работе М. В. Гзовского (1960) говорится о том, что рассмотренные им стадии формирования разрывов вкуче составляют один «импульс роста» разрывов и что «физическая история» разрывов состоит из множества таких импульсов. Развитие этого положения Гзовского лежит в основе представляемой ниже гипотетической картины (Рац, 1965б, 1968в).

Детальный анализ соотношения длин и амплитуд тектонических разрывов, выполненный А. Кайе (Cailleux, 1958; Herve et Cailleux, 1962) и Рацем (1965а, б), позволил установить, что между длинами и амплитудами разрывов *** существует соотношение, аналогичное (23), но с существенно иными параметрами. В первом приближении можно принять эту зависимость с параметрами, полученными при анализе сдвигов, для которых связь наиболее тесная и параметры вычислены поэтому наиболее точно

$$\lg l = 0,83 \lg a + 1,56. \quad (24)$$

* См. сноску на стр. 83.

** В силу большого разброса точек относительно линии ортогональной регрессии коэффициент при $\lg a_0$ можно, по-видимому, считать несущественно отличающимся от единицы.

*** Кайе в своем анализе не расчленил разрывы по типам смещения. Рацем проведено исследование раздельно для сдвигов (в геологическом смысле) и сбросов.

Отметим сразу, что существование этой связи в широком диапазоне масштабов (фактический материал имеется для разрывов длиной от десятков метров до тысячи километров) является вторым серьезным доводом в пользу принятого нами принципа инвариантности*.

На рис. 24 сопоставлены графики зависимостей (23) — слева и (24) — справа. В правой части графика нанесены экспериментальные точки для сдвигов и линии ортогональных регрессий для сдвигов и сбросов. Точки на графиках соответствуют множеству разрывов, изучавшихся одновременно (в геологическом масштабе времени). Мы, однако,

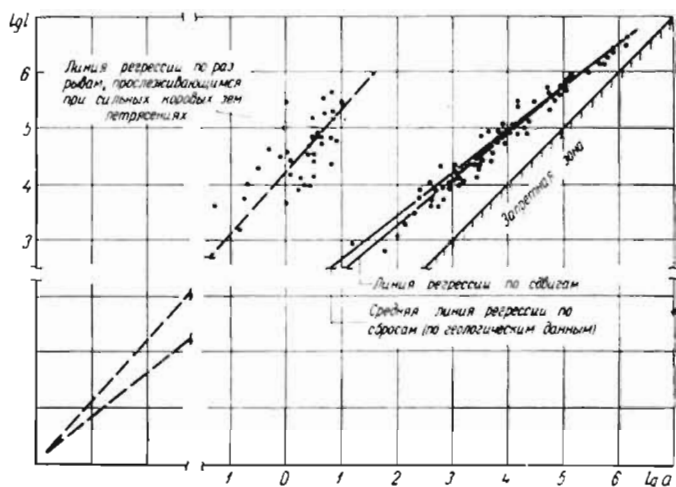


Рис. 24. Схема соотношения длины и амплитуд разрывов

будем трактовать эти графики как отражающие кинетику роста одного разрыва во времени.

Предположим, что точка пересечения графиков зависимостей (23) и (24) соответствует минимально возможной трещине (см. § 11, 13), т. е. точке зарождения разрыва. Рост разрыва от начальной точки представляется идущим импульсивно, отдельными «элементарными» подвижками, каждая из которых сопровождается выделением сейсмической энергии. Каждая подвижка приводит к возрастанию полной (накопленной) амплитуды разрыва и его длины. Начиная со второй элементарной подвижки накопленная амплитуда превосходит (и чем дальше, тем больше) величину амплитуды элементарного смещения. Графики зависимостей (23) и (24) расходятся. С увеличением длины разрыва энергия деформации распределяется во все большем объеме горных пород. При этом, как отмечалось, все более существенную роль играет пластичность среды: пластическая энергоемкость системы

* Заметим также, что форма зависимости (18) столь же устойчива, как и форма распределения энергии землетрясений, а угловой коэффициент при $\lg a$ изменяется, как и γ в выражении (22), довольно слабо.

возрастает. Существенную роль в промежутках между подвижками начинает играть крип — вязкое течение вещества. Если скорость деформации сохраняется постоянной, то процесс роста разрыва оказывается нестационарным (см. также Кузнецова, 1962): в силу роста пластической энергоемкости время, потребное для накопления достаточной для макрохрупкого разрушения (элементарной подвижки) упругой энергии, непрерывно увеличивается. Подвижки становятся все реже. Рано или поздно (в соответствии со скоростью деформации) процесс полностью переходит в вязкое течение, нарушаемое ростом других, более мелких разрывов. Увеличение относительной роли пластической деформации с ростом величины разрывов выражается в нелинейности зависимости (24) в натуральном масштабе: чем длиннее разрыв, тем большей в среднем оказывается его амплитуда по сравнению с длиной. Если для мелких разрывов ($l \approx 1 \text{ км}$) $a/l \approx 1/100$, то для самых крупных ($l \approx 1000 \text{ км}$) $a/l \approx 1/10$ и более.

Частота элементарных подвижек, как и приращение длины и амплитуды разрыва при каждой из них, определяется в основном скоростью деформации: чем выше скорость, тем быстрее скапливается необходимая для подвижки упругая энергия, тем меньшая часть подводимой к системе энергии успевает рассеиваться в результате пластического течения, тем большей будет элементарная подвижка и сопровождающее ее землетрясение (Гзовский, 1963). Наклоны графиков плотности распределения энергии землетрясений (Виноградов, 1962, 1964) и длин трещин (Кузнецов, 1964) зависят от скорости деформации. По-видимому, аналогичным образом дело обстоит и с графиком $l = f(a)$, наклон которого, как показывает фактический материал, несколько меняется для разных районов земного шара.

Различия в наклоне графиков $l = f(a)$ для разных районов определяются скоростью деформации: чем выше скорость деформации, тем меньше роль пластического течения и тем ближе коэффициент при $\lg a$ к единице. В пределе при «мгновенном» хрупком разрушении большого участка земной коры график $l = f(a)$ слился бы с графиком $l_0 = f(a_0)$. При этом крупный разрыв возник бы одноактно (три стадии, однако, сохранились бы хотя и сжатыми во времени) и имел бы амплитуду порядка $1/10^4$ — $1/10^5$ от своей длины. Однако при скоростях деформации, реально присущих литосфере, при существующих градиентах скорости современных тектонических движений, рост крупных разрывов происходит обычно длительное время, складываясь из большого количества элементарных подвижек и крипа. Кроме того, в ходе развития может наступить момент, когда дальнейший рост разрыва будет происходить «по частям». Действительно, длина, по которой прослеживается элементарная подвижка, как правило, не превосходит первых сотен километров (максимально 435 км при землетрясении в Сан-Франциско в 1906 г.). Между тем полная длина сейсмогенных разрывов часто превосходит 1000 км (сдвиг Сан-Андреас). Такая ситуация, по-видимому, характерна

в особенности для случаев, когда скорость деформации в ходе геологической истории уменьшается.

Из приведенных соображений, в частности, вытекает, что амплитуда смещения по разрывам не постоянна по их длине, а должна убывать от максимума до нуля на его концах. Как правило, максимум должен располагаться где-то в средней части разрыва (Буртман и др., 1963; Ризниченко, 1966; Рац, 1965). Рис. 25 свидетельствует о непротиворечивости этого вывода фактическому материалу. (При исследовании корреляционных связей длин и амплитуд мы по возможности пользовались максимальными амплитудами).

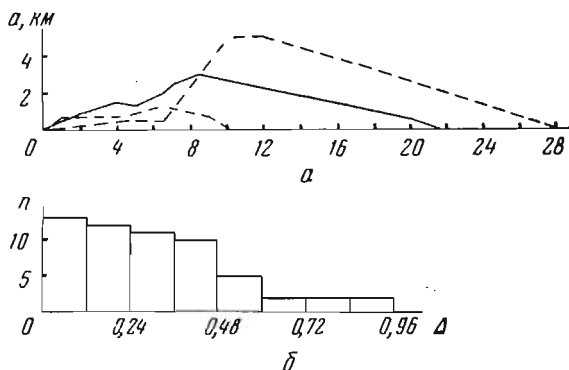


Рис. 25. Амплитуда смещения по разрывам

a — изменение амплитуды по длине сдвигов: 1 — по карте Трасвела и Коупа, 2 — по данным В. Г. Трифонова; b — распределение расстояний от середины сброса до точки, где амплитуда достигает максимума (по карте Вудринга и др.).

Представленная картина роста разрывов в целом, полученная преимущественно на основе анализа фактического геологического материала (с привлечением минимума гипотез и некоторых физических соображений), хорошо коррелирует с концепцией «сейсмического течения горных масс», развиваемой в последнее время Ю. В. Ризниченко (1965, 1966). Согласно этой концепции, «землетрясения — слабые и сильные (и, следовательно, элементарные подвижки по разрывам — М. Р.) представляют как бы микроструктуру макроскопически квазинепрерывного течения земного материала в больших областях» (Ризниченко, 1966, стр. 13). Концепция Ризниченко носит преимущественно модельный характер и сопоставляется с фактами, известными в сейсмологии. Поэтому совпадение результатов (хотя бы качественное) геологии и сейсмологии является здесь существенным.

ЧАСТЬ II

МОДЕЛИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Глава 4

МОДЕЛИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

§ 15. Предварительные замечания

Трещиноватость горных пород — один из важнейших факторов, определяющих взаимодействие инженерных сооружений с литосферой. Сведения о трещиноватости являются поэтому необходимым исходным материалом при обосновании проектов строительства гидротехнических сооружений, карьеров, шахт, а также проектов разработки ряда месторождений полезных ископаемых: месторождений подземных вод, нефти и газа, содержащихся в трещинных коллекторах; месторождений угля, строительного камня и некоторых типов рудных месторождений.

При всей специфичности задач изучения трещиноватости в каждом случае исследования всегда включают ряд общих моментов, обусловленных трещиноватостью как одной из форм проявления неоднородности горных пород. В силу неоднородности объекта исследования и дискретности геологических наблюдений решение геологических задач, и в том числе задач, связанных с изучением трещиноватости, часто включает три этапа:

- 1) оценку тех или иных свойств (каких именно — определяется поставленной задачей) горных пород в точках наблюдений *;
- 2) интерполяцию результатов наблюдений между точками;
- 3) оценку того или иного (опять же в зависимости от поставленной задачи) эффекта — деформации основания сооружения, запасов

* Речь идет о так называемых «физических точках». Физической точкой (применительно к задачам геологии) следует называть некоторый объем в массиве горных пород, достаточно большой по сравнению с характерными размерами имеющихся в массиве элементов неоднородности, но достаточно малый по сравнению с характерными размерами в решаемой задаче.

полезного ископаемого и т. д. — с учетом результатов как наблюдаемых значений свойств, так и интерполяции.

Именно так решаются задачи поисков и разведки полезных ископаемых, разработки месторождений, оценки инженерно-геологических условий строительства и т. д.

Фундаментальные (не только в геологии, но и в физике) понятия неоднородности и анизотропности принято определять так, как это показано в табл. 12.

Т а б л и ц а 12

Породы	Однородные	Неоднородные
Изотропные	Свойства пород не зависят от направления и координат точки опробования	Свойства пород не зависят от направления, но зависят от координат точки опробования
Анизотропные	Свойства пород зависят от направления, но в любом заданном направлении остаются неизменными	Свойства пород зависят от направления и от координат точки опробования

Квалификация объекта исследования как однородного или неоднородного, изотропного или анизотропного всегда относительна и зависит от масштаба осреднения изучаемых свойств в физических точках.

Действительно, согласно известному в физике «правилу \sqrt{n} », введенному в сопротивление материалов Ф. С. Ясинским (1897), коэффициент вариации V (%) большинства свойств неоднородных сред обратно пропорционален корню квадратному из числа элементов неоднородности n в объеме пробы

$$V \propto \frac{1}{\sqrt{n}}$$

Поэтому, если n не слишком велико (а в горных породах это почти всегда так), свойства среды будут претерпевать заметные колебания (Рац, 1968а). Особенно резкими эти колебания бывают в трещиноватых средах (где под n следует подразумевать число трещин). Это объясняется резким отличием свойств среды в полости трещин и в сплошной породе, определяющим большую величину коэффициента пропорциональности в правиле \sqrt{n} . При значениях n , близких к единице, трещиноватую среду нельзя рассматривать ни как однородную, ни как сплошную. Однако критерий применимости гипотезы сплошности к трещиноватой среде будет зависеть от числа трещин n и от характера решаемой задачи, используемых в решении свойств трещиноватого массива, степени различия этих свойств в породе и в полости трещины.

В большинстве случаев характерные размеры оснований сооружений достаточно велики, и трещиноватый массив может считаться сплошным, а иногда и квазиоднородным. Иначе дело обстоит при проведении опытных работ для оценки деформируемости, проницаемости и особенно прочности трещиноватых пород. Здесь число трещин n в объеме области воздействия эксперимента оказывается обычно мало, в результате чего возникает тенденция к проведению все более крупномасштабных и дорогостоящих экспериментов.

Трудоемкость этого пути и отсутствие критериев для оценки получаемых при этом результатов требует разработки расчетных способов оценки свойств трещиноватых пород с использованием параметров сети трещин. Такие способы существуют, и в свою очередь, ставят вопрос о способах оценки параметров трещиноватости геологическими методами.

Таким образом, мы располагаем в настоящее время двумя возможностями оценки свойств (по крайней мере пустотности, блочности, проницаемости и деформируемости) трещиноватых массивов в физической точке: возможностью натуральных экспериментальных исследований свойств трещиноватых пород *in situ* (опытно-фильтрационных работ, прессиометрии и т. д.) и возможностью оценки свойств трещиноватых пород на основе известных параметров сети трещин. Чтобы воспользоваться расчетным способом, необходимо:

1. Построить локальную модель сети трещин, адекватную реальной сети в том смысле, чтобы на модели отражались существенные (с точки зрения решаемой задачи) черты структуры массива в данной физической точке.

2. Указать способы вычисления исследуемого свойства породы (проницаемости, деформируемости) по известным значениям параметров трещиноватости $\alpha, \beta \dots$, т. е. указать функцию $L = L(\alpha, \beta \dots)$.

3. Указать способы оценки параметров трещиноватости $\alpha, \beta \dots$ в натуре.

Решения этих задач будут рассмотрены ниже.

Обратимся к задаче интерполяции свойств пород, определенных одним из рассмотренных способов в некоторых физических точках массива. При решении этой задачи желательно учитывать обширную информацию о геологических закономерностях развития трещин (см. главу 2). Это требование скорее всего может быть удовлетворено при построении так называемых «моделей — откликов» сети трещин в массиве горных пород. При разумном масштабе осреднения параметров трещиноватости оказывается возможным передать довольно тонкие нюансы геологического строения массива, при формализованном описании которых пришлось бы столкнуться с серьезными математическими трудностями.

По-видимому, масштаб осреднения параметров сети трещин разумно принять такого же порядка, как фактический масштаб осреднения при натуральных исследованиях механических и фильтрационных свойств пород.

Будем считать (для определенности), что линейные размеры области воздействия экспериментов, направленных на изучение свойств пород *in situ*, не превышают нескольких метров. Тогда структура массива будет включать комплекс элементов неоднородности низшего порядка, из которых важнейшими являются слоистость и макротрещиноватость, а также более крупные элементы неоднородности: элементы складок, зоны разрывов, фациальные изменения состава и свойств пород и т. д. Очевидно, число этих элементов неоднородности в пределах зоны влияния сооружения относительно мало. Они могут и должны быть изучены индивидуально. В результате составляются геологическая карта и разрезы, являющиеся графической моделью наиболее крупных элементов геологической структуры массива.

В практике изысканий этим путем обычно идут и дальше при изучении элементов неоднородности более высокого порядка — слоистости, трещиноватости. При этом делается попытка «задокументировать» (чаще всего зарисовать) все трещины, видимые в обнажениях и горных выработках. Между тем задокументировать «все» трещины физически невозможно. Во-первых, их слишком много *, а, во-вторых, лишь ничтожная их часть доступна наблюдению в обнажениях и горных выработках. Если даже предположить, что геологу удалось задокументировать все трещины, не существует способа использовать столь громоздкую документацию для оценки инженерно-геологических свойств пород. В такой ситуации необходимо привлечь статистические методы исследования, основанные на изучении конечных выборок из практически бесконечного множества трещин. Таким образом, модели — отклики трещиноватости массива горных пород должны строиться статистическими методами на геологической основе (Рац, 1963а).

Построенная таким образом модель — отклик сети трещин может явиться разумной основой не только для интерполяции результатов натурных экспериментов, но и для их планирования. Последнее особенно важно, если учесть дороговизну и сложность проведения таких опытов.

На базе модели — отклика сети трещин, развитых в исследуемом массиве, на базе «точечных» оценок свойств трещиноватых пород, путем интерполяции должна строиться структурная модель массива, отражающая пространственное распределение свойств трещиноватых пород в естественном залегании. Завершающий этап решения задачи состоит в следующем. На основании этой модели и на основании нагрузок, гидравлических напоров и т. д., передаваемых сооружением, методами механики горных пород и инженерной гидрогеологии

* Число трещин в изометричном слоистом массиве, содержащем n слоев, по самым скромным оценкам обычно не менее $n^2 \div n^3$, а чаще значительно больше. Таким образом, если, например, в основании плотины исследуется разрез, содержащий 1000 слоев, то число трещин в активной зоне будет порядка многих миллионов.

могут быть рассчитаны свойства массива в целом как среды или основания конкретного инженерного сооружения.

Этот этап, в сущности, уже выходит за рамки инженерной геологии и здесь подробнее рассматриваться не будет. Заметим только, что на этом этапе особую роль играют физические особенности решаемой задачи. Важно различать с этой точки зрения «интегральные» задачи, при решении которых неоднородность массива горных пород (в том числе и его трещиноватость) так или иначе осредняется, и «экстремальные» задачи, решения которых чувствительны к аномальным значениям свойств пород на локальных участках. Примерами первых могут служить задачи оценки фильтрационного расхода в основании плотины, оценки величины осадок основания. Примеры вторых — задачи оценки суффозионной устойчивости оснований, оценки устойчивости откосов в скальных породах.

Различие этих двух классов задач принципиально и должно, по-видимому, учитываться еще на первых этапах исследований. При этом мало-мальски строгое решение экстремальных задач связано с применением специального математического аппарата экстремальной статистики. Геологические исследования для решения экстремальных задач даже на стадии разведки должны содержать существенный элемент поиска, что делает их весьма своеобразными.

§ 16. Локальные модели сети трещин

Локальные модели сети трещин (т. е. модели сети трещин в физической точке массива, в единой «геологической позиции») сперва рассмотрим на простейшем примере плоской сети одной системы трещин. Далее обобщим полученные результаты на случай пространственной сети нескольких систем.

На рис. 26 приведена зарисовка сети следов трещин одной системы в плоскости обнажения (*a*) и модели (*b*, *в*, *г*) этой сети, пригодные для оценки пустотности, блочности, проницаемости и деформируемости трещиноватых пород. Модель *в* предложена Е. С. Роммом (1966) для оценки проницаемости. В этой модели трещины представляются в виде плоско-параллельных бесконечных щелей с постоянным по всей длине раскрытием. Для оценки деформируемости И. В. Тарасовой (1968) предложена модель *г*. При оценке деформируемости нет надобности рассматривать все трещины в отдельности — важно их суммарное раскрытие. Но при этом необходимо учитывать контакты противоположных стенок трещин, не играющие роли при оценке проницаемости.

Модели Ромма и Тарасовой являются детерминированными: в них входят осредненные параметры трещиноватости (что обозначено черточками над соответствующими символами на рисунке). В силу резкой изменчивости параметров трещиноватости представляет интерес построение моделей, позволяющих оценивать вариации свойств трещиноватых пород.

Естественно, что для решения разных задач (оценки проницаемости, деформируемости) предложены модели сети трещин, отражающие разные стороны реальной сети трещин. Однако это представляет значительные неудобства для геолога. Действительно, неужели необходимо изучать трещиноватость столькими разными способами,

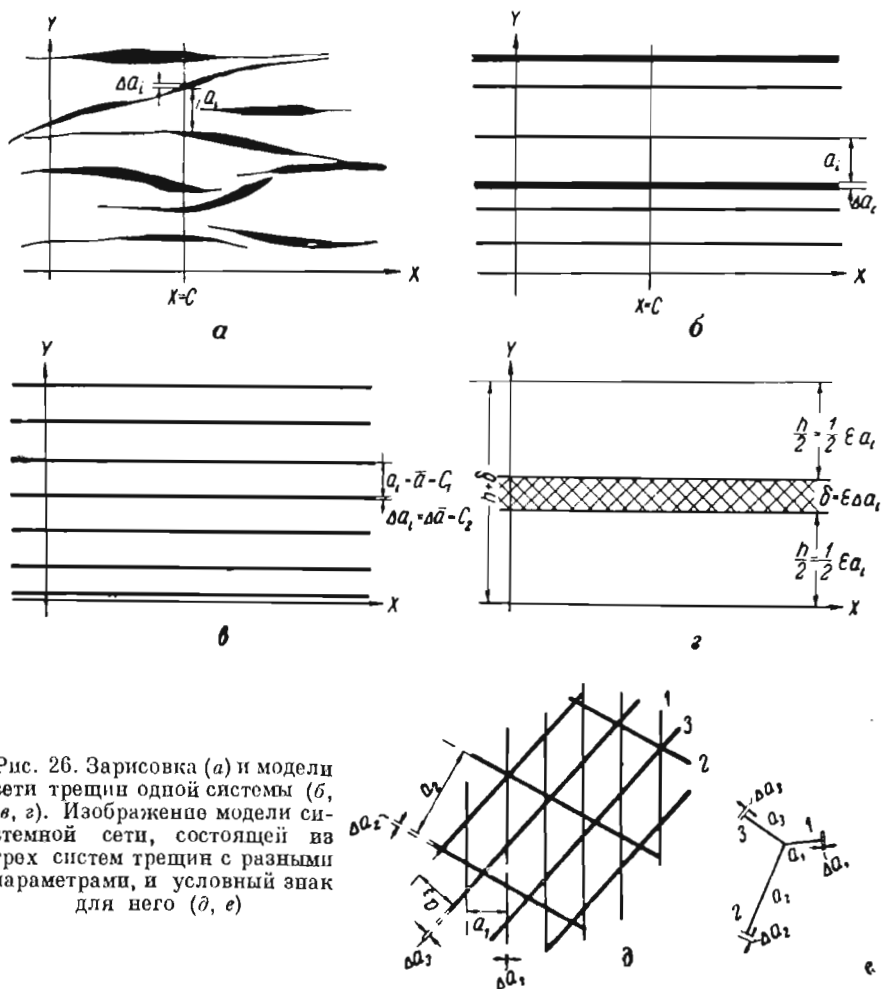


Рис. 26. Зарисовка (а) и модели сети трещин одной системы (б, в, г). Изображение модели системной сети, состоящей из трех систем трещин с разными параметрами, и условный знак для него (д, е)

сколько задач необходимо решить инженеру по результатам изучения трещиноватости?! В связи с этим представляет интерес построение «универсальной» модели сети трещин, содержащей информацию, необходимую для решения различных прикладных задач. «Универсальность» здесь, конечно, относительно: в принципе невозможно построить модель, пригодную для решения любых задач. Однако построить модель, пригодную для решения нескольких фиксирован-

ных задач, иногда можно. Такая возможность существует и в данном случае.

На рис. 26, б показана модель, позволяющая вычислять (в соответствии с теориями Ромма и Тарасовой) проницаемость и деформируемость трещиноватых пород, а также их блочность и пустотность. С помощью этой модели можно также по известным вариациям густоты и ширины трещин оценить вариации перечисленных свойств трещиноватых пород. Помимо параметров, показанных на рис. 26, обобщенная модель так же, как модель Тарасовой, характеризуется величиной ξ относительной площади (относительной длины — в плоском случае) контактов стенок трещины друг с другом. Величина ξ оценивается из теоретических соображений и для небольших глубин может быть принята равной $3 \cdot 10^{-4}$ (Тарасова, 1969). Ориентировка системы трещин описывается, как это принято, величинами угла и азимута падения трещин.

Напомним, что на рис. 26 изображены модели одной системы трещин, т. е. множества трещин, примерно параллельных друг другу. Реальная сеть трещин, состоящая обычно из нескольких систем, отображается соответственно комбинацией моделей, показанных на рис. 26 и отличающихся друг от друга своими параметрами (рис. 26, д). Существенной особенностью такого рода моделей является возможность учета анизотропии свойств массива трещиноватых пород.

Легко видеть, что модели Ромма и Тарасовой получаются из «универсальной» модели путем осреднения (в первом случае) или суммирования (во втором) величин a и Δa . Таким образом, наша модель, действительно, содержит всю информацию о сети трещин, необходимую для использования теорий Ромма и Тарасовой.

Вопросы о геологической интерпретации модели, условиях ее применимости, разумных способах и масштабах осреднения при расчете свойств трещиноватых пород существенным образом связаны с теми допущениями, которые в явном или неявном виде сделаны при построении модели и соответствующих теорий. Допущения физического характера, сформулированные Роммом и Тарасовой при выводе своих теорий, будут приведены в главах 5 и 6. Здесь мы рассмотрим допущения чисто структурные, определяемые геометрией сети трещин и геометрией модели.

Операция построения плоской модели сети следов трещин фиксированной системы, как это видно из рис. 26, б, состоит в следующем.

1. На плоскости, в среднем перпендикулярной к трещинам рассматриваемой системы, выбирается система координат XU так, что ось X в среднем параллельна следам трещин.

2. Проводится произвольная нормаль $X = C$ к следам трещин.

3. Относительно длин следов трещин l предполагается, что $l = \infty$ для следов, пересекающих прямую $X = C$, $l = 0$ для следов, не пересекающих прямую $X = C$.

4. Углы φ_i , образованные следами трещин с осью X , осредняются, так что в результате п. 1 оказывается $\bar{\varphi} = 0$.

5. Величины a и Δa измеряются вдоль прямой $X = C$.

В итоге, помимо ориентировки системы и величины ξ модель характеризуется двумя последовательностями величин $\{a_i\}$ и $\{\Delta a_i\}$, $i = 1, 2, \dots$. Эти последовательности (см. § 14) представляют собой последовательности весьма нерегулярно меняющихся величин, причем на достаточно больших участках величины a и Δa не претерпевают закономерного увеличения или уменьшения. Наиболее простым способом свертки этой громоздкой информации является замена рядов чисел $\{a_i\}$ и $\{\Delta a_i\}$ их средними значениями и дисперсиями. При этом, очевидно, теряется значительная часть информации об исходных последовательностях и в том числе сведения о внутренней структуре этих рядов и взаимосвязи составляющих их величин. Однако информация, необходимая для решения прикладных задач, по-видимому, в основном сохраняется.

Рассмотрим последовательно допущения, лежащие в основе охарактеризованной процедуры.

Выбор системы координат XU не связан с какими-либо допущениями, если система трещин выделена. Напротив, произвольный выбор нормали $X = C$ предполагает, что любые значения C в некотором смысле равноправны, а именно: требуется, чтобы ряды значений $\{a_i\}$ и $\{\Delta a_i\}$ не менялись бы существенно в зависимости от положения нормали. Это значит, что в основе рассматриваемой процедуры лежит допущение о равномерном распределении параметров трещиноватости на плоскости XU .

Предположение относительно длин следов трещин, очевидно, мало скажется на структуре непрерывной сети трещин, но может существенно исказить структуру прерывистой сети. Это искажение неважно при оценке блочности и пустотности, но весьма важно при оценке проницаемости и деформируемости. Следовательно, при решении этих важнейших задач наша модель может дать несмещенные оценки лишь для непрерывной сети трещин.

Измерение величин a_i и Δa_i вдоль некоторой прямой неявным образом содержит в себе осреднение этих параметров: каждая трещина (или пара соседних трещин) измеряется только один раз, в то время как величины a_i и Δa_i меняются вдоль оси X (по простиранию следов трещин). При равномерной сети трещин это осреднение дает, видимо, состоятельные и несмещенные оценки a_i и Δa_i , однако проницаемость и деформируемость в большей мере зависят от «переживов» трещин, чем от мест их расширения, что может послужить источником некоторого завышения величин проницаемости и деформируемости.

Нетрудно убедиться, что основные допущения, необходимые для реализации охарактеризованной процедуры (равномерность и непрерывность сети трещин), столь же необходимы и при использовании моделей Ромма и Тарасовой в их «первозданном» виде. Таким образом, предлагаемое обобщение не влечет за собой никаких дополнительных ограничений. Наоборот, использование ряда распределения величин a , Δa вместо осредненных значений позволяет снять пред-

положение Ромма (правомерное в нефтяной, но крайне обременительное в инженерной геологии) о примерном постоянстве величины Δa . Действительно, правомерность введения в инженерные расчеты осредненных параметров трещиноватости основана на приближенном равенстве среднего значения функции y от среднего значения аргумента x :

$$\bar{y}(x) = y(\bar{x}). \quad (25)$$

Однако, как известно, для нелинейных функций это равенство может служить лишь для весьма грубых оценок. Параметры трещиноватости входят в расчетные формулы проницаемости нелинейно, а дисперсии их (в особенности дисперсия ширины трещин) весьма велики. В этих условиях целесообразно вводить в расчет неосредненные параметры трещиноватости и проводить осреднение множества решений. Реализация таких расчетов при использовании электронно-вычислительных машин не вызывает затруднений (см. главу 8). При этом естественно воспользоваться методом Монте-Карло для генерации параметров трещиноватости по заданным законам распределения. Отсюда ясно, что вопрос о законах распределения параметров трещиноватости отнюдь не является праздным и приведенные выше результаты их изучения имеют непосредственное прикладное значение.

Рассмотрим, как может повлиять на проницаемость и деформируемость прерывистость сети трещин. Как указывалось, Роммом развита теория, связывающая трещинную проницаемость массива с параметрами детерминированной сети трещин, состоящей из любого числа произвольно ориентированных систем. Существенно, что трещины представляются Роммом в виде бесконечных щелей. Для одной системы трещин, параллельной движению жидкости, проницаемость оказывается функцией двух параметров a и Δa . Однако реальные трещины обладают конечной длиной. Обратимся к рис. 27. Из рисунка ясно, что фактическое движение жидкости будет проходить не по всем трещинам, а лишь по тем из них (или по тем их частям), которые подчеркнуты пунктиром. При этом жидкость перетекает из одной трещины в другую по трещинам иной системы, пересекающим рассматриваемую. Следовательно, если длина трещины мала по сравнению с длиной пути фильтрации, эффективное среднее расстояние

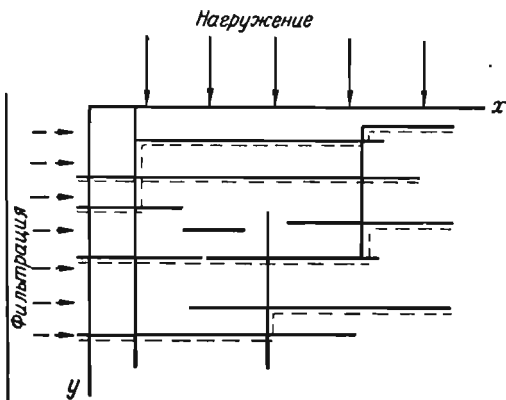


Рис. 27. «Работа» трещин одной системы при фильтрации или нагружении массива

между трещинами (т. е. расстояние между фактически фильтрующими трещинами) будет больше, чем среднее расстояние \bar{a} , получаемое при полевых измерениях по нормали к плоскостям трещин. Очевидно, что этот эффект связан со степенью прерывистости сети трещин (см. § 3). В прерывистой сети он будет особенно велик, в непрерывной может быть мал. Очевидно, что для наиболее распространенных непрерывных сетей этим эффектом можно пренебречь. К сожалению, у нас пока нет конструктивного подхода к оценке эффективной густоты трещин по данным полевых измерений.

Задача разработки такого подхода тем более актуальна, что в результате различия фактической (получаемой при полевых измерениях) и эффективной густоты трещин может возникнуть зависимость проницаемости от длины пути фильтрации, что существенно важно для инженерных приложений.

Аналогичная ситуация существует и при оценке деформируемости. Геометрически модель Тарасовой отличается от модели Ромма лишь введением дополнительного параметра ξ и может быть получена путем осреднения из модели (рис. 26, б). Тарасова показала, что короткие (по сравнению с длиной нагружаемого участка) трещины существенно не влияют на деформируемость массива. Практически ими можно пренебречь. Но если короткие трещины объединяются друг с другом пересекающимися их трещинами другой системы, то они становятся эквивалентны одной длинной. Возвращаясь к рис. 27, легко видеть, что практически при нагружении массива в направлении, перпендикулярном трещинам, «работают» те же трещины (подчеркнутые пунктиром), что и в случае фильтрации вдоль них.

Казалось бы, в данном случае учесть наличие сплошных целиков между концами трещин можно с помощью параметра ξ . Однако при наблюдающемся в природе кулисном расположении трещин (показанном на рис. 27) оценить относительную длину целиков ничуть не легче, чем найти эффективную густоту трещин в случае с проницаемостью. В сущности, это одна и та же задача. Дальнейшее также вполне аналогично: та же роль прерывистости сети трещин, возможность проявления того же масштабного эффекта — уменьшения деформируемости с увеличением длины нагружаемого участка.

По-видимому, и в этом случае различием фактической и эффективной густоты трещин (т. е. наличием сплошных перемычек между концами трещин) для сплошной сети трещин можно пренебречь. Во всяком случае при этом предположении, как и в случае с проницаемостью, получаются разумные результаты, излагаемые в следующих главах. Тогда параметр ξ сохраняет смысл относительной длины контактов противоположных стенок трещин.

Легко видеть, что, имея оценки параметров модели для каждой из систем трещин, совместно развитых в изучаемом обнажении (или выработке), легко получить модель систем сети трещин, состоящей из любого числа различно ориентированных систем. На рис. 26, в показана для примера плоская модель сети, состоящей из трех систем трещин, параметры которых осреднены. Вообще говоря,

сетку, подобную указанной на рис. 26, *д*, можно было бы непосредственно наносить на карту трещиноватости. Однако более удобно использовать условное изображение, показанное на рис. 26, *е* и несущее в точности ту же информацию.

Локальная модель, обобщенная для случая произвольного числа систем трещин с разными параметрами, позволяет оценить фильтрационную и деформационную анизотропию трещиноватого массива по результатам изучения трещиноватости. Соответствующие примеры будут приведены в главах 5 и 6. Заметим также, что осредненные данные о густоте трещин, получаемые на модели (рис. 26, *б*), могут быть использованы и при оценке блочности трещинного массива. Приближенные методы оценки блочности и некоторые другие приложения обсуждаются в главе 7.

§ 17. Модели — отклики сети трещин массива горных пород

Основным условием применимости построения локальной модели является равномерность сети (§ 16). Между тем, как было показано в главах 2, 3, сеть трещин претерпевает не случайные изменения в пространстве, связанные как с влиянием различных геологических факторов (состав и мощность слоев, близость разрывов и т. д. и т. п.), так и с существованием неслучайных зон сгущения трещин, отвечающих второй стадии разрушения. Между тем такие зоны особенно существенны для приложений. Эту трудность можно преодолеть путем оценки параметров локальной модели отдельно для зон неслучайного сгущения трещин и для участков равномерной трещиноватости.

Таким образом, локальная модель может служить для описания трещиноватости в пределах единой «геологической позиции» (Королев, 1951), где параметры трещиноватости претерпевают лишь незакономерные колебания, т. е. в пределах того или иного элемента неоднородности низшего порядка (Рац, 1968*а*). Однако в реальных массивах параметры трещиноватости, как правило, претерпевают те или иные систематические изменения в пространстве. Эти изменения могут быть отображены путем построения карты трещиноватости или различных поверхностей (линий) тренда, параметров трещиноватости. При этом неоднородность низшего порядка берется относительно размеров естественных обнажений, в которых изучается трещиноватость.

В главе 2 при описании геологических закономерностей развития трещин мы пользовались, в сущности, этой же моделью. При этом было показано, что как густота (расстояние между трещинами), так и ширина трещин тесно связаны с геологическими условиями. Был указан целый ряд факторов (разных для трещин разного происхождения), существенно влияющих на средние значения и дисперсию a и Δa . Таким образом, эти показатели имеют вполне определенный геологический смысл, и их оценка позволяет даже в ряде случаев

получить дополнительную информацию о трещинной тектонике района.

Примеры моделей — откликов сетей трещин в основаниях конкретных инженерных сооружений опубликованы в ряде работ (Рац, 1968б; Количко и Рац, 1966; Чернышев, 1966; Количко и Погребиский, 1967; Погребиский, 1969). При этом для получения обзорных результатов во всех случаях проводилось осреднение параметров трещиноватости по отдельным обнажениям. Таким образом, работа сводилась к двум этапам.

1. В пределах каждого обнажения (отрезка горной выработки), где параметры трещиноватости не претерпевают систематических изменений, строится локальная модель для каждой системы трещин в отдельности.

2. Параметры локальной модели осредняются и наносятся на геологическую карту и (или) строится регрессия параметров трещиноватости по координатам пространства.

Таким образом, в целом для каждой точки изученных массивов горных пород имеется возможность путем интерполяции дать оценки параметров модели сети трещин, показанной на рис. 26. Это позволяет, в свою очередь, на основе указанных выше допущений рассчитывать проницаемость и деформируемость в различных точках массива и их анизотропию. Однако проводящееся при таком подходе априорное осреднение параметров трещиноватости, как указывалось выше, может приводить к смещению оценок проницаемости трещиноватых пород. Для решения конкретных фильтрационных задач лучше производить оценку проницаемости по неосредненным данным в каждой точке, а затем строить карты осредненных результатов расчета, т. е. карты трещинной проницаемости.

§ 18. Классификация массивов горных пород по степени трещиноватости

Даже упрощенная модель трещиноватости в приложении к реальным массивам горных пород дает довольно сложную картину. Для решения ряда практических задач (классификация, корреляция тех или иных свойств пород со степенью трещиноватости) было бы удобно еще более упростить модель.

Наиболее существенное упрощение может быть получено путем замены анизотропной сети трещин некоторой фиктивной изотропной сетью. В этом случае от реальной сети трещин на модели остается, очевидно, только так или иначе выраженная степень трещиноватости.

Для инженерных приложений наибольший интерес представляют две обобщенные таким образом характеристики трещиноватости: блочность пород в естественном залегании (т. е. размер блоков b , отделенных друг от друга трещинами) и трещинная пустотность (отношение суммарного объема трещин — щелей к единице объема массива горных пород). Обе величины вычисляются по параметрам

локальной модели и легко оцениваются при полевом изучении трещиноватости

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\Delta}a_i}{a_i + \bar{\Delta}a_i}, \quad (26)$$

где $\bar{\Delta}a_i$ — ширина трещин i -й системы;

\bar{a}_i — среднее расстояние между трещинами i -й системы;

n — число систем трещин, совместно развитых в данном объеме массива;

$$b = \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1\bar{a}_2\bar{a}_3}{\left(1 + \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1\bar{a}_2\bar{a}_3}{a_4}}\right)\left(1 + \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1\bar{a}_2\bar{a}_3}{a_5}}\right) \dots}}, \quad (27)$$

где $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3$ — средние расстояния между трещинами трех систем наиболее густых трещин;

$\bar{a}_4, \bar{a}_5 \dots$ — то же для систем более редких трещин, развитых совместно с тремя первыми.

Интенсивность, трещиноватости, охарактеризованная величинами P , и b , может быть принята за основу для классификации массивов горных пород по степени трещиноватости (табл. 13).

Таким образом, по интенсивности трещиноватости массивы горных пород подразделяются на 16 классов, имеющих двойное обозначение ($A = 1, B = 3$ и т. п.). Буква в обозначении класса указывает величину трещинной пустотности, цифра — линейный размер блоков (см).

Интенсивность трещиноватости позволяет при некоторых допущениях оценить водопроницаемость массива (см. главу 6). Так, основываясь на локальной модели (т. е. полагая трещины плоскими зияющими щелями бесконечной длины) для трех ортогональных систем трещин с одинаковыми параметрами («кубическая кладка») получим коэффициенты фильтрации ($m/сутки$), приведенные в табл. 13.

В последней графе табл. 13 приведены ориентировочные отношения модулей деформации горной породы (в куске) и трещиноватого массива (E_k/E_m), вычисленные при тех же допущениях, что и водопроницаемость. Относительная площадь контактов противоположных стенок трещин принята при этом порядка $3 \cdot 10^{-4}$ (густота трещин при фиксированной геометрии сети и величине трещинной пустотности на величину деформируемости в принятой модели не влияет).

Относительно приведенной в таблице классификации необходимо сделать три дополнительных замечания.

1. В приведенных цифрах (K_f и E_k/E_m) следует обратить внимание лишь на порядок, который, по-видимому, не будет сильно меняться при отклонении сети трещин от ортогональной, но может существенно

* Формула (27) в несколько иной форме впервые получена Г. В. Тохтуевым и Д. И. Бетным (1960).

Пустотность, %	Классы и коэффициенты фильтрации при густоте сети (блочности) в см								E_K/E_M
	Очень редкая		Редкая		Густая		Очень густая		
	300—100		100—30		30—10		10—3		
	Класс	K_Φ	Класс	K_Φ	Класс	K_Φ	Класс	K_Φ	
Малая 0,1—0,3	A-1	10^{-1}	A-2	10^{-2}	A-3	$5 \cdot 10^{-3}$	A-4	10^{-4}	2
Средняя 0,3—1,0	B-1	$5 \cdot 10^0$	B-2	10^0	B-3	$5 \cdot 10^{-2}$	B-4	10^{-2}	6
Высокая 1,0—3,0	B-1	10^2	B-2	10^1	B-3	$5 \cdot 10^0$	B-4	10^{-1}	20
Аномально высокая 3,0—10,0	G-1	*	G-2	$5 \cdot 10^2$	G-3	$5 \cdot 10^1$	G-4	10^1	60

* В массиве с трещиноватостью класса Г-1 уже при уклоне 0,01 возможно возникновение турбулентного течения в трещинах.

измениться, если сеть трещин будет прерывистой или трещины будут иметь заполнитель. Прерывистость трещин, как и наличие в них заполнителя, равносильна (в смысле влияния на проницаемость и деформируемость массива) сужению трещин или разрежению их сети (см. § 15).

2. Не все выделенные классы трещиноватости встречаются в природе одинаково часто. Так, например, сети трещин с аномально высокой пустотностью представляют собой экзотическое явление и встречаются преимущественно вблизи дневной поверхности, в зоне интенсивной разгрузки в некоторых эффузивах и закарстованных породах (классы Г-1, Г-2) либо в зонах тектонического дробления (классы Г-3, Г-4). Сети трещин с высокой пустотностью (классы В-1—4) представляют переходную область от указанных аномалий к «обычным» условиям. Редкая и очень редкая сети трещин с малой и очень малой пустотностью (классы А-1, 2; В = 1, 2) характерны для эффузивов, массивных и толстослоистых осадочных пород и интрузивов в зоне разгрузки. Для тектонической трещиноватости и трещиноватости тонкослоистых осадочных пород характерна густая сеть трещин с малой и средней пустотностью (классы А-3, Б-3).

Реже, преимущественно в зонах дробления на значительных глубинах (вне зоны разгрузки и выветривания), встречается очень густая сеть трещин с малой и средней пустотностью (классы А-4, Б-4). Наиболее распространенными являются, по-видимому, классы А-2, 3, Б-3, 4 вне зоны разгрузки и классы Б-2, 3, В-2, 3 в зоне разгрузки и выветривания.

3. Принятая при разработке классификации модель в виде сплошной сети из трех ортогональных систем трещин с одинаковыми пара-

метрами характеризуется любыми двумя параметрами из трех: объемной пустотностью, блочностью (густотой сети) и раскрытием трещин. Классификация трещиноватости основана на данных по густоте и пустотности (табл. 13). Аналогично можно было бы классифицировать по густоте и ширине либо ширине и пустотности. Читатель может легко осуществить любую из этих классификаций, имея в виду, что в принятой модели $\Pi = \frac{3\Delta a}{a}$ и $a = b$, и пользуясь соотношениями проницаемости и деформируемости с параметрами сети трещин, которые приводятся в следующих главах.

Заметим, что грубой оценкой величины объемной трещинной пустотности (Π) может служить величина «коэффициента трещинной пустотности» — $K_{тр}$ (Нейштадт, 1953, 1957). При этом, однако, необходимо иметь в виду, что величина $K_{тр}$ является смещенной оценкой Π . Их средние значения связаны примерным соотношением

$$\Pi = 1,5 - 2K_{тр} \% \quad (28)$$

Учитывая, что подсчет «коэффициента трещинной пустотности» пользовался довольно широкой популярностью, была проведена специальная проверка соотношения (28). Истинная трещинная пустотность массива песчаников в Нуреке определялась на обнажениях размером порядка 20×2 м по формуле (26). Коэффициент трещинной пустотности определялся по методике Л. И. Нейштадт на площадках 2×2 м, располагавшихся в пределах тех же обнажений. Определения Π и $K_{тр}$ делались разными людьми. Результаты определений приведены в табл. 14.

Таблица 14

№ обн.	14		16			2	3	19
Π , %	0,67	0,81	0,27	0,27	0,51	1,30	1,31	0,37
$K_{тр}$, %	0,46	0,87	0,77	0,23	0,18	0,68	0,34	0,05
№ обн.	10—12			29	30		Среднее	
Π , %	0,37	0,68	0,25	0,61	0,75	7,77	0,60	
$K_{тр}$, %	0,48	0,35	0,16	0,28	0,33	5,18	0,40	

Среднее соотношение по 13 площадкам $\Pi : K_{тр} = 1,50$, что практически совпадает с соотношением (28).

ТРЕЩИНОВАТОСТЬ И ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ

§ 19. О законе движения подземных вод
в трещиноватых массивах

Одним из основных вопросов применения теории фильтрации к трещиноватым массивам является вопрос о режиме движения подземных вод. На основании данных гидравлики и работ И. Ф. Володько (1941), Г. М. Ломизе (1951), Е. С. Ромма (1966), В. Н. Жиленкова (1967), следует, что режим движения воды в трещинах зависит, главным образом, от ширины трещин, относительной шероховатости $\frac{l}{\Delta a}$ (здесь l — высота выступов на поверхности трещин) и некоторых других геометрических параметров трещин. Разумеется, он зависит также и от характеристики жидкости, но мы акцентируем внимание на геометрии трещиноватой среды.

В трещинах с извилистостью и шероховатостью стенок характерной для горных пород (например, для меловых песчаников Таджикской депрессии, на которых строится Нурекская ГЭС), зависимость режима движения воды от градиента потока и ширины трещины выражена графиком (рис. 28).

Сопоставление графика В. Н. Жиленкова с распределением ширины трещин (см. рис. 28, табл. 15) отчетливо показывает, что в массивах горных пород в районе Нурекской ГЭС при реально возможных средних градиентах напора в подавляющем большинстве трещин имеет место ламинарный режим, а следовательно, в массиве в целом — движение по закону Дарси.

Исследования трещиноватости в других районах и в других породах показывают, что ширина и шероховатость трещин в меловых породах Таджикской депрессии характерны для многих скальных массивов. Поэтому рассмотренный случай можно считать типичным. Трещины шириной в несколько миллиметров, а тем более в несколько сантиметров, в которых может наблюдаться отклонение от линейного закона сопротивления, практически встречается редко и лишь у самой поверхности земли в зоне разгрузки. Более часты они в растворимых породах и лавовых покровах. Отсюда — нам представляются в большинстве случаев необоснованными опасения отклонений от линейного закона фильтрации, если они связаны с представлением о существовании в массиве широких трещин. Отклонения от линейного закона еще менее вероятны, если рассмотреть не только распределение ширины трещин, но и распределение гидравлических уклонов в трещинах. Очевидно, что уклоны в отдельных трещинах сильно отличаются от уклонов, средних для массива. В силу ограниченности каждой отдельной трещины и разобщенности трещин с экстремально большими значениями ширины связь между гидравлическим уклоном и шириной трещин носит обратный характер, т. е. в широких трещинах (руслах) уклоны меньше, чем в узких, так же как это имеет место в речной и озерной сети.

Таблица 15

Местоположение участка измерений	Количество трещин $\left(\frac{\%}{\text{нат. числа}}\right)$ шириной (мм) от — до														
	0,00—0,25	0,25—0,50	0,50—1,00	1,0—1,5	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
Усть-Илимская ГЭС на р. Ангаре, трапцовая интрузия, штольня № 1 все видимые трещины в интервале 0—6 м от устья	$\frac{29,5}{28}$	$\frac{10,5}{10}$	$\frac{18,9}{18}$	$\frac{7,4}{7}$	$\frac{13,7}{13}$	$\frac{6,3}{6}$	$\frac{1,05}{1}$	$\frac{5,26}{5}$	$\frac{1,05}{1}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{2,1}{2}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,05}{1}$	$\frac{1,05}{1}$	$\frac{2,1}{2}$
То же, интервал 6—20 м от устья	$\frac{8,5}{17}$	$\frac{47,5}{95}$	$\frac{30,5}{61}$	$\frac{6,5}{13}$	$\frac{6,5}{13}$	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$
Нурекская ГЭС, песчаники и алевриты нижнего мела, штольня № 129, все видимые трещины в интервале 0—24 м от устья	$\frac{60}{209}$	$\frac{21,8}{76}$	$\frac{14,08}{49}$	$\frac{2,3}{8}$	$\frac{0,86}{3}$	$\frac{0,29}{1}$	$\frac{0,29}{1}$	$\frac{0,29}{1}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$
То же, интервал 24—41 м от устья	$\frac{14,85}{26}$	$\frac{46,3}{81}$	$\frac{32,5}{57}$	$\frac{6,3}{11}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$
То же, на обнажении длиной 130 м, все трещины одной системы	$\frac{48,6}{443}$	$\frac{15,6}{142}$	$\frac{21,4}{195}$	$\frac{6,9}{62}$	$\frac{4,06}{37}$	$\frac{1,97}{18}$	$\frac{0,55}{5}$	$\frac{0,33}{3}$	$\frac{0,11}{1}$	$\frac{0,33}{3}$	$\frac{0,22}{2}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,11}{1}$	$\frac{0}{0}$
Все участки вместе	$\frac{41,8}{723}$	$\frac{21,05}{404}$	$\frac{19,8}{380}$	$\frac{5,26}{101}$	$\frac{3,44}{66}$	$\frac{1,35}{26}$	$\frac{0,36}{7}$	$\frac{0,47}{9}$	$\frac{0,1}{2}$	$\frac{0,15}{3}$	$\frac{0,21}{4}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,05}{1}$	$\frac{0,1}{2}$	$\frac{0,1}{2}$

Таким образом, возникновение в той или иной трещине среди множества трещин фильтрующего массива турбулентного режима фильтрации возможно при одновременном выполнении двух условий: 1) ширина трещины должна быть аномально большой по сравнению со средней для массива, 2) гидравлический уклон потока в этой трещине также должен быть аномально велик. Ввиду обратной связи между гидравлическим уклоном и шириной трещины, вероятность возникновения турбулентного движения воды весьма мала.

Можно ли опасаться отклонений от линейного закона фильтрации в связи с наличием в массиве трещин сверхмалой ширины? Видимо, нет. По последним исследованиям Е. С. Ромма (1966), толщина пленки связанной воды, обладающей аномальными свойствами, не превышает $0,015 \cdot 10^{-4}$ см. Получаемые при изысканиях значения коэффициентов фильтрации и непосредственные измерения Δa свидетельствуют, что в области воздействия инженерных сооружений горные породы имеют в большом количестве значительно более широкие трещины. Эти макротрещины и являются основными каналами фильтрации, сводящими на нет роль тех микротрещин, в которых имеет место отклонение от закона Дарси.

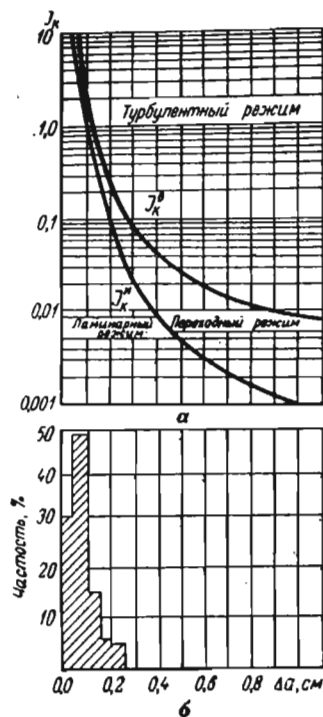


Рис. 28. Сопоставление распределения ширины трещин с графиком критических градиентов напора

а — графики изменения критических градиентов напора, соответствующих началу возникновения I_k^a и полному развитию I_k^b , турбулизация потока воды в трещинах с различными раскрытиями (по В. Н. Жиленькову); б — распределение ширины видимых трещин в песчаниках и алевролитах нижнего мела на участке строительства Нурекской ГЭС (штольня № 695, интервал 0—20 м, данные САО Гидропроект)

§ 20. Связь водопроницаемости с параметрами трещиноватости

Расход воды через отдельную трещину (щель) с гладкими стенками при ламинарном режиме согласно Г. М. Ломизе (1951)

$$q = \frac{\gamma}{12\mu} (\Delta a)^3 I, \quad (29)$$

при турбулентном режиме

$$q = 4,7 (\Delta a) \left(\frac{g^4}{v} (\Delta a)^3 I^4 \right)^{1/7}. \quad (30)$$

Для щели с шероховатыми стенками при ламинарном режиме

$$q = \frac{\gamma}{12\mu} (\Delta a)^3 I \frac{1}{1 + 6 \left(\frac{l}{\Delta a} \right)^{1,5}}, \quad (31)$$

при турбулентном режиме

$$q = (\Delta a) \sqrt{gI(\Delta a)} \left(2,6 + 5,1 \lg \frac{\Delta a}{2I} \right), \quad (32)$$

где γ — объемный вес воды;

μ — коэффициент вязкости;

ν — кинематический коэффициент вязкости;

g — ускорение силы тяжести.

I — гидравлический уклон.

Остальные обозначения прежние.

В условиях режима фильтрации, описываемого двухчленной зависимостью скорости от градиента связь между расходом g и параметрами трещины, выражается значительно сложнее (В. Н. Жиленков, 1967).

Влияние параметров трещины на ее проницаемость характеризуется данными табл. 16 (по Г. М. Ломизе).

Из табл. 16 следует, что трещинная водопроницаемость в большей степени зависит от ширины и густоты трещин и меньше — от их извилистости и шероховатости.

Переход от расхода пропускаемого отдельной трещиной к расходу через массив в целом связан с суммированием расходов через отдельные трещины. Различные способы такого суммирования предложены в работах Володько (1941), Ломизе (1951), Жиленкова (1967). Наиболее совершенным представляется подход, реализованный в работе Е. С. Ромма (1966), где рассматривается однородный анизотропный массив, т. е. массив, разбитый несколькими системами бесконечных гладких трещин. «Тот факт, что трещиноватый коллектор является анизотропной средой, влечет за собой необходимость характеристики его фильтрационных свойств при помощи соответствующего тензора» (Е. С. Ромм, 1966, стр. 113). Аналогичную идею о тензорной природе трещинной проницаемости высказал С. Ирмей (S. Irmau, 1955). Однако в его работе она не получила развития. Е. С. Ромм в своих построениях устанавливает связи между компонентами тензора проницаемости и параметрами трещиноватости горных пород.

Проницаемость в любом совпадающем с градиентом напора направлении K ($см^2$) оценивается из выражения

$$K = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta a_i)^3}{a_i} \{ 1 - [\sin \beta_i (\cos \alpha_i \cdot \cos \varphi - \sin \alpha_i \cdot \cos \rho) + \cos \beta_i \cdot \cos \gamma]^2 \}, \quad (33)$$

где β_i — угол падения трещин системы;

α_i — азимут падения трещин системы;

ρ , φ , γ — углы между направлением, для которого вычисляется K , и координатными осями X_1 , X_2 , X_3 .

Пользуясь выражением (33) на основе статистически рассчитанных оценок параметров трещиноватости, можно оценить водопроницаемость в любом направлении. В результате оценки водопроницаемости

Фактор	Кратность влияния на коэффициент фильтрации		Пределы изменения фактора
	Линейный закон сопротивления	Квадратичный закон сопротивления	
1	2	3	4
1. Шероховатость . .	5,5	6,3	От трещин с гладкими стенками до трещин с относительной шероховатостью $\frac{l}{\Delta a} = 0,8$
2. Клиновидность . .	18	6	От трещин с параллельными стенками до трещин с клиновидностью $n = 0,1$ при $\frac{l}{\Delta a} = 0,1$
3. Форма	44	11	От трещин идеальной формы до трещин, имеющих значительные неправильности формы на трети пути фильтрации
4. Извилистость . .	1,5	1,5	От трещин плоских до весьма извилистых
5. Комплексное действие факторов 1, 2, 3, 4	97	21	От идеальной трещиноватости с параллельными гладкими стенками до трещиноватости с наиболее невыгодной комбинацией действующих факторов 1, 2, 3, 4, дающей наибольшие потери
6. Пустотность . . .	600	600	При изменениях пустотности от 0,3 до 0,0005
7. Среднеобъемное раскрытие трещин	40 000	14	При изменениях средней ширины трещин от 0,005 до 1 см

по нескольким направлениям можно построить эллипсоид трещинной проницаемости, который дает представление о фильтрационной анизотропии массива. Анизотропия оценивается отношением

$$\sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$$

где K_1 и K_2 — главные значения тензора проницаемости.

В некоторых частных случаях трещинная проницаемость может быть вычислена упрощенным путем (Ромм, 1966).

Вычисленные значения параметров водопроницаемости K и K_f могут быть использованы при различных приближенных гидрогеологических расчетах. Особый интерес они представляют при опре-

делении фильтрационной анизотропии и решении задачи о рациональном размещении дренажных скважин в анизотропно проницаемом в плане водоносном горизонте (Ромм, 1966). На рис. 29 приведены характеристики трещинной проницаемости массива основания Нурекской ГЭС для двух участков с несколько различной трещиноватостью. Проницаемость массива в горизонтальной плоскости по различным направлениям вычислена по Е. С. Ромму.

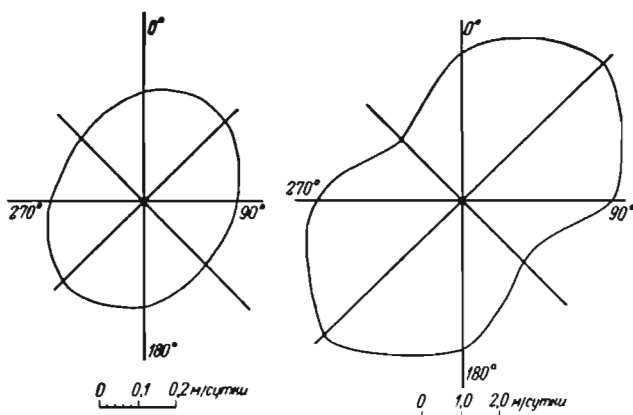


Рис. 29. Полярные диаграммы трещинной проницаемости массива основания Нурекской ГЭС для фильтрации в горизонтальной плоскости

В практике инженерных изысканий пока не накоплен опыт определения проницаемости по параметрам трещиноватости. Если по содержанию задачи важнее знать анизотропию и неоднородность водопроницаемости, чем точную оценку абсолютной величины, метод Е. С. Ромма может дать удовлетворительные результаты. Наиболее целесообразно применение этого метода для оценки проницаемости пород в сухой зоне, где документация трещин проводится в горных выработках, а фильтрационное опробование затруднительно. Водопроницаемость льдонасыщенных скальных пород, фильтрационное опробование которых вовсе исключается, может быть рассчитана только на основе модели трещиноватости. Изучение водопроницаемости льдонасыщенных горных пород в ряде случаев имеет большое практическое значение (Хантайская ГЭС, Вилюйская ГЭС). Поэтому методика Е. С. Ромма, хотя и уступает гидродинамическому опробованию в силу меньшей точности результатов, не заменима в некоторых случаях. Большим ее преимуществом является малая по сравнению с гидродинамическим опробованием стоимость полевых работ при одинаковых примерно затратах труда на камеральные работы.

§ 21. Характеристика трещиноватости по данным о водопроницаемости

Эта задача является обратной по сравнению с задачей, рассмотренной в предыдущем параграфе. Поскольку параметр водопроницаемости есть функция нескольких параметров трещиноватости, постольку рассматриваемая здесь задача не может быть решена однозначно. В решении ее возможны два пути: 1) отыскивать цифровую характеристику какого-либо одного параметра трещиноватости, пользуясь известными значениями K_{ϕ} и других параметров трещиноватости; 2) ограничиться обобщенной характеристикой трещиноватости массива с помощью удельного водопоглощения или коэффициента фильтрации. Первый путь связан с использованием формул Е. С. Ромма при заданной проницаемости. Если кроме проницаемости известны ориентировки систем трещин и средние значения густоты трещин по системам, то можно вычислить среднюю ширину трещин и среднюю пустотность массива. Такие вычисления были выполнены нами при исследовании водопроницаемости и трещиноватости траппов, залегающих в основании Усть-Илимской ГЭС. Результаты приведены в табл. 17.

Т а б л и ц а 17

Участок интрузии	Водопроницаемость в пределах участка K_{ϕ} , м/сутки	Вычисленные	
		Средняя ширина трещин Δa , мм	Пустотность массива Π , %
Внутренняя часть пластовой интрузии	0,001	0,1	0,1
Приконтактная часть интрузии . . .	0,01	0,2	0,6
	0,1	0,4	1,2
	1,0	0,9	2,7
Зона глубокой экзогенной деформации	100	3,5	5,0

В целом вычисленные значения Δa и Π совпадают с общепринятыми представлениями о ширине трещин в траппах и пустотности траппового массива. Для внутренней части интрузии, для которой нами вычислена $\Pi = 0,1\%$, путем ультразвукового каротажа В. И. Коптевым получено значение $\Pi = 0,2\%$.

Таким образом, с помощью данных по водопроницаемости можно пополнить эмпирическую модель сети трещин.

При отсутствии других сведений о трещиноватости в качестве показателя трещиноватости можно рассматривать удельное водопоглощение горных пород. Величина q связана с шириной трещин, их густотой и с пустотностью массива. Однако, как это отмечено Н. Н. Биндеманом и Н. Я. Денисовым (1947), имея лишь удельное водопоглощение, невозможно отличить участки сгущения трещин от участков с редкими, но широкими трещинами. Два участка с одинаковым удельным водопоглощением могут различаться не только

густотой и шириной трещин, но и пустотностью. Тем не менее анализ удельных водопоглощений позволяет дать качественную оценку трещиноватости массива.

§ 22. Использование модели трещиноватости при планировании фильтрационного опробования

Модель сети трещин, если она составлена в ходе изысканий до выполнения массового фильтрационного опробования, может оказаться очень полезной при размещении опытных скважин и планировании режимной наблюдательной сети. Наиболее ценным в модели трещиноватости в этой связи является выделение элементов неоднородности низшего порядка и приближенная оценка фильтрационной анизотропии. Каждый элемент неоднородности низшего порядка должен быть охарактеризован серией фильтрационных опытов. Например, если выявлены участки повышенной тектонической трещиноватости, то в пределах этих участков могут быть размещены специальные скважины. Выявление в ходе исследования трещиноватости глубины и характера экзогенных изменений массива позволяет объективно спланировать глубину опытных скважин, закладываемых для исследования проницаемости зоны разгрузки и выветривания. Может быть рационально задана и максимальная длина опытных интервалов, которые будут находиться в пределах зоны с однородными изменениями.

При размещении в скальном массиве скважин режимной сети необходимо знать зоны массива (участки повышенной трещиноватости), по которым передвигаются подземные воды. Именно на этих участках должны быть размещены скважины режимной сети. Поскольку в модели трещиноватости дано плановое и высотное положение таких участков, эта модель может явиться основой для планирования режимной сети. Знание анизотропии очень важно при размещении наблюдательных скважин опытного куста. Исходя из модели сети трещин при планировании фильтрационных испытаний, можно сделать некоторые предположения о точности результатов фильтрационного опробования. Эта точность зависит от неоднородности массива, описанной в модели трещиноватости. При фиксированном объеме опробуемой породы дисперсия результатов зависит в первую очередь от густоты трещин. Если установить объем опробования постоянным, задав в качестве метода позонное фильтрационное опробование при фиксированной длине интервала, то априори можно утверждать, что для участков с большим расстоянием a между водопрводящими трещинами разброс результатов будет больше, чем для участков с малыми значениями a . Соответственно на первом участке для выявления средней проницаемости с заданной точностью потребуется выполнить больше откачек, чем на втором участке при той же заданной точности результата. Например, при изысканиях под Усть-Илимскую ГЭС были проведены фильтрационные исследования в трапзах и во вмещающей их песчаниково-алевролитовой

толще. В трапах на исследованном участке расстояние между трещинами в среднем значительно больше, чем в осадочных породах. Соответственно больше для трапов и разброс результатов фильтрационного опробования. Поэтому при равном количестве фильтрационных испытаний трапов и осадочных пород характеристика проницаемости трапов оказывается менее определенной.

Глава 6

ТРЕЩИНОВАТОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

§ 23. О влиянии трещиноватости на механические свойства массива горных пород

При нагружении массива горных пород, разбитого трещинами, деформация, а затем и разрушение протекают при активном участии трещин. Порода в монолите блока и в зоне трещин в процессе деформации и разрушения ведет себя совершенно по-разному. Специфично характерное лишь для трещиноватых массивов поведение их под нагрузкой. Монолитная порода деформируется за счет изменения межзельных расстояний в решетке слагающих ее кристаллов. Понятно, что при тех давлениях на породу, которые интересуют инженера геолога, эта деформация не может быть значительна. В зоне трещин деформация происходит за счет сближения или отдаления стенок трещин. Стенки всегда шероховаты, соприкасаются между собой лишь по незначительной части поверхности. При сжатии породы в точках контакта стенок развиваются напряжения, на несколько порядков превышающие напряжения внутри монолитных блоков. В отдельных точках контакта порода разрушается, в других происходит значительное сжатие. Поэтому относительная деформация породы в точках соприкосновения стенок и в зоне трещины в целом на несколько порядков превышает относительную деформацию породы внутри блоков.

Из опытов Б. Д. Зеленского (1961) следует, что при напряжении $\sigma = 10 \text{ кг/см}^2$ относительное сокращение породы в образце песчаника было в 100—200 раз меньше, чем относительное сокращение зоны трещины и непосредственно прилегающей к ней части образца.

С ростом нагрузки увеличивается площадь поверхности контакта стенок трещин. В пределе стенки стремятся к полному смыканию. Соответственно снижаются напряжения на контакте стенок и уменьшается приращение относительной деформации породы в зоне трещины. Оно стремится к приращению относительной деформации во внутренней части блока. Иными словами, с ростом нагрузки модуль деформации горной породы, разбитой трещинами, возрастает, приближаясь к модулю упругости минерального вещества породы. Непостоянство модуля деформации создает, естественно, большие

трудности на пути оценки деформируемости массива в целом. Модуль деформации может быть принят постоянным лишь в определенном интервале давлений на породе. Например, для сланцев, на которых строится Кампыр-Раватская плотина, модуль деформации можно считать постоянным в интервале давлений от некоторого порога P_s до 40 кг/см^2 (Ukhov, Tsytovich, 1966). При давлениях, меньших P_s , по С. Б. Ухову и Н. А. Цитовичу, массив под штампом практически не деформируется.

После преодоления порога P_s деформация массива идет главным образом за счет смыкания стенок трещин. Благодаря этому между модулем деформации массива и количеством трещин под штампом наблюдается тесная зависимость. С ростом количества трещин под штампом модуль деформации массива уменьшается. Для кварцевых порфиров района Капчагайской ГЭС эта связь установлена Э. И. Ткачуком (1966) в виде

$$\lg E = 2,36 - 0,002T, \quad (34)$$

где T — объемная плотность трещин ($\text{м}^2/\text{м}^3$) — сумма площадей поверхностей трещин, заключенных в 1 м^3 породы (по Смехову и др. 1961);

E — модуль деформации, тысячи кг/см^2 .

Ту же мысль о решающей роли макротрещиноватости можно иллюстрировать рис. 30. Видно, что при неизменной пористости образцов и почти неизменном объемном их весе средний модуль деформации E , так же как и удельное водопоглощение, меняются в 4—5 раз с изменением среднего расстояния между трещинами ($\lg a$).

Итак, при сжатии массив вначале сокращается преимущественно за счет закрытия трещин. Аналогично при растяжении массива деформация увеличивается главным образом за счет раскрытия трещин. В естественных условиях в зоне разгрузки и бортового отпора, где массивы расширяются в результате снятия нагрузки от вышележащих пород в первую очередь происходит расширение существующих трещин (см. главу 3). Лишь если существующая в массиве сеть трещин очень редка, у поверхности земли закладываются новые трещины. При нагружении массива тяжелым сооружением типа бетонной плотины трещины в нем вновь закрываются. По данным изысканий (Прочухан, 1964), под бетонной плотинной Братской ГЭС в массиве трапшов имелись раскрытые в результате эрозивной разгрузки горизонтальные трещины, суммарная ширина которых в вертикальном разрезе мощностью около 40 м по разным скважинам колебалась от 26 до 139 мм при среднем значении 80 мм . Осадка плотины к концу строительства достигла 40 мм (Тиздель, 1963). Сжатие трапшового основания на такую значительную величину не может быть объяснено деформацией блоков породы, так как она в образце имеет модуль деформации порядка $E = 1 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$. Осадка несомненно произошла за счет закрытия трещин и сжатия пристеночного материала, как это имело место в лабораторных опытах Б. Д. Зеленского. Расчет модуля деформации основания

Братской ГЭС по наблюдениям за осадкой сооружения дает величину порядка $E = 1 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$.

Рассмотрим теперь механизм разрушения массива, разбитого трещинами. Разнообразие форм разрушения массива очень велико. Принято различать два крайних случая: сдвиг по отдельной трещине и сдвиг по зоне, не совпадающей с какой-либо трещиной. В первом случае сдвиг обычно не сопровождается разрушением сдвигающейся

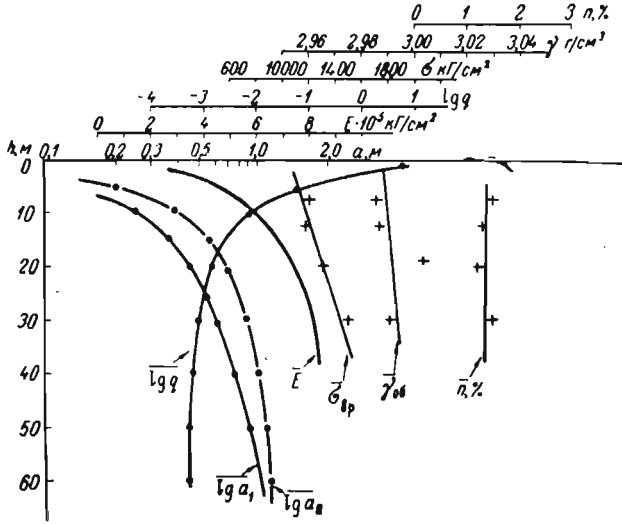


Рис. 30. Графики изменения с глубиной средних значений пористости (P%), объемного веса (γ), временного сопротивления сжатию (σ) образцов трапфов из основания Братской ГЭС и графики изменения с глубиной средних значений модуля деформации (E) (по испытаниям в массиве) и логарифма удельного водопоглощения (q) (построены по материалам изысканий под Братскую ГЭС, опубликованным в работах Владимирова, 1962; Прочухана, 1964; Евдокимова и Санигина 1964; Коняровой и Нейштадт, 1963)

части массива, которая смещается как целое ненарушенное тело. Такого рода сдвиг скального массива нам приходилось наблюдать, в частности, на р. Ангаре в Бадарминском сужении, где борта долины сложены пластовыми интрузиями трапфов, залегающими среди алевролитов и песчаников. При незначительном наклоне контакта интрузии в сторону реки здесь образуются скальные оползни. Отрыв сползающего массива объемом порядка $1 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ осуществляется по вертикальным трещинам первичной отдельности, характерным для трапфов, а сдвиг по поверхности контакта, на котором обычно скапливаются подземные воды.

Сползающая часть массива настолько хорошо сохраняет свою монолитность, что гряды оползней на рассматриваемом участке были приняты за дайки, и только геофизические и буровые работы, подсекшие подошвы трапфовых глыб, позволили установить истину.

Внешне похожий механизм разрушения реализуется при образовании айсбергов, которые по ложу ледника спускаются в море и откладываются по вертикальным трещинам. Разумеется, такое разрушение массива может осуществиться лишь при совпадении направления достаточно высоких тангенциальных напряжений с какой-либо поверхностью ослабления большой протяженности. В массивах, разбитых трещинами, такие поверхности обычно находятся и сдвиг массива горных пород наиболее часто происходит по заранее подготовленной естественной поверхности ослабления наклоненной в сторону свободной поверхности. Это обстоятельство легло в основу графического метода оценки устойчивости откосов, разработанного В. Н. Славяновым в 1959 г. Метод позволяет на основе данных об ориентировке трещин в массиве горных пород делать заключение об устойчивости откосов сложной формы и делить откосы на участки по степени опасности сдвига.

Если же в массиве нет подготовленной поверхности достаточной протяженности, по которой мог бы произойти сдвиг, то разрушение захватывает широкую зону. Место возникновения разрыва определяется тогда неоднородностью массива. Равновесие между силами удерживающими и сдвигающими в первую очередь нарушается на участках повышенной трещиноватости и пониженной прочности массива. В ходе развития процесса некоторые из этих участков объединяются. Разрыв таким образом локализуется. Весьма существенно, что в ходе развития процесса прочность массива быстро снижается, благодаря чему скорость разрушения нарастает (Müller, 1966). В силу большой прочности горной породы и наличия трещин разной ориентировки блоки в зоне предельных напряжений обычно не разрушаются, а начинают поворачиваться, отделяясь друг от друга с использованием существующих трещин. Далее под воздействием касательных напряжений блоки приходят во вращательное движение. В зоне вновь возникшего разрыва происходит заметное разрыхление массива за счет образования пустот между блоками. Деформация распространяется в стороны от разрыва и приводит к нарушению структуры значительной части массива. При таком механизме разрушения массива его прочность зависит от соотношения размера элементарных блоков с характерным размером части массива, вовлеченной в активную зону процесса.

Наиболее интересный в этом смысле фактический материал приводит Г. Л. Фисенко (1959). Фисенко исследовал сцепление в естественных массивах горных пород путем сдвига крупных призм трещиноватой породы. В первом приближении данные Фисенко могут быть аппроксимированы согласно статистической теории прочности выражением (Рац, 1968)

$$\frac{C_m}{C_k} = 0,08 + 0,92 \left(\frac{H}{a} \right)^{-1,2}, \quad (35)$$

где C_m и C_k — сцепление породы в массиве и в образце соответственно;

H — высота призмы обрушения;

a — расстояние между трещинами.

Приведенное выражение отличается от формулы, предложенной Фисенко, тем, что при неограниченном росте числа элементов неоднородности (отношения $\frac{H}{a}$) сцепление падает не до нуля, а до минимума, составляющего 0,08 от величины сцепления породы в куске (по другим данным до 0,01). Это выгодно, так как в реальных массивах, сколь ни густа была бы сеть трещин, породы все же сохраняют некоторое сцепление.

Из сказанного ясно, что в природе наблюдается два крайних случая разрушения массивов горных пород, связанных переходом. В одном случае массив при разрушении ведет себя как анизотропная среда с предопределенными поверхностями ослабления. В другом случае скальный массив не проявляет своей анизотропии, а разрушается как однородное изотропное тело или как зернистая среда. В механике горных пород разрабатываются методы расчета прочности для того и другого случая разрушения.

От чего зависит выбор изотропной или анизотропной модели массива? Различные авторы сходятся на том, что решающим критерием является соотношение расстояния между трещинами с характерным размером деформируемого массива $\frac{H}{a}$. Г. Л. Фисенко (1965) и Н. Н. Куваев (1964) на основе своих экспериментальных данных считают граничным значение $\frac{H}{a} = 120$.

§ 24. Полевые экспериментальные определения свойств массива и модель трещиноватости

Если соотношение области воздействия сооружения и параметров трещиноватости таково, что возможен расчет механического взаимодействия массива и сооружения на основе однородной и изотропной модели массива (а это возможно при относительно густой сети трещин), то возникает задача выбора параметров однородной и изотропной среды, которая по своим свойствам не отличалась бы (в интересующем нас отношении) от неоднородного и анизотропного расчлененного на блоки массива горных пород. Отыскание способа перехода идет по пути поисков решения на основе теории масштабных эффектов, по пути выявления эмпирической зависимости между свойствами малых и больших объемов массива, по пути осреднения свойств неоднородного массива непосредственно в ходе испытания статическими и динамическими методами.

Модель решетки трещин необходима при переходе от свойств неоднородной среды к однородной модели любым способом. Так, если выполняется экстраполяция прочностных или деформационных свойств с малого объема массива на большой, например, по формуле (35) или иным образом, то необходимо учитывать порядок трещиноватости, который находился в области воздействия эксперимента.

Экстраполяция может быть обоснованной только до объема структурного блока массива, ограниченного трещинами более низкого порядка, чем входящие в область воздействия эксперимента. Дальнейшая экстраполяция, в силу ступенчатости кривой масштабного эффекта первого рода может привести к превышению вычисленной прочности над реальной (Рац, 1968).

Это обстоятельство, затрудняющее экстраполяцию, естественно, ведет к стремлению при испытаниях увеличивать область воздействия эксперимента *. В настоящее время отдельные уникальные статические испытания уже производятся на целиках массива объемом в несколько сотен кубических метров. С увеличением объема опробования растет и стоимость эксперимента. Поэтому увеличение области воздействия эксперимента влечет за собой сокращение количества опытов и выдвигает в качестве основной задачи планирования полевых экспериментов — задачу выбора места опробования и оптимального размера области воздействия опыта. Место проведения опыта должно быть типично для участка в геологическом отношении и прежде всего обладать характерной трещиноватостью.

Решетка трещин в области воздействия опыта должна быть как можно более однородной и включать не менее 10—15 трещин наиболее низкого порядка. Только при таком количестве трещин они не будут выступать как феномены, и массив условно при интерпретации опыта можно считать внутренне однородным (Руппенейт, Долгих, Матвиенко, 1964). Решить задачу выбора места опыта наилучшим образом можно на основе статистической модели решетки трещин. Несомненно, что количество полевых испытаний, зависящее от класса проектируемого сооружения и стадии изысканий, в значительной степени зависит также и от сложности геологической структуры массива. Модель сети трещин в связи с этим в принципе может быть полезна для назначения количества полевых испытаний. Однако методы использования модели трещиноватости для этих целей пока не разработаны.

Модель сети трещин полезна не только при планировании полевых механических испытаний, но и при их обработке. Исследование корреляционной связи между параметрами трещиноватости и показателями механических свойств (Ткачук, 1966) позволяет распространить результаты экспериментов на участки массива, где испытания не проводились, а имеются лишь исследования трещиноватости. Это имеет смысл, поскольку исследования трещиноватости несравнимо дешевле полевых механических испытаний.

В особенности эффективной может оказаться интерполяция и экстраполяция результатов полевых испытаний деформационных и прочностных свойств массива при условии применения многомер-

* Увеличение области воздействия эксперимента можно признать целесообразным лишь, если достигается увеличение области воздействия на несколько порядков. Последнее возможно при геофизических исследованиях. Это обстоятельство является важнейшим преимуществом геофизических методов исследования механических свойств массивов горных пород.

ного регрессионного анализа (Ткачук, 1966). Это позволяет учесть влияние всех существенных факторов на механические свойства массива и тем самым значительно снизить неопределенность оценки механических свойств массива между точками испытаний.

§ 25. Расчет деформируемости и прочности массива горных пород с введением в расчет параметров трещиноватости

Далеко не все случаи взаимодействия массива и сооружения позволяют абстрагироваться от неоднородности и анизотропии массива. Даже если массив по соотношению $\frac{H}{a}$ можно было бы рассмат-

ривать как однородный и изотропный, практически переход от неоднородной среды к однородной модели часто требует дорогостоящих испытаний, а получаемая модель из-за несовершенства методов ее построения оказывается недостаточно достоверной. Поэтому имеется тенденция оценивать взаимодействие сооружения и массива не только на однородной изотропной модели, но и на более сложных моделях.

Методы расчета прочности массива горных пород с введением в расчет отдельных параметров трещиноватости предложены Г. Л. Фисенко (1956), Н. Н. Куваевым (1958), Г. Н. Кузнецовым (1961), К. Терцаги (Terzagi, 1962), Л. Мюллером (Müller, 1963), В. Витке (Wittke, 1965, 1966). Во всех этих работах, за исключением последней, рассматривается плоская задача. В. Витке дает решения для трехмерного случая, существенно приближая свою модель к реальному массиву.

В работах В. Витке рассматривается массив, сложенный из жесткого недеформируемого и неразрушаемого материала, рассеченного двумя системами бесконечных трещин (под системой трещин, как это принято и у нас, Витке понимает множество параллельных трещин). Каждая система характеризуется средней ориентировкой в пространстве, углом внутреннего трения и сцеплением по поверхности трещин. Расстояние между трещинами не фиксируется. Таким образом, массив представляется в виде однородной анизотропной среды. В массиве закладывается откос с углом к горизонту α ($\frac{\pi}{2} > \alpha >$

> 0). Плоскость откоса снизу и сверху ограничена полуплоскостями уступов. Нижний уступ проведен горизонтально, верхний — под углом к горизонту. Плоскости трещин и плоскости откосов и уступов вычлняют из массива блоки породы, устойчивость которых и рассматривается. Расчет устойчивости ведется следующим образом. Составляются гипотезы о возможных движениях блока (соскальзывание по одной из двух систем трещин в каком-либо направлении, вращение блока вокруг какой-либо из его граней или вокруг какой-либо точки, соскальзывание с вращением). Гипотезы проверяются. Для проверки гипотезы о соскальзывании действующие на блок силы (собственный вес породы и внешние нагрузки) разлагаются на нормальные и касательные по отношению к поверхности ослабления. Исходя из значений сцепления и угла внутреннего трения по трещинам вычисляется сопротивление сдвигу по каждой системе трещин.

Сумма этих величин составляет общее сопротивление сдвигу блока в избранном направлении. Отношение общего сопротивления сдвигу к сдвигающему усилию, действующему в избранном направлении, является безразмерным показателем устойчивости блока с критическим значением, равным 1. Аналогично проверяется гипотеза о возможности вращения. В этом случае сравниваются удерживающие и крутящие моменты.

Скажем о главных недостатках модели. 1. В природных условиях не наблюдаются массивы менее чем с тремя системами трещин. Случай, когда можно пренебречь одной из систем, являются частными. 2. Неучет статистических флуктуаций ориентировки трещин, которая всегда имеет место и существенно влияет на устойчивость блоков породы. 3. В модели не учтена прерывистость трещин — их неотъемлемое свойство.

Разумеется, учет этих особенностей природной трещиноватости в модели привел бы к дополнительным трудностям и существенному усложнению решения. Несвершенство модели необходимо иметь в виду во всех случаях ее практического применения. В частности, весьма осторожно следует применять ее при равноправном развитии трех и более систем трещин, при наличии больших флуктуаций в ориентировке трещин и в случае пунктирной сети. Метод Витке хорош для расчета устойчивости массива, разбитого двумя системами длинных плоских трещин, при условии, что расстояние между трещинами значительно меньше характерного размера массива. Это могут быть, например, тектонические трещины, для которых типична устойчивость ориентировки и большая густота в одной-двух системах при крайне низкой густоте в других системах.

Расчет деформации трещиноватого массива с введением в него параметров трещиноватости осуществляется в два этапа. На первом этапе определяется обобщенный модуль деформации массива разбитого трещинами, как функция от геометрических параметров решетки трещин и модулей деформации E_1 породы между трещинами и E_2 породы в зоне трещин. На втором этапе деформация массива рассчитывается на основе модели сплошной линейно деформируемой среды с модулем деформации E_0 или на основе модели безраспорной среды (Кандауров, 1966). И. И. Кандауров предложил теорию расчета деформаций и напряжений в среде с ортогональной сетью из трех систем трещин при условии, что нагрузка нормальна к одной из систем трещин и среда далека от разрушения. При этом коэффициент Пуассона $\nu = 0$. Тогда обобщенный модуль упругости массива

$$E_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{E_1 E_2 \frac{a}{\Delta a}}{E_1 + \frac{a}{\Delta a} E_2}, \quad (36)$$

где N — число блоков в деформирующейся части массива.

* Б. Д. Зеленский (1967) для вычисления модуля деформации массива в направлении, перпендикулярном системе трещин, рекомендует выражение, тождественное (36), если учесть, что $\Delta a \ll a$.

Более общий подход к вычислению обобщенного модуля деформации массива с учетом ориентировки, густоты и ширины трещин предложен И. В. Тарасовой (1968). Этот подход дает возможность оценить модуль деформации массива по модулю деформации породы и деформационную анизотропию массива, связанную с макротрещинами. Рассматривается массив, разбитый системами взаимно параллельных трещин. Именно к такой модели сводятся многие реально существующие решетки трещин в горных породах (§ 15).

Массив с одной системой трещин рассматривается как среда, состоящая из изотропных слоев двух типов. Первый тип слоев моделирует блоки породы и характеризуется параметрами: a — мощность слоя, соответствующая расстоянию между трещинами, E_1 — модуль деформации породы в блоке, ν — коэффициент Пуассона породы. Второй тип слоев моделирует трещины и характеризуется параметрами: Δa — мощность слоя, соответствующая ширине трещин, E_2 — модуль деформации породы в зоне трещины, $\nu = 0$. Для открытых трещин, в которых соприкасаются стенки, сложенные той же породой, что и блоки, можно принять $E_2 = E_1$. Важной характеристикой слоя второго типа является отношение ξ длины (в плоской задаче) скальных контактов в пределах слоя к длине области воздействия сооружения. Для элементарного блока, состоящего из двух слоев, по закону Гука при нагружении перпендикулярно трещинам

$$\frac{\sigma(a + \Delta a)}{E_{\perp}} = \frac{\sigma \cdot (\Delta a)}{\xi \cdot E_2} + \frac{\sigma \cdot a}{E_1}, \quad (37)$$

где E_{\perp} — модуль деформации двухслойной среды в направлении, перпендикулярном слоистости.

Отсюда

$$E_{\perp} = \frac{\xi(a + \Delta a)}{\xi \cdot a + \Delta a} E_1, \quad (38)$$

или, учитывая, что обычно $a \gg \Delta a$, и вводя обозначение $\eta = \frac{\Delta a}{\xi a}$, можно получить удобное для практического использования в расчетах выражение

$$E_{\perp} = \frac{1}{1 + \eta} E_1. \quad (39)$$

Аналогично можно получить выражение для модуля деформации массива вдоль трещин

$$E_{\parallel} = \frac{a + \xi \Delta a}{a + \Delta a} E_1, \quad (40)$$

или в упрощенном виде

$$E_{\parallel} = E_1. \quad (41)$$

Для направления, образующего с системой трещин угол θ ,

$$E_{\theta} = \frac{1}{1 + \eta(1 - \cos^4 \theta)} E_1. \quad (42)$$

При наличии двух взаимно перпендикулярных систем трещиц, параллельных осям X и Y

$$E_x = \frac{1}{1 + \eta_y} E_1, \quad E_y = \frac{1}{1 + \eta_x} E_1. \quad (43)$$

По формулам (39) и (43) можно рассчитать модуль деформации массива*, полагая $\xi = 3 \cdot 10^{-4}$.

Для массива основания Нурекской ГЭС вычисления дают модуль деформации от $0,5E_1$ до $0,15E_1$. Для массива основания Токтогульской ГЭС снижение модуля деформации массива за счет трещиноватости

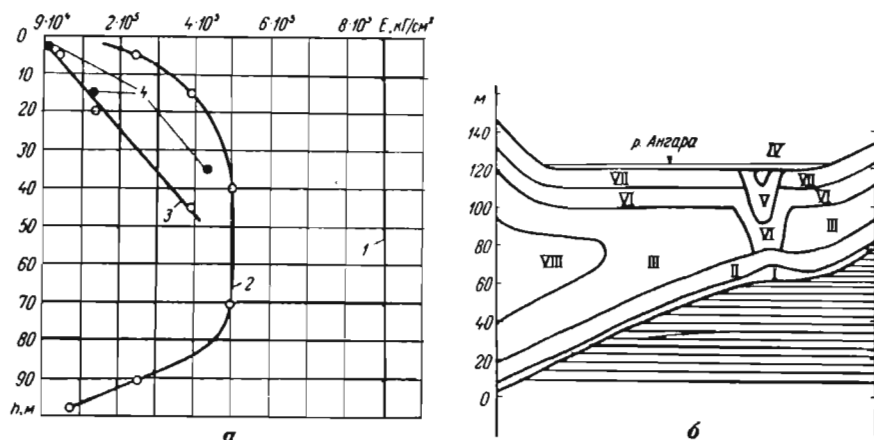


Рис. 31. Изменение модуля деформации массива трапфов в разрезе Усть-Илимской интрузии

a — графики изменения E_1 от кровли ($h = 0$) до подошвы ($h = 100$ м) интрузии: 1 — для горной породы в образце; 2 — для массива в зоне неглубокой экзогенной деформации; 3 — для массива в зоне глубокой экзогенной деформации; 4 — экспериментальные данные для массива трапфов (Тиздель, 1962), полученные путем нагружения штампов в основании Братской ГЭС, в условиях аналогичных Усть-Илимским. b — разрез по створу Усть-Илимской ГЭС. Римскими цифрами указаны зоны. Заштрихованы вмещающие интрузию осадочные породы.

более значительно. Модуль деформации здесь снижается в 3—10 раз по сравнению с модулем деформации породы. Материалы по трещиноватости трапфов в основании Усть-Илимской ГЭС, приведенные в § 18 (ориентировка и густота трещин) и в табл. 18 (ширина трещин), позволяют вычислить модуль деформации массива в вертикальном направлении.

Исходные данные и результаты расчета сведены в табл. 18 и на рис. 31.

Вычисленные значения E_1 для Усть-Илимского массива близки к значениям модуля деформации массива в вертикальном направле-

* В нижеследующих расчетах предполагается, что эффективная густота трещин совпадает с фактической (см. § 15). Как видно по результатам, это предположение правомерно.

№ зоны	Положение зоны в разрезе интрузии	Исходные данные			Вычисленные оценки	
		Коэффициент фильтрации K_f , м/сутки	Ширина горизонтальных трещин, см	Расстояние между горизонтальными трещинами, см	Модуль деформации массива в вертикальном направлении E_{\perp} , кг/см ²	Отношение модуля деформации породы к модулю деформации массива $\frac{E_p}{E_{\perp}}$
1	2	3	4	5	6	7
I	В 0—5 м от нижнего контакта	1,0	0,09	25	$0,7 \cdot 10^5$	13,0
II	В 5—15 м от того же контакта	0,05	0,03	40	$2,5 \cdot 10^5$	3,5
III	В 30 м от того же контакта	0,005	0,015	60	$5,0 \cdot 10^5$	1,8
IV	В зоне глубокой деформации в 0—10 м от дневной поверхности	10,0	0,20	35	$0,4 \cdot 10^5$	20,0
V	В той же зоне в 10—30 м от поверхности	1,0	0,09	50	$1,3 \cdot 10^5$	7,0
VI	В той же зоне в 30—50 м от поверхности	0,01	0,02	50	$3,9 \cdot 10^5$	2,2
VII	Вне зоны глубинной деформации в 0—10 м от дневной поверхности	0,05	0,03	35	$2,4 \cdot 10^5$	2,8
VI	Там же, в 10—20 м от поверхности	0,01	0,02	50	$3,9 \cdot 10^5$	2,2
VIII	Там же, в 20—60 м от поверхности	0,001	0,01	60	$6,0 \cdot 10^5$	1,5

нии, полученным в результате опытов со штампами, в аналогичных геологических условиях на Братской ГЭС. В наиболее измененной выветриванием и разгрузкой части траппового массива в Братске получен модуль деформации $E_{\perp} = 0,11 \cdot 10^5$ кг/см², в массиве, слабо измененном выветриванием и разгрузкой (аналог зон V и VII табл. 18), получен модуль деформации $E_{\perp} = 1,3 \cdot 10^5$ кг/см². Для наиболее сохранных траппов (аналог зон III, VI, VIII табл. 18) получен модуль деформации $E_{\perp} = 4,4 \cdot 10^5$ кг/см².

§ 26. Учет трещиноватости массива горных пород при физическом моделировании

Трудности аналитического расчета деформируемости и прочности массива горных пород на структурных моделях во многих случаях пока непреодолимы. Предложенные расчетные модули не учитывают весьма общих свойств массивов горных пород и притом тех, которые

существенны для рассматриваемых процессов. Это прежде всего конечность длины трещин и, как следствие, существование жестких мостов между блоками. Несовершенство расчетных методов, которые не могут отразить в расчетной схеме сложных геометрических условий протекания процесса, как это обычно бывает в технике, ведет к развитию физического моделирования массива. Моделирование позволяет учесть гораздо более сложные особенности геометрии массива, чем расчетные методы.

В этом отношении особенно большими преимуществами обладает метод эквивалентных материалов (Кузнецов и др., 1959). Для построения модели в соответствии с критериями подобия выбирается материал, эквивалентный по механическим свойствам горной породе, слагающей массив. Поскольку свойства породы определяются на образцах, в модели должны быть воспроизведены все элементы структуры массива, не входящие в образцы. Это блоки породы, ограниченные макротрещинами, макротрещины с их заполнителем, слои чередующихся в массиве пород и другие более крупные элементы неоднородности. Необходимо, чтобы геометрия каждого элемента неоднородности низшего порядка была воспроизведена в модели с точностью до мельчайших подробностей. Это требование, очевидно, практически невыполнимо уже только потому, что нельзя изучить массив во всех деталях, не разобрав его. Разобранный же массив не может быть основанием. Геологические исследования, проводимые всегда выборочным методом, принципиально таковы, что могут дать лишь статистическую характеристику массива. Но даже если бы массив удалось исследовать во всех деталях, то воспроизвести эти детали в строго заданной последовательности было бы практически чрезвычайно трудно. Поэтому при моделировании из эквивалентных материалов лишь приближенно воспроизводят структуру массива, не соблюдая строгих условий геометрического подобия. Определенная последовательность неравных расстояний между трещинами заменяется последовательностью равных расстояний, отвечающих среднему расстоянию между трещинами. Точно так же поступают с другими параметрами трещиноватости. Выбор средних значений параметров трещиноватости массива для моделирования может быть осуществлен на основе материалов геологической съемки так, как это рекомендуется в § 15 и 33.

Сооружение модели на основе выбранных параметров ведется следующим образом (Кузнецов и др., 1959). Слои модели, пропорциональные по мощности слоям массива, укладываются последовательно один на другой. Эквивалентный материал слоев разделяется сухим песком для сохранения в модели поверхности ослабления, моделирующей поверхность напластования. Чтобы воспроизвести сеть трещин, слой модели в заданных направлениях через заданные расстояния рассекают ножом.

Другой способ построения модели описывает Панчини (Pancini, 1962). Модель складывается из блоков (рис. 32), подобных блокам, из которых сложен массив. Блоки скрепляются различными

цементирующими материалами, соответствующими различным заполнителям трещин. Наиболее крупные трещины и разрывы в модели создаются уже после того, как сложен весь «массив». Для этого модель распиливается по заранее намеченным направлениям, соответствующим направлениям природных разрывов. На рис. 32 показана разметка, по которой спланировано произвести распиливание.



Рис. 32. Деталь модели из эквивалентных материалов (по М. Панчви)

Применяются и другие способы воспроизведения структуры массива в модели (Роза и Зеленский, 1967).

Как уже отмечалось, показатели механических свойств массива горных пород нелинейно зависят от параметров трещиноватости. Поэтому замена реальной неоднородной сети трещин однородной сетью трещин со средними параметрами может привести к ошибкам в оценке свойств массива на основе моделирования. Однако воспроизведение всех деталей массива в модели невозможно и схематизация геометрии массива необходима. Один из возможных путей схематизации структуры массива при моделировании следует видеть в методе поэлементного моделирования сложных конструкций, предложенном А. Г. Назаровым (1965).

Идея метода заключается в последовательном раздельном моделировании элементов конструкции и самой конструкции. В приложении к случаю моделирования массива горных пород это означает следующее. До моделирования в массиве должно быть выделено несколько порядков трещин или несколько порядков структурных блоков. Будем считать массив блоком первого порядка. Он сложен из блоков второго порядка, каждый из которых построен из блоков третьего порядка. Пусть блоки третьего порядка испытываются в натуре, тогда моделирование начинается с того, что из их уменьшенных моделей с соблюдением геометрического подобия и статистических особенностей решетки трещин строится модель блока более низкого второго порядка.

Испытание нескольких статистически подобных моделей блока второго порядка должно дать статистическую характеристику свойств блока этого порядка, на основе чего строятся однородные

уменьшенные модели блока второго порядка. Из них с соблюдением геометрического подобия в расположении трещин, разделяющих блоки этого порядка, строится модель массива. Испытание ее — последний этап поэтапного моделирования. Современные методы исследования структуры скальных массивов и свойств горных пород в массиве позволяют получить необходимые для поэтапного моделирования исходные данные. Однако объем лабораторных работ при осуществлении такого моделирования очень велик, что ограничивает развитие метода.

Глава 7

УЧЕТ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

§ 27. Трещиноватость и поперечное сечение выработки

Наиболее трудным для расчета устойчивости массива на контуре выработки является случай, когда характерный размер подземного сооружения лишь в 5—10 раз больше расстояния между трещинами. В этом случае замена в расчете неоднородного трещиноватого массива однородной изотропной средой не является удовлетворительной (Руппенейт и др., 1964) и учет параметров трещиноватости при расчете горных выработок необходим. Характерные поперечные размеры горных выработок, как известно, колеблются от нескольких метров до 20—30 м. Обычные расстояния между трещинами равны нескольким десяткам сантиметров или одному-двум метрам. Таким образом, случай соотношения трещиноватости и размера горной выработки, отнесенный К. В. Руппенейтом к труднейшим, практически встречается наиболее часто. Лишь при очень густой трещиноватости во всех системах для предельно больших подземных сооружений трещиноватость может быть отнесена к неоднородности высшего порядка, а массив представлен как однородный.

Обычный в этом смысле случай соотношения трещиноватости с размером горных выработок имеет место на строительстве Нурекской ГЭС. Трещиноватость (см. § 16) сравнительно постоянна на всем участке строительства. Средняя густота трещин (a) по системам меняется от 0,3 до 0,9 м. Радиус туннелей достигает 3—5 м. Влияние трещиноватости на условия проходки туннелей здесь вполне отчетливо. Проходка сопровождается вывалами горной породы. Вываливающаяся порода отделяется от массива по трещинам. Связь между параметрами трещиноватости и формой и размерами вывалов статистическим путем исследована Е. М. Пашкиным (1967). Установлено, что вывалы обычно ограничены трещинами трех развитых на участке строительства систем. Благодаря сохранению ориентировки систем по всей территории строительства при постоянном азимуте оси туннеля на всей его длине сохраняются постоянные условия вывалообразования. Следствием постоянства условий вывалообразования является устойчивость формы вывалов во всех

туннелях Нурекской ГЭС. Наличие устойчивой формы вывалов позволило рекомендовать Е. М. Пашкину для Нурека постоянную для всей трассы форму сечения туннеля. Свод выработки повторяет форму естественных вывалов. Он вписывается в угол, образованный системами трещин (рис. 33). Стрела подъема свода выработки зависит от угла пересечения вывалообразующих систем трещин. Чем

острее этот угол, тем более «подъемистый» создается свод. Проходка туннелей до исследования связи вывалообразования с трещиноватостью велась прямоугольным сечением с пологим сводом. Переход на новую

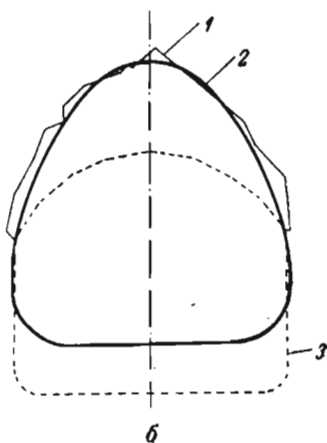


Рис. 33. Соотношение формы вывалов и формы туннеля

а — вывал по трещинам при проходке туннеля проектным сечением; *б* — огибающая кривая вывалов (1), рекомендованное на основе изучения трещиноватости сечение туннеля (2) и первоначальное проектное сечение (3) (по Е. М. Пашкину).

форму сечения позволил значительно снизить количество вывалов и тем самым удешевить проходку на несколько процентов, одновременно значительно повысив безопасность работ.

Исследование трещиноватости позволяет уточнить не только форму сечения выработки, но и ее размеры. Обычно проходка туннелей выполняется по контуру, выходящему за проектный. Осуществляется перебор породы. Величина перебора самым тесным образом связана с трещиноватостью массива. Расстояние от проектного контура выработки до реального (линейная величина перебора) находится в прямой корреляционной зависимости от расстояний между трещинами по системам. Коэффициент корреляции достигает значений 0,92 и 0,95 (Пашкин, Канаев, 1967). Такие высокие коэффициенты корреляции показывают, что найденные опытным путем

зависимости могут быть использованы в проектных расчетах для вычисления переборов по густоте трещин. Таким путем переборы, в настоящее время являющиеся сверхнормативными, могут быть нормированы, а проектный периметр выработки в свету за счет этого сокращен.

§ 28. Трещиноватость и анкерное крепление

Идея анкерного крепления горных выработок известна давно. Она возникла при проходке горных выработок в прочных слоистых породах, которые несомненно могли бы стоять без всякой крепи, если бы не отслаивание пород по трещинам. Возникло естественное стремление воспрепятствовать отслаиванию. Массив стали стягивать анкерами, забиваемыми в направлении, перпендикулярном слоистости. Первоначально анкеры изготовлялись из сухого дерева, которое разбухало после забивки и прочно соединялось с породой, скрепляя ее. Таким образом удавалось нейтрализовать действие поверхностей ослабления, имеющих в массиве. Хотя анкерное крепление возникло как метод борьбы с трещинами и по существу является способом перевязки блоков, разделенных трещинами, методы расчета анкерной крепи пока учитывают трещиноватость лишь косвенно, не вводя в расчет параметров трещиноватости, за исключением одного-двух частных случаев. Методы расчета анкерной крепи разработаны для однородной и изотропной модели массива. Основные принципы расчета анкерной крепи сводятся к следующему (Мостков и др., 1966): 1. Анкеры должны иметь достаточную длину, чтобы привязать ослабленную зону вокруг выработки к монолитной породе; для этого они должны пересечь ослабленную зону и углубиться в монолитный массив на 25% своей длины. 2. Диаметр анкеров и их количество на единицу поверхности выработки рассчитываются из условия равенства горного давления на единицу поверхности выработки и прочности на разрыв анкеров, забитых на этой поверхности. Мощность нарушенной зоны является важнейшим параметром, необходимым для расчета анкерной крепи. Она может быть измерена методом ультразвукового просвечивания (Мостков и др., 1966) или рассчитана по параметрам трещиноватости массива на основе эмпирически выведенных зависимостей (Пашкин, 1966). Расчет по параметрам трещиноватости в отличие от ультразвукового просвечивания может быть выполнен до проходки туннеля. Вычисленное по параметрам трещиноватости горное давление хорошо совпадает с результатами инструментальных измерений (Пашкин, 1966; Славин и Казаков, 1967).

Все существующие методы проектирования анкерной крепи представляют собой расчет параметров крепи на некоторые средние для выработки условия. В этом смысле они не отличаются от большинства методов расчета любых конструкций и сооружений взаимодействующих с массивом горных пород. Однако здесь такой подход не столь правомерен, сколь правомерен он при решении задач, например, об

устойчивости большого массива (основания плотины, склона) или о дрепаже большого массива.

Каждый анкер в действительности оказывается в условиях, зачастую сильно отличных от средних, принятых в проекте. Поэтому на практике нередко приходится наблюдать отклонения от паспорта анкерной крепи — некоторые изменения в ориентировке анкеров, связанные с местным поворотом пластов или трещин, некоторые изменения в расстояниях между анкерами, связанные со сгущением трещин и т. п. Исполнители должны придерживаться проекта (паспорта) анкерной крепи, а крепление выполнять в каждом сечении, исходя из местных условий.

Это может привести к экономии средств и повышению надежности крепи лишь при наличии исполнителей очень высокой квалификации. Исполнители должны на месте определять главные параметры крепи, исходя из местного значения высоты ослабленной зоны — параметра, по которому ведется расчет анкерной крепи. Как же в принципе может быть определена высота ослабленной зоны? Можно представить себе два пути. Один — развитие современного неизбежно осуществляемого на практике приема корректировки параметров анкерной крепи по наблюдениям за трещиноватостью. Может быть полезно продолжить начатое Е. М. Пашкиным исследование связи мощности зоны ослабленных пород с различными параметрами трещиноватости методами многомерного регрессионного анализа. Такая работа позволит более обоснованно по виду трещиноватости судить о мощности ослабленной зоны. Другим способом может явиться своеобразная пенетрация скального массива в ходе бурения шпуров под анкеры. Возможно, инструментальное наблюдение за проходкой шпуров позволит установить места пересечения шпурами открытых трещин и тем самым мощность ослабленной зоны.

§ 29. Оценка блочности массива горных пород

Как для оценки рыхлых пород важно знать их гранулометрический состав и пористость, так для трещиноватых массивов необходимо определять блочность b и пустотность Π . Влияние этих показателей на различные свойства массива столь велико, а сами они столь часто используются при решении самых различных технических задач, что еще недавно представлялось будто любой из них может заменить все остальные характеристики массива. Л. И. Нейштадт (1957) в своих известных работах отдала предпочтение пустотности, А. М. Гуреев — блочности. И хотя сейчас выяснилось, что эти точки зрения являются крайними, а оценки b и Π ни по отдельности, ни даже обе вместе не могут с достаточной для практики полнотой характеризовать массив, определения блочности и пустотности не потеряли значения. Они могут быть полезны при оценке кусковатости камня в отвале, расчете расхода цемента при создании завес и в других случаях. Совместное определение b и Π для одного и того же массива позволяет ориентировочно определить проницаемость

и деформируемость массива (см. § 18). Среднее значение пустотности массива может быть вычислено по формуле (26). Главная трудность здесь заключается в определении ширины трещин с достаточной точностью. Средний поперечник блока в массиве может быть вычислен по формуле (27).

Однако блочность обычно сильно меняется в пространстве массива, поэтому среднее значение характеризует ее недостаточно полно. Приближенная оценка распределения блочности может быть получена графическим путем по методу, предложенному А. В. Количко (1966). Исходные данные для определения блочности дает модель трещиноватости. Из нее используются параметры $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$ и a_{ij} . Решетка трещин представляется в виде

нескольких систем бесконечных плоскостей (трещин). В системе трещины принимаются параллельными друг другу, ориентированными в соответствии с положением центра распределения системы на круговой диаграмме. Расстояние между трещинами в каждой i -й системе характеризуется выборкой значений a_{ij} (j — порядковый номер члена ряда) объемом не менее 100. На исходный для графического построения материал накладывается еще одно условие. В одной из систем дисперсия расстояний между трещинами принимается равной нулю. Условно в дальнейшем изложении будем называть эту систему основной.

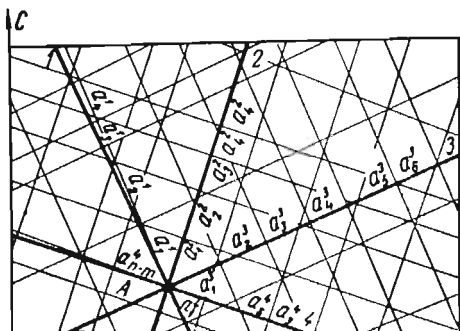


Рис. 34. Проекция блоков породы на плоскость, параллельную трещинам основной системы (по А. В. Количко).

$A-1, A-2, \dots$ — приведенные линии падения систем 1, 2, \dots ; a'_1, a'_2 — истинные расстояния между трещинами системы 1 (аналогично для систем 2, 3)

Операции по определению блочности заключаются в следующем. На сетку В. Шмидта наносятся центры распределения систем. По методу И. В. Кирилловой (см. рис. 10) основная система приводится к горизонту и соответственно на диаграмме перемещаются центры всех остальных систем с тем, чтобы углы между системами трещин не изменились. Затем (см. рис. 34) на отдельный чертеж из какой-либо точки A наносятся азимуты падения всех систем трещин, полученные после приведения основной системы к горизонту. На рис. 34 — это линии $A-1, A-2, A-3$. Следующая операция очень проста, если все системы пересекаются с основной под углом, близким к прямому (не менее 70° , по А. В. Количко)*.

Линии падения $A-1, A-2$, и $A-3$ делятся на отрезки, пропорциональные расстояниям между трещинами в соответствующих

* Такой случай довольно часто встречается в слоистых осадочных породах, когда за основную принимается система согласная напластованию.

системах. Через концы отрезков проводятся линии простираения трещин. Полученная сетка представляет собой проекцию блоков породы на плоскость трещины основной системы. Затем подсчитывают количество блоков разных размеров и строят гистограммы.

Если не все системы пересекаются с основной под углом, близким к 90° , то А. В. Количко рекомендует приводить косые системы к положению параллельному или перпендикулярному основной системе. При этом вычисляют

$$a_x = \bar{a}_0 \cdot \operatorname{ctg} \varphi, \quad (44)$$

где \bar{a}_0 — среднее расстояние между трещинами основной системы; φ — угол между основной системой и рассматриваемой косой системой.

Когда $a_x \leq \bar{a}_{\min}$, косая системы принимается за перпендикулярную к основной, и с ней поступают как со всеми остальными перпендикулярными системами. Когда же $a_x > \bar{a}_{\min}$, косая система принимается параллельной к основной. Здесь \bar{a}_{\min} — наименьшее из средних расстояний между трещинами в системе, выбранное из систем перпендикулярных основной. Если косая система принимается за параллельную основной, то за счет этого вносится поправка. Исправленное значение \bar{a}'_0 при одной косой системе

$$\bar{a}'_0 = \frac{\bar{a}_0}{1 + \frac{a_0}{a_i}}, \quad (45)$$

при наличии n косых систем

$$\bar{a}'_0 = \frac{\bar{a}_0}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_0}{a_i}}. \quad (46)$$

После построения плана систем (рис. 35) в массиве подсчитываются число блоков того или иного размера. На плане систем выделяется цепочка многоугольников, построенная таким образом, чтобы каждое индивидуальное измерение расстояний между трещинами входило в нее только один раз*. В каждом многоугольнике цепочки записывается размер блока

$$b = \sqrt[n+1]{a_0^1 a_1 a_2 \dots a_n}, \quad (47)$$

где n — число сторон многоугольника;

a_1, a_2, \dots, a_n — стороны многоугольника.

Совокупность b представляет собой искомую выборку размеров блоков. Она, как это принято в статистике, может быть представлена

* А. В. Количко рекомендует выделять на плане квадрат и в его пределах проводить подсчет размеров всех блоков. Построенная таким образом выборка b может оказаться неrepresentative из-за неоднократного учета одних и тех же измерений a_{ij} .

в виде таблицы, гистограммы или охарактеризована моментами распределения. Согласно А. В. Количко, можно принять логнормальную модель для распределения b . От выборки b в случае необходимости нетрудно перейти к распределению блоков породы по фракциям в весовых или объемных процентах.

Наиболее просто проверить изложенный метод сравнением результатов графического определения блочности с результатами измерения размера блоков в отвале взрыва. Сопоставление выполнено А. В. Количко на одном из месторождений строительного камня (известняка) в районе Токтогульской ГЭС (табл. 19), С. Н. Черны-

Т а б л и ц а 19

Способ определения	Процент блоков в массиве по фракциям (мм)				
	> 1000	1000—500	500—300	300—100	< 100
На основе модели трещиноватости	—	—	7,4	54,7	37,9
По измерениям в отвале взрыва	17,2	7,8	8,5	32,3	34,2

шевым совместно с М. И. Погребиским на месторождении строительного камня в районе Нурекской ГЭС (табл. 20)

Т а б л и ц а 20

Способ определения	Процент блоков в массиве по фракциям (м ³)				
	0,00029— 0,0233	0,0233— 0,04640	0,04640— 0,06905	0,06905— 0,0925	0,0925— 0,11556
На основе модели трещиноватости	66,4	16,5	11,8	3,9	1,6
По измерениям в отвале взрыва (данные САО Гидропроекта)	62,0	14,0	16,0	4,0	4,0

С помощью критерия Пирсона (по табл. 20) была проверена гипотеза о принадлежности обеих сравниваемых выборок к одной генеральной совокупности. Получено $\chi^2 = 1,659$ при числе степеней свободы $\nu = 4$. Соответственно вероятность того, что различия между выборками больше тех, которые мы видим в табл. 20, могут быть чисто случайными, равна $P = 0,798$. Следовательно, блочность, определенная на основе модели трещиноватости по методу Количко, и блочность, измеренная в отвале, в данном случае статистически неразличимы.

§ 30. Дробление трещиноватой породы взрывом

Этой теме посвящена вышедшая недавно монография Л. И. Барона и Г. П. Личели (1966), всесторонне освещающая современное состояние вопроса. Мы здесь ограничимся лишь краткими замеча-

ниями, касающимися, главным образом, роли трещиноватости в процессе взрывной отбойки.

В результате взрыва горной породы на выброс от массива отделяется некоторый объем породы, который разваливается преимущественно по существовавшим в массиве трещинам. Только часть породы, прилежащая к заряду, подвергается дроблению на куски меньше естественной отдельности. Объем зоны развала, объем зоны дробления и их соотношение зависят от удельного расхода взрывчатого вещества, от степени рассредоточения заряда, от дробящей способности взрывчатого вещества, от прочности породы как материала, но наиболее сильно они зависят от трещиноватости горных пород, которая влияет на результат взрыва. Во-первых, трещиноватость определяет прочность массива горных пород и потому определяет сопротивление взрыву. Во-вторых, от трещиноватости зависит распространение по массиву ударной волны, разрушающей породу. Как известно, ударная волна в сильно расчлененной трещинами среде затухает гораздо быстрее, чем в среде, слабо расчлененной или сплошной. В-третьих, проницаемость массива по трещинам определяет условия распространения расширяющихся газов взрыва, также разрушающих массив. С какими же параметрами трещиноватости наиболее тесно связаны результаты взрыва? На этот вопрос пока нельзя дать вполне обоснованного ответа. Теоретические методы расчета взрыва в трещиноватых средах пока отсутствуют. Экспериментальные исследования немногочисленны, однако они позволяют заключить (Барон, Личели, 1966), что главную роль среди параметров трещиноватости при взрыве играют расстояния между трещинами и ширина трещин. Ориентировка трещин, видимо, имеет существенное, но все же подчиненное значение.

С наличием широких трещин, как известно, тесно связана проницаемость массива для газов. С ростом ширины трещин проницаемость нарастает пропорционально кубу ширины, поэтому при наличии широких трещин велики утечки газов взрыва в атмосферу. Наличие широких полых трещин неблагоприятно и для распространения ударной волны, которая не может преодолеть трещины между блоками, заполненные воздухом. Если трещины заполнены глиной или водой, то ударная волна преодолевает их с меньшей потерей энергии. Еще менее влияющие трещины на распространение ударной волны, если она заполнена каким-либо прочным минералом, по свойствам близким к свойствам породы (Kusao Hino, 1957). Поэтому массив с широкими трещинами гораздо сильнее сопротивляется взрыву, чем массив с тонкими или залеченными трещинами. Экранирующая роль трещин при взрыве хорошо известна и используется при проходке горных выработок. При проходке туннелей большого сечения, например в Нуреке, перед осуществлением отвала породы от забоя производится комфлетный взрыв малых зарядов по периметру забоя. Создается зона открытых трещин по контуру выработки, которая предохраняет массив, окружающий выработку, от воздействия ударной волны основного взрыва.

Расстояние между трещинами не менее существенно влияет на результаты взрыва. Л. И. Барон и Г. П. Личели исследовали влияние густоты трещин на кусковатость массы в отвале на моделях. В лабораторных условиях были взорваны модели пяти типов размером $300 \times 300 \times 300$ мм³ каждая. Модели первого типа представляли собой сплошной бетонный куб, модели второго типа были сложены из кубиков с ребром 100 мм, модели третьего типа — из кубиков с ребром 60 мм, четвертого типа — из кубиков с ребром 43 мм, пятого типа — из кубиков с ребром 33 мм. При густой решетке трещин (33 и 43 мм) взрыв не меняет кусковатости материала. Модель разваливается только по трещинам. При менее густой трещиноватости (60 и 100 мм) наблюдается некоторое дробление кубиков. Практически значительное дробление материал претерпевает только при взрыве модели без трещин (длина ребра куба 300 мм). Интересно, что изменение веса заряда весьма мало сказывается на степени дробления блоков модели. Это позволило Л. И. Барону и Г. П. Личели сделать вывод — для большей раздробленности породы в отвале, чем в массиве, мало эффективно повышать удельный расход взрывчатого вещества, как это обычно делается в практике. Более эффективным средством для достижения этой цели является рассредоточение заряда. Последний вывод также подтверждается экспериментами.

Ориентировка трещин относительно горизонта, по данным Л. И. Барона и Г. П. Личели, вряд ли может существенно влиять на результаты взрыва. Судя по наблюдениям В. А. Невского (см. главу 3), более существенное влияние на результат взрыва оказывает ориентировка трещин относительно дневной поверхности. Итак, из параметров трещиноватости массива для оценки условий взрыва прежде всего важно знать густоту трещин, их ширину, а также ориентировку относительно свободной поверхности.

Глава 8

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

§ 31. Принципы метода

Инженерно-геологические исследования трещиноватости проводятся циклами, как и все остальные виды изысканий (Коломенский, 1968). На каждом цикле работа завершается построением количественной модели решетки трещин; от цикла к циклу она уточняется и дополняется. Хорошо построенная модель всегда увязана с геометрией более крупных геологических структур, с которыми макротрещины связаны генетически. Такая увязка не только делает модель решетки трещин более понятной, логически стройной, но и расширяет представление о крупных структурах: позволяет судить о положении

смещителя тектонических разрывов, различать нормальное и опрокинутое залегание слоев в крыльях складок, выяснять положение контакта интрузии и решать другие подобные геологические задачи. Будем, по предложению Г. А. Каледы, называть прямой задачей исследования трещиноватости построение количественной модели решетки трещин на основе полевых измерений и уточнение на основе модели плана тектонических структур, на несколько порядков превышающих размеры макротрещин. Задачу построения гипотетической решетки трещин массива на основе модели структур более низкого порядка назовем соответственно обратной задачей изучения трещиноватости. Для решения прямой и в особенности обратной задач в полном объеме необходим материал, изложенный в I части.

Если решение прямой задачи есть цель инженерно-геологического исследования трещиноватости на каждом цикле, то решение обратной задачи обычно носит вспомогательный характер. Обратная задача решается до начала специальных полевых исследований трещиноватости на основе существующих геологических и тектонических карт для планирования полевых работ. В дальнейшем она решается для экстраполяции результатов полевых измерений на структуры, не покрытые съемочными точками.

Для практических целей решение проблемы количественного изучения трещиноватости будет удовлетворительным, если геологу удастся построить математическую модель решетки трещин, пронизывающих массив горных пород. Эта задача требует в каждом конкретном случае трудоемкой и целеустремленной работы по специальной методике. Авторы придерживаются намеченных ранее (Рац, 1963а) принципов исследования трещиноватости. В частности, представляется очевидной необходимость выполнения ряда условий, которые вытекают из всего изложенного ранее материала и приняты многими специалистами.

1. Сеть трещин в каждой точке массива горных пород сформирована рядом систем трещин различной ориентировки, зачастую разного генезиса и различных механических типов (отрыва, скола). Поэтому каждая из систем трещин должна изучаться в отдельности.

2. Математическая модель трещиноватости строится на основе ряда показателей — параметров трещиноватости. Каждый из параметров учитывает лишь какую-то одну сторону явления, но зато позволяет получить вполне определенную, однозначную характеристику его.

3. Параметры трещиноватости меняются в пространстве нерегулярно. Поэтому удобным для количественного изучения трещиноватости являются математическая статистика и теория вероятности.

4. Результаты количественного изучения трещин могут и должны быть интерпретированы генетически, что в ряде случаев позволяет получить ценную информацию о происхождении трещин.

Принятие этих положений автоматически приводит к постановке в качестве первоочередной задачи полевых исследований — задачи сбора разнообразных цифровых характеристик трещиноватости.

Полевые работы должны дать цифровые характеристики отдельно для каждой геологической позиции, т. е.: 1) для каждого элемента тектонической структуры, 2) для каждого типа пород, 3) для каждой зоны экзогенных изменений массива.

Разные виды полевых работ: съемка трещиноватости, описание горных выработок, геофизические исследования, фотогеодезические исследования — освещают различные черты сети трещин. В настоящее время основным источником сведений о сети трещин следует считать геологическую съемку трещиноватости на обнажениях и в горных выработках. Остальные виды работ лишь дополняют ее, освещая недоступные для наблюдения части массива и указывая степень экзогенного изменения сети трещин, фиксируемой на обнажении. Полевые исследования сопровождаются текущей обработкой материала. В ходе ее весь полевой материал систематизируется. Это помогает выявить пробелы в полевом материале и своевременно добрать недостающие данные.

§ 32. Изучение трещиноватости на обнажениях

Детальная съемка трещиноватости начинается с планирования работ на основе решения обратной задачи изучения трещиноватости. В ходе планирования оценивается необходимое количество съемочных точек и предполагаемое количество индивидуальных измерений по каждому параметру трещиноватости; намечаются обнажения, подлежащие документации. Тщательно изучаются материалы по району исследования. Основное внимание уделяется литологическому составу пород, тектонической структуре и геологической истории изучаемого участка. Точки массовых измерений трещиноватости следует наметить в рекогносцировочном маршруте до начала измерений.

Точки на участке должны быть размещены так, чтобы были охарактеризованы все геолого-структурные участки, все породы в пределах этих участков и зоны с различной степенью экзогенных изменений, т. е. размещение точек на площади не должно быть равномерным. На участках, сложных по геологическому строению, съемочные точки концентрируются, на простых участках плотность точек снижается. При неудовлетворительной обнаженности территории необходимо выполнять расчистки, проходить шурфы, штольни. Горные выработки совершенно необходимы для изучения экзогенных изменений трещиноватости. Отдельные элементы структуры и горные породы, плохо обнаженные на площади съемки, рекомендуется изучать за ее пределами. Выходить за пределы участка съемки, особенно при крупномасштабных исследованиях, рекомендуется так же для увеличения интервалов изменения взаимно коррелируемых параметров. Например, в случае недостаточной изменчивости мощностей слоев в пределах участка исследований желательно «добрать» обнажения за пределами участка съемки для изучения зависимости густоты и ширины трещин от мощности слоя. В случае наличия на участке одного-двух тектонических разрывов можно

добрать точки за пределами контуров съемки, чтобы получить более обоснованную характеристику зон разрывных нарушений.

Необходимо подчеркнуть, что на первом этапе наиболее ответственно выделение основных морфологических типов трещин. Ошибки, сделанные в начале работы (особенно ошибки в расчленении массы трещин на морфологические типы), являются наиболее трудноисправимыми. Поэтому подготовка к выполнению массовых замеров трещиноватости должна вестись систематически, планомерно и тщательно. Не следует стремиться к полному и строгому расчленению трещин на генетические типы. Такое расчленение в ряде случаев может быть сделано (да и то не всегда) лишь на завершающем этапе исследований. Вначале же главную роль играет детальность морфологического и геометрического расчленения, которая должна быть максимальной. Неприятной ошибкой на подготовительном этапе является пропуск какого-либо морфологического типа трещин. Например, невыделение в качестве особого морфологического типа расширенных и удлиненных экзогенными процессами трещин, по направлению совпадающих с трещинами других морфологических типов. Такого рода ошибки всегда возможны до выполнения количественного анализа, поэтому первые результаты массовых замеров должны сразу подвергаться первичной обработке по рекомендуемой ниже системе, чтобы сразу внести коррективы в план работ.

Главное в полевой работе по съемке трещиноватости — массовые измерения параметров трещиноватости в съемочных точках и горных выработках. Массовые измерения удобно производить двум исполнителям — геологу (или технику-геологу) и коллектору или трем исполнителям — геологу, технику-геологу и коллектору. Последний, как обычно, записывает. Разделение обязанностей заметно повышает производительность труда. При работе на труднодоступных обнажениях такое разделение совершенно необходимо. Число бригад зависит от сроков и объемов работ. При работе двух или более бригад необходимо провести совместную документацию двух-трех характерных обнажений для выработки общего языка и получения в дальнейшем сопоставимых результатов.

Работа на обнажении складывается из описания обнажения и массовых измерений параметров трещиноватости. Описание обнажений обычное, как при геологической съемке. Большое внимание уделяется описанию трещиноватости и особенно описанию формы и размера естественных блоков отдельности. Последнее важно для дальнейшей интерпретации и корректирования расчетов густоты трещин. Обязательно измеряются элементы ориентировки обнажения или отдельных его частей, если оно не плоское. Элементы залегания слоев, полосчатости изверженных пород и других деталей структуры массива измеряются несколько раз с тем, чтобы получить достаточное представление об изменчивости этих величин. Изменчивость ориентировки слоев в пределах одного обнажения должна быть не более $10-15^\circ$. При большей изменчивости необходимо уменьшить размер обнажения. Подробно описываются те элементы морфо-

логии трещин, которые в дальнейшем не характеризуются массовыми замерами (извилистость трещин, шероховатость их поверхности, зеркала скольжения, заполнитель трещин, вариации ширины трещин). После этого выполняются массовые измерения параметров трещиноватости. Работа на обнажении завершается фотографированием его, а для особо характерных обнажений также и их зарисовкой.

Пока нет точных количественных рекомендаций, можно принять необходимое число измерений каждого из параметров по одной системе трещин на одном обнажении порядка 30—40.

Предлагаемое количество измерений не является строго обязательным и может несколько варьировать в зависимости от изменчивости показателя (чем больше разброс значений, тем больше нужно измерений) и точности индивидуального измерения (чем выше точность, тем измерений может быть меньше). Однако не рекомендуется снижать число измерений ориентировки ниже 20 на систему. Максимальное число измерений не должно превосходить 80—100 на систему.

Измерение трещин каждой системы производится в следующем порядке. Сначала горным компасом измеряется ориентировка трещин. Когда число измерений достаточно, переходят к измерениям остальных параметров с помощью складного метра или стальной линейки. Расстояние между соседними трещинами в системе и их ширина измеряются подряд для всех трещин данной системы, выходящих на поверхность обнажений, начиная от некой произвольной точки: ширина первой трещины, расстояние между первой и второй; ширины второй трещины, расстояние между второй и третьей и т. д. Протяженность трещин измеряется либо одновременно с измерением ширины и густоты, либо (если она велика) отдельно, по окончании измерений ширины и густоты. 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 трудностей.

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

Несколько своеобразного подхода требует изучение густоты трещин, не группирующихся в системы (например, трещин выветривания). Для таких трещин может быть введено представление об «условной густоте», легко выводимое из следующих соображений. Трещинная пустотность породы P может быть определена: 1) как сумма трещинной пустотности каждой из систем трещин по формуле

(26); 2) как частное от деления суммы площадей трещин $S_{тр}$ в данном сечении (в плоскости обнажения) на общую площадь измеряемого участка $S_{пл}$ с поправкой за угол пересечения трещин с плоскостью обнажения. В случае хаотической трещиноватости, как следует из простых вероятностных соображений, эта поправка равна $\frac{\pi}{2}$, а пустотность

$$P = \frac{S_{тр} \cdot 2}{S_{пл} \cdot \pi}. \quad (48)$$

Отсюда имеем

$$\frac{2S_{тр}}{\pi S_{пл}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \bar{a}_i}{\bar{a}_i}, \quad (49)$$

где i — номер системы трещин;

n — общее число систем.

Условно заменяем хаотическую трещиноватость тремя взаимно перпендикулярными системами трещин с равными \bar{a}_y и $\Delta \bar{a}_y$. Тогда вместо равенства (49) имеем

$$\frac{S_{тр} \cdot 2}{S_{пл} \cdot \pi} = \frac{3\Delta \bar{a}_y}{\bar{a}_y}.$$

Окончательно, заменяя $S_{тр} = (\Delta \bar{a}_y) \sum l$, получим

$$\bar{a}_y = 4,71 \frac{S_{пл}}{\sum l}, \quad (50)$$

где \bar{a}_y — условное среднее расстояние между трещинами, см;

$S_{пл}$ — площадь обнажения, см²;

$\sum l$ — суммарная длина трещин на площади обнажения, см.

Пусть имеется одна система трещин с определенным углом и азимутом падения, а остальные трещины отличаются от трещин системы углом падения, но по азимуту падения в систему не группируются. Такой случай имеет место в базальтовых покровах со столбчатой отдельностью, в осадочных породах при наличии трещин напластования и трещин усыхания. В базальтах бывает одна четко выраженная система пологих трещин с определенным азимутом падения. Для этой системы непосредственным измерением могут быть установлены все параметры α , β , a , l и Δa . Остальные трещины круто наклонены к горизонту и не образуют параллельных между собой поверхностей. «Условная густота» крутых трещин в этом случае вычисляется следующим образом. Определяется измерениями суммарная пустотность за счет крутых трещин

$$P = \frac{S_{тр}}{S_{пл}}. \quad (51)$$

Измерения $S_{тр}$ и $S_{пл}$ производятся на плоскости, перпендикулярной столбам. Считая, что столбы имеют шестигранную форму в плане, условно принимается, что они ограничены тремя системами трещин.

Тогда для этих систем

$$\Pi = \frac{3\Delta \bar{a}_y}{\bar{a}_y}. \quad (52)$$

Отсюда

$$\bar{a}_y = \frac{3S_{\text{пл}}}{\sum l}, \quad (53)$$

где $S_{\text{пл}}$ — площадь обнажения, см^2 ;

$\sum l$ — суммарная длина вертикальных трещин в пределах этой площади, см ;

\bar{a}_y — условное расстояние между трещинами, см .

§ 33. Камеральная обработка

В результате обработки должны быть получены средние значения параметров трещиноватости и характеристики их изменчивости (дисперсия, коэффициенты вариации) по типам и системам трещин отдельно по каждому обнажению и для каждой породы.

Обработка результатов измерения ориентировки преследует цель определения средних значений угла и азимута падения трещин и оценки степени колеблемости данных единичных замеров около этих средних значений. В поле в ходе первичной камеральной обработки задача решается в самом грубом приближении — графически, путем обработки данных массовых замеров на сетках стереографических проекций (Михайлов, 1956) с построением диаграмм трещиноватости. В камеральных условиях для более строгого решения задачи следует воспользоваться аналитическими методами, разработанными А. Б. Вистелиусом (1958) и Л. Д. Кнорингом (1963).

При интерпретации диаграмм трещиноватости необходимо иметь в виду, что центр максимума системы фиксирует (приблизительно) среднее значение угла и азимута падения трещин данной системы, а размер площадки, занимаемой на диаграмме в изолиниях данной системой трещин, характеризует степень колеблемости ориентировки единичных трещин: чем больше площадка, тем больше разброс ориентировки трещин*.

Построение диаграмм в изолиниях не обязательно производить в процессе первичной обработки. Эти диаграммы могут составляться и при написании отчета. При этом число диаграмм может быть сокращено путем объединения точечных диаграмм ряда соседних обнажений, характеризующихся одинаковыми геологическими условиями и одинаковой ориентировкой трещин. При камеральной обработке массовых замеров ориентировки трещин обязательно определяются углы пересечения систем трещин со слоистостью, осями складок

* Плотность точек в той или иной системе на диаграмме при рекомендуемом способе измерений не является оценкой частоты встречаемости трещин на обнажении. Эта характеристика трещиноватости дается параметром a_i .

и друг с другом. Эти определения необходимы для геометрической классификации трещин и для правильного сопоставления систем друг с другом. Угол пересечения двух произвольно ориентированных плоскостей легко определяется на сетке Шмидта путем приведения их полюсов на один меридиан сетки. Эта операция осуществляется поворотом кальки с нанесенными на нее полюсами. Угол измеряется по меридиану.

Обработка массовых замеров густоты, ширины и длины трещин в полевых условиях производится для оценки точности определения параметров. Наиболее просто и быстро это можно сделать, пользуясь логнормальной моделью рассматриваемых параметров, которая для a и l , как известно, не противоречит фактам. Можно принять грубо

$$\overline{\lg a} = \frac{\lg a_{\max} + \lg a_{\min}}{2}, \quad (54)$$

$$S_{\lg a} = \frac{\lg a_{\max} - \lg a_{\min}}{C}, \quad (55)$$

где $\lg a_{\max}$ и $\lg a_{\min}$ — соответственно максимальное и минимальное значение $\lg a$ в рассматриваемом ряду;

C — коэффициент, зависящий от числа измерений n , находимый из табл. 21 (Худсон, 1967).

Таблица 21

n	5	10	20	30	100
C	2,3	3,1	3,7	4,1	5,0

Зная оценки $\overline{\lg a}$ и $S_{\lg a}$, нетрудно найти оценку среднеквадратичного отклонения среднего $S_{\overline{\lg a}} = \frac{S_{\lg a}}{\sqrt{n}}$ * и добиться, регулируя n , одинаковой точности в определении расстояния между трещинами во всех съемочных точках, а также достичь требуемого практической задачей уровня точности.

Вычисление выполняется по той же схеме для длины и ширины трещин. Таким образом, первичная обработка в поле позволяет сразу выявить системы трещин и разобраться в том, с какой точностью они могут быть охарактеризованы. При этом выявляются системы, характеристика которых требует дополнительных измерений параметров трещиноватости. Первичный количественный анализ позво-

* Существенно, что последовательности $\{a_i\}$ $i = 1, 2, \dots, n$ являются последовательностями без автокорреляции (см. главу 3).

ляет уточнить разделение трещин на морфологические типы и выявить различие в трещиноватости пород.

На последующих этапах работы расстояние между трещинами a , длину трещин l , ширину трещин удобно характеризовать для отдельных систем трещин, съемочных точек, геологических позиций средними значениями и стандартными отклонениями. Они вычисляются например, для a следующим образом:

среднее значение

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i, \quad (56)$$

среднее квадратическое отклонение

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}, \quad (57)$$

где a_i — результат индивидуального измерения;
 n — количество измерений.

При условии хорошего совпадения эмпирического распределения с логарифмически нормальным, при достаточно больших n и не слишком больших стандартных отклонениях наиболее правдоподобные оценки математического ожидания и дисперсии рассматриваемых параметров трещиноватости можно найти так, как это рекомендовано в работе Д. А. Родионова (1964).

§ 34. Изучение трещиноватости в горных выработках

Документация горных выработок мало чем отличается от документации обнажений. Здесь по возможности выполняются те же операции, что и на обнажении. Однако работы в горных выработках имеют некоторые особенности. В выработках обычно не удается фиксировать длину трещин, но зато удается наблюдать минимально искаженные разгрузкой и выветриванием ширину и густоту трещин. Эти параметры трещиноватости, как показывают исследования (см. главу 2), наиболее подвержены изменениям в зоне выветривания и разгрузки. Поэтому тщательное изучение их в глубоких горных выработках является необходимым дополнением к материалу, собранному на обнажениях. Отметим, что густоту трещин (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 $3\bar{l}$, где \bar{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 шагом определенной длины для размещения точек наблюдения либо вести измерения вдоль ломаной линии*. 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 микро-трещиноватости 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 («Методическое пособие», 1962).

При колонковом бурении трещиноватость описывается либо по стенкам скважины (путем обзора или фотографирования), либо по керну. В керне наблюдаются как естественные, так и искусственные трещины. По трещинам керн разваливается, вследствие чего ширину трещин по керну определить совершенно невозможно. При вращении снаряда керн по трещинам истирается и искажаются углы пересечения трещин с горизонтом. В неориентированном керне невозможно определить азимут падения трещин. В стенке скважины трещины сохраняют все параметры неискаженными или малоискаженными. Но они труднодоступны. Обзор стенок скважины может быть выполнен лишь с применением сложных оптических приборов, опыт применения которых для массового измерения трещиноватости нам неизвестен. Устройство некоторых приборов и правила работы с ними приведены в работах Ребрика (1968) и Мюллера (Müller, 1963).

Опыт показывает (Ткачук, Никулин, 1964; Погребиский, Чернышев, 1966), что при выходе керна 95—100% в крепких породах типа кварцевых порфиров или трапфов могут быть по керну надежно оценены положение плоскости трещин в пространстве и расстояние между трещинами в системе. Однако ввиду истирания и дробления керна параметры трещиноватости, измеренные на керне, могут быть отнесены к массиву лишь после проверки соответствия их параметрам, определенным на обнажениях или в горных выработках большего диаметра. Исследование трещиноватости по керну особенно перспективно при алмазном бурении и при использовании керноскопов и кернометров. Устройство приборов и правила работы с ними приведены в работе Казанцева и др. (1965). Подробнее методика исследования трещиноватости в горных выработках изложена в работе Букринского и Михайловой (1963).

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трещиноватость рассматривалась авторами как одно из наиболее своеобразных проявлений неоднородности горных пород. Поэтому исследование трещиноватости базировалось на общих принципах изучения неоднородности, освещенных в монографии М. В. Раца (1968). В частности, по масштабу явлений в соответствии с выделяемыми уровнями неоднородности было выделено пять уровней (порядков) трещиноватости. Считая (для удобства) эти уровни дискретными, авторы выделили: 1) дефекты кристаллической решетки, имеющие линейные размеры до 10^{-3} см; 2) микротрещины с линейными размерами 10^{-3} — 10^1 см; 3) макротрещины размером от 10^1 до 10^4 см; 4) мелкие тектонические разрывы размером 10^4 — 10^6 см; 5) крупные разрывы длиной свыше 10^6 см.

Сопоставление характерных масштабов инженерных сооружений и масштабов экспериментов, направленных на изучение свойств трещиноватых массивов горных пород, с масштабами трещиноватости показывает, что наибольший практический интерес представляет макротрещиноватость горных пород. Систематическое исследование с единой точки зрения макротрещиноватости и ее влияния на инженерно-геологические свойства массивов горных пород позволяет сделать следующие выводы.

1. Трещины образуют в массивах горных пород сложные пространственные сети, которые могут быть описаны лишь с помощью характеристики целого ряда свойств. Простейшие морфологические, в том числе геометрические, характеристики сети трещин оцениваются непосредственно путем наблюдений и измерений либо путем логических выводов по строго определенным правилам. Все многообразие

сетей трещин сводится, по-видимому, в основном к трем типам: а) сети, образованные n системами трещин ($n = 1, 2 \dots$); б) полигональные в плане сети, в которых вертикальные трещины обычно не группируются в четкие системы; в) хаотические сети, в которых трещины вообще не группируются в системы (либо число систем столь велико, что они не разграничиваются).

2. Системные и хаотические сети трещин характеризуются степенью прерывистости сети. По этому признаку выделяются непрерывные сети, в которых трещины могут считаться бесконечно длинными; прерывистые сети, в которых длина трещин соизмерима с размером блоков, вычленяемых трещинами в массиве, промежуточные и т. п. Предложены критерии для разделения указанных типов сетей.

3. Каждый из названных типов сетей должен быть охарактеризован определенным набором параметров. Следует использовать следующие наборы. Для «системных» сетей: угол и азимут падения трещин, их длина (в плоскости обнажения), ширина и расстояние между соседними трещинами данной системы. Для полигональных сетей: число граней призм — полигонов (число лучей — трещин в узлах сети), размер призм — полигонов в плане и в разрезе, ширина трещин. Для хаотических сетей: блочность (размер отдельностей, вычленяемых в массиве трещинами) и трещинная пустотность.

4. Помимо перечисленных чисто геометрических характеристик облик трещин и свойства трещиноватых сред зависят от большого числа особенностей, объединяемых обычно под названием морфологии трещин. К числу основных морфологических характеристик относятся: форма трещин в плане и в сечении; характер поверхностей стенок трещин, в особенности наличие на них различных текстур (седиментационных, тектонических и перистых); характер заполнителя трещин и степень заполнения; характер взаимопересечения трещин; характер окончания следов трещин; характер изменения пристеночного слоя.

5. В отличие от морфологии, генезис трещин не наблюдается непосредственно и не всегда может быть однозначно указана процедура вывода генезиса из наблюдаемых свойств трещиноватости. Вместе с тем генетические представления позволяют получить дополнительную информацию за счет метода актуализма, известных физических закономерностей процесса разрушения твердых тел и соотношения трещин с изученными независимо от них геологическими структурами. Авторы пытались по мере сил упорядочить существующие представления о генезисе трещин и главное о возможных связях наблюдаемых свойств трещиноватости с ее происхождением. Однако поставленная проблема далека от своего окончательного разрешения.

6. Обзор основных геологических закономерностей развития трещин в горных породах свидетельствует о том, что существуют закономерности различной степени общности; а) общие закономерности развития трещин в горных породах, характерные для всех или почти всех типов трещин: нерегулярная изменчивость параметров

трещиноватости, обусловленная природой процессов растрескивания; левоасимметричное распределение размеров блоков, вычлениаемых трещинами в массиве; зависимость параметров трещиноватости от литологии и, в конечном счете, от механических свойств горных пород; б) частные закономерности и особенности развития, присущие тем или иным видам и разновидностям трещин. Именно эти закономерности в основном используются для расчленения множества трещин по генезису. Однако не всегда существует однозначное соответствие между группами трещин, подчиняющимися каким-либо из этих закономерностей и теми генетическими видами трещин, которые принято выделять. В уточнении этих соответствий авторы видели одну из своих основных задач.

Наиболее важными из частных особенностей сетей трещин являются:

а) полигональная 5—6-угольная отдельность преимущественно с трехлучевыми узлами сети трещин (в плане) и постоянная в среднем трещинная пустотность первичных трещин, формирующихся вне наложенных полей напряжений (трещины усыхания, морозобойные, контракционные в эффузивах);

б) наличие отчетливых систем первичных трещин, сформировавшихся при действии наложенного поля напряжений (первичные трещины интрузий);

в) «поясная» ориентировка оперяющих трещин тектонических разрывов и затухание приразрывной трещиноватости по мере удаления от разрывов;

г) концентрация опережающих трещин в локальные зоны неслучайного сгущения трещин;

д) жесткая связь ориентировки соскладчатых трещин с ориентировкой слоистости;

е) приуроченность к естественным или искусственным поверхностям обнажения горных пород и затухание интенсивности трещиноватости по мере углубления в массив для экзогенных трещин.

«Сфера действия» некоторых закономерностей не установлена. К числу таких закономерностей относятся: зависимость густоты трещин от мощностей слоев (явно присущая «общим» и первичным трещинам в тонко- и среднеслоистых толщах, отмечавшаяся также для соскладчатых трещин); влияние литологии и мощностей слоев на ориентировку трещин (отмечалось для соскладчатых и общих трещин и трещин неизвестного происхождения).

7. Краткое рассмотрение механизма разрушения твердых тел и в особенности горных пород, формирования и роста трещин свидетельствует о разрыве, существующем в настоящее время между уровнем знаний по этому вопросу в физике и механике, с одной стороны, и в геологии — с другой. Показаны некоторые новые возможности применения известных в физике и механике закономерностей растрескивания в геологии. В частности, приведена энергетическая трактовка некоторых особенностей развития полигональных сетей

трещин, давая механическая интерпретация структуры «конского хвоста» и др.

Построена гипотетическая качественная модель механизма роста тектонических разрывов и их связи с землетрясениями на базе статистической обработки геологического материала, модель, весьма близкая к концепции «сейсмического течения горных масс», развиваемой Ю. В. Ризниченко на базе статистической обработки сейсмологических данных.

8. Построена локальная модель системы трещин, путем осреднения параметров могут быть получены модели Ромма и Тарасовой, пригодные соответственно для расчета водопроницаемости и деформируемости трещиноватого массива. Указанная модель легко обобщается на случай произвольного числа систем трещин с разными параметрами и позволяет рассчитывать также трещинную пустотность и блочность трещиноватого массива. Сформулированы необходимые условия применимости этой модели: однородность и непрерывность сети трещин.

Указаны факторы, приводящие к смещению рассчитанных оценок проницаемости и деформируемости от их истинных значений: наличие сплошных целиков между концами трещин (прерывистость сети) и введение в расчет осредненных параметров трещиноватости. Показано, что избежать смещений за счет второго фактора легко путем осреднения решений вместо осреднения исходных данных. Смещением за счет первого фактора, видимо, можно пренебречь при изучении наиболее распространенных непрерывных сетей трещин. Для прерывистых сетей эта проблема остается нерешенной.

Указаны методы оценки параметров моделей сети трещин и приведены конкретные примеры ее построения. Дана классификация массивов горных пород по интенсивности трещиноватости, учитывающая одновременно блочность и трещинную пустотность и позволяющая приближенно судить о проницаемости и деформируемости массива.

9. Изложены возможности и методы оценки водопроницаемости трещиноватых сред на моделях и оценки параметров трещиноватости по данным о проницаемости. Показано, что возникновение турбулентного течения жидкости в трещиноватых средах при обычно встречающихся параметрах сети трещин и уклонах потоков маловероятно. Приведены расчетные формулы водопроницаемости, полученные Е. С. Роммом для модели системной сети трещин.

10. Рассмотрен механизм деформирования и разрушения трещиноватых сред. Изложены возможные способы учета трещиноватости при оценке механических свойств горных пород в массиве. Выяснено, что такой учет возможен с помощью трех классов моделей трещиноватой среды:

а) модели однородной изотропной среды, механические свойства которой эквивалентны реальному трещиноватому массиву;

б) модели однородной анизотропной среды, в которых используются лишь параметры ориентировки трещин, а положение центров трещин в пространстве и их число произвольно;

в) модели неоднородной анизотропной среды, существенным образом учитывающие структуру сети трещин. Показано, как по данным изучения трещиноватости оценить анизотропию свойств трещиноватого массива.

11. Рассмотрено влияние трещиноватости на различные технические свойства массивов горных пород и способы учета трещиноватости при решении некоторых горнотехнических задач. Приведены способы оценки блочности пород в массиве.

12. Изложена методика и техника полевого геологического изучения трещиноватости и оценки параметров моделей. Методика основывается на следующих принципах, вытекающих из всего ранее изложенного материала:

а) каждая система трещин изучается в отдельности;

б) каждый из параметров трещиноватости изучается в отдельности;

в) параметры трещиноватости рассматриваются как случайные величины;

г) результаты количественного изучения трещиноватости интерпретируются генетически.

Построение модели трещиноватости массива горных пород включает два этапа:

а) оценка параметров модели трещиноватости в отдельных физических точках массива (при этом желательно, чтобы точки наблюдения располагались на каждом элементе геологических структур, на каждой из выделенных пород и в каждой зоне экзогенных изменений массива);

б) построение карт и (или) поверхностей тренда параметров модели.

ЛИТЕРАТУРА

- Айвазян С. А. Применение методов корреляционного и регрессионного анализов к обработке результатов эксперимента. «Заводская лаборатория», 1964, № 7, 8.
- Александров А. П., Журков С. Н. Явление хрупкого разрыва. Гостехтеориздат, М., 1933.
- Асатуров А. А. и др. О моментных функциях пластических микродеформаций. «Физика металлов и металловедение», т. 17, 1964, № 5.
- Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. «Прикладная математика и техническая физика», 1961, № 4, стр. 3—57.
- Баренблатт Г. И., Ентов В. И., Салганик Р. Л. О кинетике распространения трещин. Флуктуационное разрушение. «Инженерный журнал, механика твердого тела», 1967, № 1.
- Барон Л. И., Личели Г. П. Трещиноватость горных пород при взрывной отбойке. М., изд-во «Недра», 1966.
- Белевцев Я. Н., Тохтуев Г. В. Кливаж как особая форма микротектонических структур и его практическое и теоретическое значение. В сб. «Проблемы тектонофизики». М., Госгеолтехиздат, 1960.
- Беликов Б. П. О методике изучения трещинной тектоники месторождений строительного и облицовочного камня. Изд-во АН СССР, 1953.
- Белоусов В. В. Тектонические разрывы, их типы и механизм образования. Тр. Геофиз. ин-т АН СССР, № 17, 1952.
- Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. М., Госгеолтехиздат, 1962.
- Белоусов В. В., Гзовский М. В. Экспериментальная тектоника. М., изд-во «Недра», 1964.
- Бетин Б. И., Тохтуев Г. В. О количественной оценке трещиноватости для характеристики устойчивости горных пород. «Узбекский геологический журнал», 1960, № 13.
- Богданович К. И. Материалы по геологии и полезным ископаемым Иркутской губернии. Геол. исслед. и развед. работы по линии Сиб. ж. д., вып. 2, М., 1896.

Биндеман Н. Н., Денисов Н. Я. К оценке трещиноватости горных пород методом нагнетаний в одиночные скважины. «Гидротехническое строительство», 1947, № 12.

Болк Р. Структурные особенности изверженных горных пород. Госгеолиздат, 1946.

Бондарик Г. К. Трещины данного отпора и зона разгрузки в речных долинах. «Разведка и охрана недр», № 10, 1959.

Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрывов. М., изд-во иностр. лит., 1955.

Будько В. М. К методике определения направления относительного перемещения крыльев разрывов. Научные доклады высшей школы. «Горное дело», 1958, № 3.

Будько В. М. Типы разрывных нарушений красноцветной толщи полуострова Челекен. Докл. АН СССР, т. 121, № 4, 1958.

Букринский В. А., Михайлова А. В. Изучение связи трещиноватости с тектоническими структурами горных пород. Учебное пособие для студентов спец. «Физика горных пород». Московский ин-т радиоэлектр. и горн. электромех. М., 1963.

Буртман В. С., Лукьянов А. В., Пейве А. В., Руженцев С. В. Горизонтальные перемещения по разломам и некоторые методы их изучения. Тр. ГИН, вып. 80, 1963.

Виноградов С. Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. Изд-во «Наука», 1964.

Вистелиус А. В. Структурные диаграммы. Изд-во АН СССР, 1958.

Владимиров Б. М. Кора выветривания диабазов Падунского силла. Зап. Вост.-Сиб. отдел. Всесоюз. минералог. об-ва, вып. 3, Иркутск, 1962, стр. 100—112.

Вознесенский В. Д., Перекалина Т. В. Структурные особенности и механизм формирования гранитного массива Кос-Мурун. «Вестн. ЛГУ», № 18, 1965.

Вольфон Ф. И. Структуры эндогенных рудных месторождений. В сб. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». М., Изд-во АН СССР, 1953.

Гамаянов Н. И., Цепляев О. А. Временная зависимость прочности органических топлив. «Коллоидный журнал», т. 28, 1966, № 3.

Гарбер Р. И., Гиндия И. А. Физика прочности кристаллических тел. «Успехи физических наук», т. 70, № 1, 1960.

Гзовский М. В. Механизмы формирования сложных тектонических разрывов. «Разведка и охрана недр», 1956, № 7.

Гзовский М. В. Тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности (статьи 1 и 2). Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 2—3, 1957.

Гзовский М. В. Физическая теория образования тектонических разрывов. В сб. «Проблемы тектонофизики», Госгеолтехиздат, 1960.

Гзовский М. В. Использование новейших и современных тектонических движений при детальном сейсмическом районировании нового типа. В сб. «Соврем. движения земной коры», № 1, М., изд-во АН СССР, 1963.

Гзовский М. В. Перспективы тектонофизики. В кн.: «Деформация пород и тектоника». Докл. советских геологов к XXII сессии МГК. Изд-во «Наука», М., 1964.

Гончаров М. А. О связи кливажа со складкообразованием (на примере восточного крыла Зилаирского синклиория). Бюлл. МОИП, отд. геол., т. 38 (4), 1963.

Горин В. А., Везирова А. Д. О механизме образования трещин при складчатости. Докл. АН АзССР, т. 13, № 4, 1957.

Гутенберг Б. Физика земных недр. Изд-во иностр. лит., 1963.

Данилович В. Н. Трещинная тектоника и ориентировка движения покрова надвига. Тр. Иркутского ун-та, вып. 1, 1950.

Данилович В. Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями (методическое руководство). Мат-лы по геол. и пол. иск. Иркутской обл., вып. 2, Иркутск, 1961.

Достовалов Б. Н. Морозобойное и диагенетическое растрескивание грунтов. В сб. «Полевые геокриологические (мерзлотные) исследования». Изд-во АН СССР, 1961.

Дроздовский Б. А., Фридман Я. Б. Влияние трещин на механические свойства конструкционных сталей. М., Металлургиздат, 1960.

Думанский А. В., Ишлинский А. Ю. О закономерностях растрескивания коры деревьев. Докл. АН СССР, т. 84, № 1, 1952, стр. 161—164.

Думанский А. В., Крячков Н. Н., Лейсле Е. Г. Фигуры высыхания смоченных дисперсных систем. Изв. ГосНИИ коллоидной химии, № 2, 1934.

Думанский А. В., Крячков Н. Н., Лейсле Е. Г. Влияние клеящих веществ на растрескивание смоченных порошкообразных тел. «Коллоидный журнал», т. 2, 1936, вып. 5.

Дьяченко Н. Н. и др. Площадь фактического контакта сопряженных поверхностей. М., изд-во АН СССР, 1963.

Евдокимов П. Д., Сапегин Д. Д. Прочность, сопротивляемость сдвигу и деформируемость оснований сооружений на скальных породах. М.—Л., изд-во «Энергия», 1964.

Ермаков И. И. О влиянии трещиноватости горных пород на устойчивость бортов карьеров. Тр. ВНИИМ, сб. 51, Л., 1964.

Жилевков В. Н. О закономерностях фильтрации воды в трещиноватых скальных породах. Тр. ВНИИГ, т. 84, М.—Л., изд-во «Энергия», 1967.

Журков С. Н., Абасов С. А. Зависимость прочности полимеров от молекулярного веса. «Физика твердого тела», т. 4, вып. 8, 1962.

Журков С. Н., Бетехтин В. И., Слуцкер А. И. Разориентация блоков и прочность металлов. «Физика твердого тела», т. 5, вып. 5, 1963.

Журков С. Н., Нарзулаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердых тел. «Журнал технической физики», т. 23, вып. 10, 1953, стр. 1677.

Журков С. Н., Санфирова Т. П. Связь между прочностью и ползучестью металлов и сплавов. «Журнал технической физики», т. 28, вып. 8, 1958.

Журков С. Н., Слуцкер А. И., Мархин В. А. Определенные формы субмикроскопических трещин в деформированных полимерах. «Физика твердого тела», т. 1, вып. 11, 1959.

Журков С. Н., Томашевский Э. И. Микроскопическое изучение роста трещин при разрыве. «Журнал технической физики», 27, вып. 6, 1957.

Зеленский Б. Д. О методе учета влияния трещиноватости на деформационные свойства скальных массивов. Тр. Ленинград. инженерно-экономического ин-та им. П. Тольятти, вып. 68, 1967.

Ивлев Д. Д. О теории трещин квазирупного разрушения. «Прикладная математика и техническая физика», 1967, № 6.

Иденблом В. Л., Орлов А. Н. Физическая теория пластичности и прочности. «Успехи физических наук», т. LXXVI, вып. 3, 1962.

Калачева В. Н., Кворинг Л. Д. Закономерности развития трещиноватости на структурах различного типа (в складчатых и платформенных областях). В сб. «Трещиновые коллекторы нефти и газа и методы их изучения». Тр. ВНИГРИ, вып. 242, Л. изд-во «Недра», 1965.

Кандауров И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Л.—М., Стройиздат, 1966.

Кириллова И. В. Опыт анализа трещиноватости в слоистых толщах восточного погружения триалетской складчатой области. Докл. АН СССР, т. L, 1945.

Кириллова И. В. Некоторые вопросы механизма складкообразования. Тр. ГЕОФИАН, № 6 (133), Изд-во АН СССР, 1949.

Кириллова И. В. О последних работах Фурмарье по кливажу (слабцеватости). Бюлл. МОИП, отд. геол. т. XXXV (2), 1960.

Кириллова И. В. Кливаж как показатель характера движения вещества в процессе развития складчатости. В сб. «Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования». М., изд-во АН СССР, 1962.

- Кворнинг А. Д. О выделении систем трещин векторным методом. Тр. ВНИГРИ, вып. 193, Л., Гостехиздат, 1962.
- Кворнинг Л. Д. О густоте трещин как мере величины напряжений. Докл. АН СССР, т. 164, № 1, 1965.
- Количко А. В. Опыт оценки блочности трещиноватого массива скальных пород. Тр. Гидропроект, вып. 14. Изд-во «Энергия», 1966.
- Количко А. В. Примеры определения анизотропии некоторых физико-механических свойств скальных пород по данным изучения их трещиноватости. В сб. «Математические методы в инженерной геологии», М., 1968.
- Количко А. В., Рац М. В. Трещиноватость осадочных пород района Токтогульской ГЭС и ее влияние на инженерно-геологические условия строительства. Тр. Гидропроект, вып. 14, М., изд-во «Энергия», 1966.
- Коломенский Н. В. Методические указания по изучению процессов выветривания горных пород для инженерно-геологических целей. М., Гостехиздат, 1962.
- Коломенский Н. В. Общая методика инженерно-геологических исследований. М., изд-во «Недра», М., 1968.
- Константинова А. Г. Временное распределение энергии упругих импульсов при разрушении горных пород. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 11, 1960.
- Константинова А. Г. Связь энергии упругих импульсов, возбуждающихся при разрушении твердых тел с напряжением и размерами разрывов. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 2, 1962.
- Константинова А. Г. Исследование параметров упругих колебаний, возбуждающихся в образцах горных пород при одноосном нагружении. В сб. «Применение сейсмоакустических методов в горном деле». М., изд-во «Наука», 1964.
- Константинова А. Г. Изучение длительности разрушения угольных образцов при раздавливании. Изв. АН СССР, «Физика Земли», № 11, 1966.
- Коярова Л. П., Нейштадт Л. И. Инженерно-геологические условия строительства плотин на изверженных горных породах. В кн.: «Геология и плотин», т. III, М.—Л. Госэнергоиздат., 1963.
- Корик И. З. Роль трещинных структур в формировании месторождений гипергенного генезиса. В сб. «Проблемы тектонофизики», Гостехиздат, 1960.
- Королев А. В. Методы изучения мелкой трещиноватости горных пород. Тр. Ин-та геол. АН УзССР, вып. 6. 1951.
- Короновский Н. В. Столбчатая отдельность в изверженных породах. Вестн. МГУ, сер. геол., № 3, 1968.
- Костров Б. В. Упругие волны, сопровождающие распространение хрупкой трещины касательного разрыва. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 11, 1964.
- Косыгин Ю. А. Тектоника нефтеносных областей. Т. 1, Гостехиздат, 1958.
- Косыгин Ю. А. и др. Геологическая структура. Опыт формализованного определения и описания. Статья 1. Определение понятия геологической структуры. «Геология и геофизика», 1966, № 11.
- Крейтер В. М. Структуры рудных полей и месторождений. М., Гостехиздат, 1956.
- Кригер Н. И. Трещиноватость и методы ее изучения при гидрогеологической съемке. Металлургия, М., 1951.
- Кропоткин П. Н. Элементарные структуры, их классификация и терминология. В кн. «Методы изучения тектонических структур». т. 2, М., изд-во АН СССР, 1960.
- Куваев Н. Н. Расчет устойчивости бортов карьеров, сложенных твердыми трещиноватыми породами. Тр. ВНИМИ, сб. 32, 1958.
- Куваев Н. Н. О сохраняемости ориентировки трещин на различных глубинах. Тр. ВНИМИ, сб. 34, М., 1960.
- Кудряков В. М. и Погребиский М. И. Сравнение результатов изучения трещиноватости разными методами. В сб. «Математические методы в инженерной геологии». М., 1968.

Кузнецов Г. Н. Предельные состояния твердых горных пород с учетом пространственной ориентировки естественных поверхностей ослабления. Тр. ВНИМИ, сб. 43, Л., 1961.

Кузнецов Г. Н., Будько М. Н., Филиппова А. А., Шклярский М. Ф. Изучение проявлений горного давления на моделях. М., Госгортехиздат, 1959.

Кузнецова К. И. О влиянии механических свойств и скорости деформирования на характер разрушения схематической модели неоднородной среды и некоторых реальных материалов. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 12, 1962.

Кузнецова К. И. Закономерности разрушения упруго-вязких тел и некоторые возможности приложения их к сейсмологии. М., изд-во «Наука», 1967.

Куклин А. П., Печерский Д. М., Якупов В. С. О функциях распределения некоторых тектонических элементов. Тр. Сев.-вост. комплексного НИИ, вып. 11, Магадан, 1964.

Кушнарев Д. М., Пахомов Н. М. Оценка степени нарушения основания при взрывах. «Гидротехническое строительство», 1959, № 11.

Кушнарев И. П., Лукин Л. И. Об изучении трещинной тектоники. В сб. «Проблемы тектонофизики». Тр. I Всесоюзн. тектоноф. сов. 1957. Госгеолтехиздат, 1960.

Лебедев А. П. Трапповая формация центральной части Туягусского бассейна. Тр. ГИН АН СССР, серия петрограф., вып. 116, № 4, 1957.

Левинсон-Лессинг Ф. Ю. Петрография. Госгеоллиздат, 1940.

Леонов М. Я., Панасюк В. В. Развитие мельчайших трещин в твердом теле. Прикладная механика. Изд-во АН УССР, т. 5, № 4, 1959.

Леонов М. Я., Панасюк В. В. Развитие трещины, имеющей в плане форму круга. Докл. АН УССР, № 2, 1961.

Ливанов В. К. О густоте сети трещин в твердых породах в зависимости от мощности слоев. Бюлл. научно-техн. информ. Гидропроекта, № 13, 1961.

Лизс Н. К. Структурная геология. ОНТИ, М., 1935.

Лодочников В. Н. Тектоники гранитных массивов и проблемы батолитов Г. Клооса. Зап. Рос. минералог. об-ва, т. 55, вып. 2, 1926.

Ломизе Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах. Госэнергоиздат, 1951.

Лыкошин А. Г. Трещины бортового отпора. Бюлл. МОИП, т. 28, № 4, 1953.

Лыкошин А. Г. Опыт оценки водопроницаемости основания плотины по данным откачки из строительного котлована. «Гидротехническое строительство», 1957, № 7.

Магницкий Б. А. Основы физики Земли. М., Геодезиздат. 1953.

Методическое пособие по изучению трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа. Тр. ВНИГРИ, вып. 201, Л., 1962.

Механцева Д. М., Рыбалко Ф. П., Волков С. Д. О распределении упругих деформаций структуры квазизотропного поликристаллического титана. «Физика твердого тела», т. 8, 1966, № 4.

Михайлов А. Е. Полевые методы изучения трещин в горных породах. Госгеолтехиздат, 1956.

Михайлов А. Е. Кляваж в верхнедевонских и нижнекаменноугольных отложениях Атасуйского района (Западная часть Центрального Казахстана). Изв. АН СССР, сер. геол., № 2, 1957.

Молчанов И. А. Геометрический метод исследования дизъюнктивов и его применение для поисков смещенной части месторождения. Изв. Томского индустр. ин-та, 60, вып. 1, 1939.

Монич Б. К. Петрология гранитных интрузий Байнаульского района Центрального Казахстана. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1957.

Мор О. Чем обусловлены предел упругости и временное сопротивление материала? В сб. «Новые идеи в технике», № 1, СПб., 1915.

- Морозов Е. М., Партон В. З. Применение вариационного принципа в задачах теории трещин. Инженерный журнал «Механика твердого тела», 1968, № 2.
- Морозов Е. М., Фридман Я. Б. Траектории трещин хрупкого разрушения как геодезические линии на поверхности тела. Докл. АН СССР, т. 139, № 1, 1961.
- Морозов Е. М., Фридман Я. Б. Анализ трещин как метод оценки характеристик разрушения. «Заводская лаборатория», т. 32, 1966, № 8.
- Мостков В. М., Гроссман И. И., Вишнева М. И., Исаков М. Е. Указания по применению временной анкеровой крепи в подземных сооружениях гидроэлектростанций. Утверж. 1/VII 1966 г. М. 1966.,
- Мысина Л. Г. Распределение числа внезапных выбросов по интенсивности. Изв. АН СССР, «Физика Земли», 1966, № 2.
- Мякишев Ю. В., Рац М. В. Проблема математической модели трещиноватости горных пород в массиве. Мат-лы к научн.-технич. конфер. ПНИИИС'а. М., 1967.
- Мякишев Ю. В., Погребиский М. И., Рац М. В., Чернышев С. Н. Статистическое исследование трещиноватости горных пород. В сб. «Математич. методы в инж. геологии». М., 1968.
- Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел (к теории моделирования). Изд-во АН АрмССР, Ереван, 1965.
- Невский В. А. О некоторых закономерностях размещения гидротермальной минерализации в крупных разломах и более мелких разрывных нарушениях. Тр. ГИН, вып. 162, сер. рудн. месторождений, № 17, 1955.
- Невский В. А. Классификация трещин по типу разрушения горных пород. Изв. вузов, сер. геол. и разв. № 12, 1963.
- Невский В. А. Некоторые вопросы трещинной тектоники Актюзского рудного поля. Изв. АН СССР, сер. геол., № 11, 1960.
- Нейштадт Л. И. Методы геологического изучения трещиноватости горных пород при инженерно-геологических исследованиях. Госэнергоиздат, 1957.
- Новикова А. С. О трещиноватости осадочных пород восточной части Русской платформы. Изв. АН СССР, сер. геол., № 5, 1951.
- Овчинникова А. М. К методике изучения трещиноватости. «Разведка недр», 1938, № 3.
- Орлов А. Н. Длительная прочность и стационарная ползучесть поликристаллических тел. «Физика твердого тела», т. 3, вып. 2, 1961.
- Панченко Д. Ф., Ковалевский С. Е. Оценка естественной трещиноватости известняков по результатам взрыва. Изв. вузов, «Горный журнал», 1964, № 10.
- Пашкин Е. М. Влияние трещиноватости на устойчивость горных пород в тоннелях Нурекской ГЭС и способы повышения устойчивости. Тр. Гидропроекта, вып. 14, М., изд-во «Энергия», 1966.
- Пашкин Е. М. Влияние горногеологических условий на выбор формы поперечного сечения туннелей. Сб. мат-лов по обмену опытом. «Энергетическое строительство», № 1, 1967.
- Пашкин Е. М., Канаев Ф. С. О влиянии макротрещиноватости на образование переборов при проходке туннелей. Мат-лы научн.-технич. конфер. ПНИИИС'а. М., 1967.
- Партон В. З. Об одной оценке взаимного упрочнения трещин при их шахматном расположении. «Прикладная математика и техническая физика», 1965, № 5.
- Пермяков Е. Н. Тектоническая трещиноватость русской платформы. Мат-лы к позн. геол. строения СССР, нов. сер., вып. 12 (16) Изд. МОИП, 1949.
- Погребиский М. И., Чернышев С. Н. Опыт сопоставления результатов изучения макротрещиноватости траппов по керну и на обнажениях. Мат-лы к научн.-технич. конфер. ПНИИИС'а, М., 1966.
- Полканов А. А. Генетическая систематика интрузий платформы-кратогена. Изв. АН СССР, сер. геолог., № 6, 1946.

- Полянский М. Н. Математическое обоснование метода изучения макротрещиноватости осадочных пород. Изв. вузов, сер. геол. и разв., № 12, 1963.
- Прочухан Д. П. Трещины разгрузки в скальных основаниях высоких плотин. «Советская геология», № 7, 1964.
- Пэк А. В. Трещинная тектоника и структурный анализ. Изд-во АН СССР, 1939.
- Пэк А. В. Некоторые вопросы трещинной тектоники в рудничной геологии. «Советская геология», 1947, № 20.
- Пэк А. В. Некоторые элементы структурной геологии. В сб. «Основные вопросы и методы изучения структур рудных, полей и месторождений». М., Госгеолтехиздат, 1960.
- Радкевич Е. А. О соотношении крупных и мелких разрывных нарушений. В сб. «Проблемы тектонофизики», М., Госгеолтехиздат, 1960.
- Радкевич Е. А., Томсон И. Н., Горлов Н. В. О региональных поясах и зонах повышенной трещиноватости. «Советская геология», сб. 58, 1956.
- Рац М. В. Геометрическая классификация трещин дислоцированной слоистой толщи. Бюлл. научн.-технич. информ. Гидропроекта, № 13, 1961.
- Рац М. В. К вопросу о зависимости густоты трещин от мощности слоев. Докл. АН СССР, т. 144, вып. 3, 1962.
- Рац М. В. Статистико-генетический метод изучения трещиноватости. Бюлл. МОИП, отд. геол., № 6, 1963а.
- Рац М. В. Трещиноватость песчаников селетинской терригенно-флишевой формации. Тр. Гидропроекта, вып. 9, 1963б.
- Рац М. В. Статистический анализ сдвигов в склеросфере Земли. Бюлл. МОИП, отд. геол., № 3, 1965а.
- Рац М. В. К проблеме механизма роста разрывов и их связи с землетрясениями. (Автореферат доклада). Бюлл. МОИП, отд. геол. № 6, 1965б.
- Рац М. В. Диаграмма структурной неоднородности горных пород в массиве. Мат-лы к науч.-технич. конф. ПНИИИС'а. М., 1966а.
- Рац М. В. К трещинной тектонике района строительства Нуракской ГЭС. Тр. Гидропроекта, вып. 14. Изд-во «Энергия», 1966б.
- Рац М. В. Структурный подход к прикладной геологии. Тезисы доклада на конференции «Методологические вопросы системно-структурного исследования». МГУ, М., 1967.
- Рац М. В. Неоднородность горных пород и их физических свойств. М., изд-во «Наука», 1968а.
- Рац М. В. Инженерная геология массивов горных пород и ее проблемы. «Инженерные изыскания для строительства», сер. 5, № 5, М., 1968б.
- Рац М. В. Некоторые черты механизма роста тектонических разрывов. В кн.: «Применение математических методов в геологии», Изд. АН Каз. ССР, Алма-Ата, 1968в.
- Рибиндер П. А. Физико-химические исследования процессов деформации твердых тел. Юбилейный сборник, посвященный XXX-летию Октябрьской революции. Изд-во АН СССР, 1947.
- Рибрик Б. М. Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях. М., изд-во «Недра», 1968.
- Регель В. Р. К вопросу о кинетике роста трещин в процессе разрушения твердых тел. «Журнал технической физики», т. 26, вып. 2, 1956, стр. 359.
- Ржаницын А. Р. Теория ползучести. Стройиздат. М., 1968.
- Ризвиченко Ю. В. К энергетической трактовке закона повторяемости землетрясений. Изв. АН СССР, «Физика Земли», 1965, № 10.
- Ризвиченко Ю. В. О сейсмическом течении горных масс. В сб.: «Динамика земной коры». М., изд-во «Наука», 1966.
- Ризвиченко Ю. В. Проблемы физики землетрясений. Изв. АН СССР. «Физика Земли», 1966, № 2.
- Ризвиченко Ю. В. Об изучении сейсмического режима. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 9, 1958.
- Рихтер Ч. Ф. Элементарная сейсмология. М., изд-во иностр. лит. 1963.

- Родионов Д. А. Функция распределения содержания элементов и минералов в изверженных горных породах. М., изд-во «Наука», 1964.
- Родионов Д. А. К вопросу о статистической теории однородности геологических совокупностей. «Геохимия», 1965, № 4.
- Ромм Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М., изд-во «Недра», 1966.
- Роза С. А. Зависимость деформации скального основания от его трещиноватости. «Гидротехническое строительство», 1962, № 9.
- Роза С. А., Зеленский Б. Д. Исследования механических свойств скальных оснований гидротехнических сооружений. М., изд-во «Энергия», 1967.
- Рубцов В. К. Оценка степени нарушения скального основания при взрывах. «Гидротехническое строительство», 1963, № 7.
- Руппштейн К. В., Долгих М. А., Матвеев В. Б. Вероятностные методы оценки прочности и деформируемости горных пород. М., Стройиздат, 1964.
- Рыбалко Ф. П. Распределение неоднородностей пластической деформации. Изв. ВУЗов. Физика, № 6, 1958, № 1—2, 1959.
- Саваренский Ф. П. Инженерная геология. ОНТИ—НКТП. 1938.
- Савинская М. К. Инженерно-геологические свойства траппов как основания гидротехнических сооружений. «Гидротехническое строительство», 1963, № 6.
- Севердеев В. П., Тоцицкий Э. М., Един В. И. К вопросу о зарождении и развитии трещин. Докл. АН СССР, т. 158, № 6, 1964.
- Седов Л. И. Об основных принципах механики сплошной среды. Изд. МГУ. М., 1961.
- д. Ситтер Л. У. Структурная геология. М., изд-во иностр. лит., 1960.
- Славин Б. Е., Казаков В. П. Результаты натурных исследований проявления горного давления при сооружении железнодорожных тоннелей в трещиноватых скальных породах. ФТПРПИ, № 2, 1967.
- Скарятин В. Д. Выступление в прениях. Тр. первого Всесоюзного совещания по трещ. коллекторам нефти и газа. М., Гостехиздат, 1961.
- Скарятин В. Д. Субмеридиональная зона повышенной трещиноватости на Северо-Восточном Кавказе и приуроченность к ней нефтепроявлений. В сб. «Глубинные разломы», М., изд-во «Недра», 1964.
- Скарятин В. Д. Классификация трещин и применение аэрофото-съемки и некоторых других методов при изучении трещиноватости горных пород. Тр. второго Всесоюз. совещ. по трещ. коллекторам нефти и газа. М., изд-во «Недра», 1965.
- Скворцов Г. Г., Романовская Л. И. Инженерно-геологические исследования и прогнозы при разведке месторождений полезных ископаемых. М., изд-во «Недра», 1966.
- Смехов Е. М. Закономерности развития трещиноватости горных пород и трещинные коллекторы. Тр. ВНИГРИ, вып. 172. Л., 1961.
- Соколов Д. С. Инженерно-геологическая съемка при гидроэнергетическом строительстве. Госэнергоиздат, 1947.
- Соколов Д. С. Основные условия развития карста. М., Гостеолтехиздат, 1962.
- Соколов Н. И. О типах смещения скальных трещиноватых пород на склонах. Тр. Лаборатории гидрогеологических проблем. Вып. 35, М., 1961.
- Струнин Б. М. О неоднородности пластической деформации при растяжении. Докл. АН СССР, т. 130, № 2, 1960.
- Струнин Б. М. О статистической интерпретации рельефа поверхности деформированных кристаллов. «Физика твердого тела», т. 6, 1964, № 10.
- Тарасова И. В. Влияние трещиноватости на деформируемость скальных оснований. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1968, № 2.
- Терцаги К. Инженерная геология. ОНТИ НКТП СССР. М.—Л. Новосибирск, 1934.
- Тетяев М. М. Основы геотектоники. ОНТИ, 1934.

Тетяев М. М. Тектоника рудных полей жильного типа. «Советская геология», 1940, № 8, 9.

Тиздель Р. Р. Братская плотина на р. Ангаре. В сб.: «Геология и плотины», т. 2, М., Госэвергоиздат, 1962.

Тиздель Р. Р. Осадка скального основания Братской ГЭС. «Гидротехническое строительство», 1963, № 9.

Ткачук Э. И. Изучение зависимости деформации кварцевых порфиров участка Капчагайской ГЭС от их трещиноватости. Тр. Гидропроекта, вып. 14. М., изд-во «Энергия», 1966.

Толоконников И. С. Трещиноватость и проницаемость лав Армени. Тр. Гидропроекта, вып. 14, М., изд-во «Энергия», 1966.

Томсон И. Н. Глубинные разломы, их рудоконтролирующее значение и методы изучения. В кн.: Орлова А. В., Томсон И. Н., Вольфсон Ф. И., Луккин Л. И. «Литологич. и структурные факторы размещения оруденения в рудных районах». Изд-во «Недра», 1964.

Труды по изучению трещиноватости пород в горном массиве. Тр. ВНИИМ, сб. LI, Л., 1964.

Федоренко В. С. К методике инженерно-геологического изучения трещиноватости скальных и полускальных пород при исследовании под гидроузлы в складчатых областях. Вестн. МГУ, сер. геол., № 2, 1959.

Феокистов Г. Д. Траппы бассейна среднего течения р. Ангары. Зап. Вост.-Сиб. отд. Всесоюзн. мин. об-ва, вып. 3, 1962.

Филиппов Ю. К. Математика н... марсианские каналы. «Природа», 1966, № 10.

Фисенко Г. Л. Прочностные характеристики массива горных пород. В сб. «Механика горных пород и маркшейдерское дело», М., 1959.

Фридман Я. Б. Оценка опасности разрушения машиностроительных материалов. В сб. «Теоретич. проблемы конструирования машин». Машгиз, 1957.

Фридман Я. Б. Закономерности разрушения твердых тел применительно к задачам тектонофизики. В сб. «Проблемы тектонофизики». Госгеолтехиздат, 1960.

Фридман Я. Б., Гордеева Т. А., Зайцева А. М. Строение и анализ изломов металлов. М., Машгиз, 1960.

Фридман Я. Б., Морозов Е. М. Применение принципа Гаусса — Остроградского для изучения закономерностей разрушения твердых тел. Докл. АН СССР, т. 144, № 2, 1962.

Фурмарье П. Общие соображения о развитии сланцеватости в складчатых толщах. Тр. XVII сессии МГК, т. 1, ОНТИ, 1937.

Халип В. Е. Геотектонические основы поисков нефти. Азнефтеиздат, Баку, 1954.

Храмушев А. С. Гидрогеологическая классификация трещиноватости горных пород. «Советская геология», 1941, № 4.

Черепанов Г. П. О развитии трещин в сжатых телах. «Прикладная механика и математика», т. 50, 1966, № 1.

Чернышев С. Н. Экзогенные деформации траппов в долине р. Ангары. Изв. вузов. «Геология и разведка», 1965, № 12.

Чернышев С. Н. Статистическое исследование трещиноватости и водопроницаемости интрузивных массивов. Бюлл. МОИП, отдел геологический, т. 41, вып. 5, 1966.

Чернышев С. Н. Учет трещиноватости при построении расчетных моделей массива горных пород. В сб.: «Математич. методы в инж. геологии», М., 1968.

Шатский Н. С. Очерки тектоники Волго-Уральской нефтеносной области и смежной части западного склона Южного Урала. Избранные труды, т. 2, М., изд-во «Наука», 1964.

Шейнин В. И. Обобщение вероятностного подхода к оценке механических свойств горного массива. «Физ.-технич. проблемы разработки полезных ископаемых», 1965, № 3.

Шрок Р. Последовательность напластования в свитах слоистых пород. Изд-во иностр. лит., 1961.

Ш у л ь ц С. С. Об изучении планетарной трещиноватости. В кн.: «Деформация пород и тектоника», докл. сов. геологов к XXII сессии МГК. М., изд-во «Наука», 1964.

A m i l i e n J. Longueur et rejet des failles liées aux tremblements de terre allongement des isoseistes., Cahiers géol. N 70—71, 1963.

B a l k w i t z P., Über Klüfte I. Beobachtungen in Thüringischen Schiefergebirge, «Geologie», 14, 1965, N 3.

B e a r d C. N. Quantitative study of columnar jointing. Bull. geol. Soc. Amer., v. 70, 1959, pp. 379—381.

B u r n e t t J o h n L. Fracture traces in the Tuscan formation, northern California, Short Contribution to California geology. Special report 82, California Division of Mines and geology, 1963.

C l o o s E. Oolite deformation in the South Mountain fold, Maryland., Bull. Geol. Soc. Amer., v. 58, N 9, 1947.

C l o o s H. Der Mechanismus tiefvulkanischer Vorgänge. Sammlung Vieweg. Berlin, 1921.

C l o o s H. Einführung in die Geologie. Berlin, 1936.

D z u l y n s k i S., K o t l a r c z y k I. Tectoglyphs on slickensided surfaces. Bull. Acad. Polon. Sci. Ser. Sci. geol. et geogr., 13, N 2, 1965.

F o u r m a r i e r P. Schistosity, foliation et microplissement., Arch. Sci. phys. et nat., v. 4, fasc. I, 1951.

G r i g g s D. T. Deformation of rocks under confining pressure. J. geol., v. 44, 1936.

G r i f f i t h A. The phenomena of rupture and flow in solids., Phil. Trans. Roy. Soc., 221, Ser. A., 1921.

G u t e n b e r g B., R i c h t e r C. Seismicity of the Earth and associated Phenomena, Princeton Univ. Press, 1954.

H a r r i s I. F., T a y l o r G. I., W a l p e r I. L. Relation of deformational fractures in sedimentary rocks to regional and local structure. Bull. Amer. Ass. Petr. geol., 44, N 12, 1960.

H i l l P. A. Curvilinear (radial, bow-tie, festoon) and concentric jointing in Yurassic dolerite Mersey Bluff, Tasmania, Journal of Geology, v. 73, N 2, 1965, pp. 255—271.

H o d g s o n R. A. Classification of structures on joint surfaces. Amer. J. of Sci., 259, N 7, 1961, pp. 493—502.

H o d g s o n R. A. Regional study of jointing in Comb Ridge-Navajo Mountain area, Arizona and Utah., Bull. Am. Ass. Petr. Geol. v. 45, N 1, 1961, pp. 1—38.

H o d g s o n R. A. Genetik and geometric relations between structures in basement and overlying sedimentary rocks with examples from Colorado Plateau and Wyoming, Bull. Amer. Ass. Petr. Geol., 49, N 7, 1965.

H a z z a r d Y. C. Rock and structure of the northern Providence mountains, San Bernardino county, California, Geology of Southern California. State California Department of National Resources. Division of mines, N 170, 1954, pp. 27—35.

I i d a K. Earthquake energy and earthquake fault. The journal of earth sciences. Nagoya university, v. 7, N 2, 1959., pp. 98—107.

I r m a y S. Flow of liquids through cracked media. Bull. Res. Coun. Israel, v. 5A, N 1, Ierusalem, 84, 1955.

I r w i n G. R. Fracture Mechanics, Incl. «Structural Mechanics», Proc of the first simp. on naval struct. mech. Pergamon Press, N.—Y., 1960, pp. 537—592.

K u m a o H i n o. Effect of discontinuity of rocks on fragmentation. Journal of the industrial explosives society. Japan, v. 18, 4, 1957.

K o m u r a S. Relation between the Yshimoto — Yida's statistical formula and some crack phenomena, J. Seism. Soc. Japan, 8, N 2, 1955.

L a c h e n b r u c h H. Depth and spacing of tension cracks, J. Geophys. Res., 66, 12, 1961.

L a t t m a n L. H. and N i c k e l s e n R. P. Photogeologic Fracture-Trace Mapping in Appalachian Plateau, Bull. Amer. Ass. Petr. Geol., 1956, v. 42, 9.

Ljungner E. Spaltentektonik und Morphologie der Schwedischen Skagerrakküste, Bull. of the Geological institution of the University of Upsala, vol. XXI, 1927—1930.

Makovec Fr. Das Ausmaß der Felsauflockerung bei Sprengarbeiten. «Geol. und Bauwesen», 28, 1, 1962.

Maxwell J. C. Origin of Slaty and Fracture Clewage in the Delaware Water gap area, New Jersey and Pennsylvania. Petrologic Studies: A Volume to Honor A. F. Buddington, Published by the geol. soc. of America, 1962, pp. 281—311.

Mollard J. R. Aerial mosaics reveal fracture patterns on surface Saskatchewan and Manitoba. Oil in Canada, 1957, august, pp. 26—50.

Müller L. Über die Entstehung oberflächenparalleler Klüfte. Versuch einer geomechanischen Erklärung. Geologie und Bauwesen. Jg. 27, Hf. 3—4, Wien, 1962.

Müller L. Felsbau. I Band. Enke — Verlag, Stuttgart, 1963.

Müller L. Der progressive Bruch in geklüfteten Medien. Proc. 1st Congr. Internat. Soc. Rock. Mech., vol. 1, Lisboa, 1966.

Roberts J. C. Feather-fracture and the mechanics of rock-jointing. Amer. J. Sci. 259, 7, 1961, pp. 481—492.

Rabczewicz I. Die Ankerung in Tunnelban ersetzt bisher gebräuchliche Einbaumethoden. «Schweizerische Bauzeitung», 1957, Hf. 9 Jg 75.

Muehlberger W. R. Conjugate joint sets of small dihedral angle. J. Geol., 69, 2, 1961.

Parker I. H. Regional systems jointing in slightly deformed sedimentary rocks. Bull. Geol. Soc. Amer. vol. 53, 3, 1942.

Pancini M. Results of the first of tests performed on a model reproducing the actual structure of the abutment rock of the Vaiont Dam. Geologie und Bauwesen. Jg. 27, Hf. 3—4, 1962.

Smallly I. I. Contraction crack networkes in basalt flow. Geol. Mag. v. 103, N 2, 1966.

Tocher D. Movements on faults. Proceedings of the 2-nd World Conference on Earthquake engineering, v. 1, Tokyo, 1960, pp. 561—565.

Tocher P. Earthquake Energy and Ground Breakage, Bull. Seism. Soc. Amer. v. 48, N 2, 1958, pp. 147—153.

Terzaghi K. Dam foundation on sheeted granite. Geotechnique, v. 12, N 3, 1962.

Ter-Stepanian G. Klassifizierung der Erdrutschrisse. Geol. und Bauwesen, Jg. 28, Hf. 1, 1962

Ruxton B. R. Weathering of granite and associated erosional features in Hong-Kong. Bull. Geol. Soc. of Amer., v. 68, N 10, 1957.

Richey Y. E. Granite. Water Power, N 6—12, 1963.

Ukhov S. B., Tsytoovich N. A. Some principles of mechanical properties of chloritic schists. In «Proc. 1st Congr. Internat. Soc. Rock. Mech.», v. 1, Lisboa, 1966.

Woodring W. P., Stewart R., Richards R. U. Geology of the Kettleman Hills oil Field, California. Us. geol. Survey, Prof. Papers, t. 195, 1946.

Wittke W. Verfahren zur Standsicherheitsberechnungsarten, auf ebenen Flächen gelagerter Körper und die Anwendung der Ergebnisse auf die Standsicherheitsberechnungen von Felsböschungen. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hochschule Fridriciana in Karlsruhe. Hrsgb. von prof. H. Lenssink, Hf 20, Karlsruhe, 1965.

Wittke W., Louis C. Zur Berechnung des Einflusses der Bergwasserströmung auf die Standsicherheit von Böschungen und Bauwerken in zerklüftetem Fels. «Proc. 1st Congr. Internat. Soc. Rock. Mech.» vol. 2, Lisboa, 1966.

Wise D. U. Keystone faulting and gravity sliding driven by basement uplift of owl Greek mountains, Wyoming. Bull. Amer. Ass. Petr. Geol., 47, 4, 1963, pp. 586—599.

О г л а в л е н и е

Предисловие	3
Часть I	
ТРЕЩИНОВАТОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД	
Глава 1. Классификация трещин горных пород. Геометрия, морфология и генезис трещин	5
§ 1. Уровни трещиноватости	5
§ 2. Основные понятия, связанные с трещиноватостью	9
§ 3. Геометрические классификации трещин	10
§ 4. Морфология трещин	15
§ 5. Генезис трещин (общие замечания)	20
§ 6. О генетической систематизации трещин	22
Глава 2. Основные геологические закономерности развития трещин в горных породах	25
§ 7. Петрогенетическая трещиноватость	25
§ 8. Тектоническая трещиноватость	36
§ 9. Экзогенная трещиноватость	49
§ 10. Кливаж	57
Глава 3. Деформация и разрушение твердых тел	60
§ 11. Макроскопические теории деформации и разрушения. Математическая теория трещин	60
§ 12. Статистическая картина деформации и разрушения	67
§ 13. Атомный механизм деформации и разрушения	70
§ 14. Факты и гипотезы о механизме роста тектонических разрывов	74
Часть II	
МОДЕЛИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД	
Глава 4. Модели трещиноватости массива горных пород	89
§ 15. Предварительные замечания	89
§ 16. Локальные модели сети трещин	93
§ 17. Модели — отклики сети трещин массива горных пород	99
§ 18. Классификация массива горных пород по степени трещиноватости	100

Глава 5. Трещиноватость и водопроницаемость	104
§ 19. О режиме движения подземных вод в трещиноватых массивах	104
§ 20. Связь водопроницаемости с параметрами трещиноватости	106
§ 21. Характеристика трещиноватости по данным о водопроницаемости	110
§ 22. Использование модели трещиноватости при планировании филь-	
трационного опробования	111
Глава 6. Трещиноватость и механическое свойство массы горных	
пород	112
§ 23. О влиянии трещиноватости на механические свойства массива	
горных пород	112
§ 24. Полевые экспериментальные определения свойств массива и модель	
трещиноватости	116
§ 25. Расчет деформируемости и прочности массива горных пород с вве-	
дением в расчет параметров трещиноватости	118
§ 26. Учет трещиноватости массива горных пород при физическом моде-	
лировании	122
Глава 7. Учет трещиноватости при решении некоторых горнотехни-	
ческих задач	125
§ 27. Трещиноватость и поперечное сечение выработки	125
§ 28. Трещиноватость и анкерное крепление	127
§ 29. Оценка блочности массива горных пород	128
§ 30. Дробление трещиноватости породы взрывом	132
Глава 8. Основы методики изучения трещиноватости для инженерно-	
геологических целей	133
§ 31. Принципы метода	133
§ 32. Изучение трещиноватости на обнажениях	135
§ 33. Камеральная обработка	139
§ 34. Изучение трещиноватости в горных выработках	141
Заключение	143
Литература	148