



А. И. ПЕЧЕРКИН, Г. Б. БОЛОТОВ, В. Н. КАТАЕВ

**ИЗУЧЕНИЕ
ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ
ПЛАТФОРМЕННЫХ СТРУКТУР
ДЛЯ КАРСТОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ**

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Пермский ордена Трудового Красного Знамени
государственный университет им. А. М. Горького
Всесоюзный институт карстоведения и спелеологии

А. И. ПЕЧЕРКИН, Г. Б. БОЛОТОВ, В. Н. КАТАЕВ

ИЗУЧЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ
ТРЕЩИНОВАТОСТИ
ПЛАТФОРМЕННЫХ СТРУКТУР
ДЛЯ КАРСТОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

Учебное пособие по спецкурсу

Пермь 1984

УДК 551.44 : 624.131

Печеркин А. И., Болотов Г. Б., Катаев В. Н. Изучение тектонической трещиноватости платформенных структур для карстологических целей. Учебное пособие по спецкурсу. — Пермь: Перм. ун-т, 1981. — 34 с.

Рассматриваются вопросы изучения тектонической трещиноватости платформенных структур. Показано, что изучение трещиноватости закарстованных массивов должно быть комплексным, проводимым на геолого-генетической основе, которая предполагает учет истории тектонических движений, структурного плана территории, литологические особенности горных пород и их последующих изменений.

Предлагаемое учебное пособие рекомендуется при изучении курсов «Общее карстоведение», «Инженерное карстоведение», «Инженерная геология», «Механика грунтов», «Техническая геология». Оно может представить интерес для специалистов, работающих в области карста и трещиноватости в самых различных направлениях.

Библиогр. 63 назв. Табл. 10. Ил. 42.

Печатается по постановлению редакционно-издательского совета Пермского университета

Рецензенты: кафедра геологии Пермского государственного института, ст. научн. сотр. лаборатории гидрогеологии ВНИИОС им. А. П. Шатрина.

Темплан 1984, под. 232
Редактор Л. П. Сидорова
Технический редактор Л. Е. Петрова
Корректор В. И. Щербакина

Сдано в набор 14.03.81. Номер заказа 1401. 31 ЛБ06293. Формат 60×81. Бумага 70×90. 34 листа литературная. Печать высокая. Цена 30 коп. 40 коп. с л. б. Тираж 1000 экз. Цена 30 коп. 40 коп. с л. б.

Редакционно-издательский отдел Пермского университета. 614600, Пермь, ул. Букарева, 1а.

Книжная типография № 2 Министерства издательств, полиграфии и книжной торговли. 614001, Пермь, ул. Коммунистическая, 57.

© Пермский государственный университет, 1981

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам изучения трещиноватости горных пород посвящено много работ как советских, так и зарубежных ученых. Особое внимание в них уделено:

1) разработке методики регистрации трещин различного генезиса в полевых условиях и интерпретации результатов исследований;

2) построению классификаций трещин по генетическим, морфометрическим и другим признакам;

3) изучению вопросов влияния трещиноватости на прочностные и деформационные свойства массивов горных пород и на ход экзогенных геологических процессов.

Вопрос о всеобъемлющей генетической классификации трещин в горных породах до сих пор не решен, а имеющиеся многочисленные классификации порой не дополняют, а исключают друг друга (Пермяков, 1949, 1957; Белоусов, 1952, 1954; Соколов, 1962; Невский, 1963; Нейштадт, Пирогов, 1969; Рац, Чернышов, 1970; Варга, 1979 и др.). Вместе с тем практически ни один исследователь не возражает против выделения трех генетических типов трещин: 1) литогенетические, 2) тектонические, 3) экзогенные, что отражает историческую последовательность их образования в массивах осадочных горных пород, подверженных карстованию (Соколов, 1962).

Наибольшее значение для развития карстовых процессов имеет тектоническая трещиноватость, распространенная повсеместно как в фундаменте, так и в породах верхнего структурного этажа.

Все платформенные тектонические трещины подразделяются на «внутрислоистые» и «секущие» (терминология В. В. Белоусова, 1952, 1954). Внутрислоистые («планетарные» или «общие», по М. В. Рацу и С. Н. Чернышову, 1970) образуют «фон трещиноватости» осадочных пород на платформах и в складчатых областях. Они широко развиты по разрезу платформенных отложений от докембрия до третичных отложений. Ориентировка их при этом остается неизменной, а густота вверх по разрезу уменьшается. 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 (Белоусов, 1976).

Планетарные трещины не приурочены к каким-либо тектоническим структурам, они лучше выражены в плотных породах, в которых обычно перпендикулярны слоистости. Трещины, как правило, не выходят за пределы одного слоя. Механизм их образования весьма сходен с механизмом образования внутрислойных литогенетических трещин и объясняется В. В. Белоусовым (1952, 1954) как образование трещин отрыва в условиях растяжения пластов на большой глубине под нагрузкой вышележащих толщ горных пород. При этом в условиях толщ, состоящих из неоднородных по прочности (и мощности) пластов, образование трещин нередко сопровождается течением вещества более пластичных слоев (Белоусов, 1954) и залечиванием трещин. Непосредственно в обнажении или выработке практически невозможно или весьма затруднительно отличить внутрислойные тектонические трещины от внутрислойных литогенетических.

Необходимо добавить, что при сопоставлении распределения внутрислойных трещин в определенном пласте пород рядом исследователей была выведена отчетливая зависимость густоты трещин от мощности разбитых ими слоев. Так, А. А. Богданов (1947) для флишевидных образований среднего карбона западного склона Южного Урала, Г. А. Смирнов (1949) для терригенных пород верхнего карбона установили, что среднее расстояние между трещинами равняется примерно двум мощностям пласта, в котором они развиты. Позднее (Рац, 1962; Рац, Чернышов, 1970) было установлено, что для терригенных пород расстояние между трещинами пропорционально квадратному корню мощности слоя. В связи с тем, что достаточно точно определить генезис внутрислойных трещин трудно, нет полной уверенности в том, что эти зависимости получены только для литогенетических или только для внутрислойных тектонических трещин.

Секущие тектонические трещины отличаются от всех других присутствующими только им признаками: хорошо выраженная закономерность в ориентировке простирания, захват трещинами сразу больших пачек слоев, а также глубокое проникновение внутрь массива горных пород (Пермяков, 1949, 1951).

Наиболее отчетливо секущие трещины представлены в платформенных условиях на структурах антиклинального типа.

В. В. Белоусовым (1952, 1954) секущие трещины антиклинальных структур (брахиантиклинали, валы, купола, тектонические ступени, соляные купола) названы «трещинами из-

гиба», что отражает условия их образования (изгибание земной коры). Наиболее интенсивно такие трещины развиты в сводовых частях структур и на крутых крыльях (Пермяков, 1949, 1951; Белоусов, 1952, 1954; Пермяков, Каравашкина, 1953; Калачева, Кноринг, 1965 и др.).

На куполовидных структурах наблюдается сочетание радиальных и концентрических трещин, так называемая «черепаховая структура». Иногда развита (Белоусов, 1952) одна из систем, чаще радиальная (о-в Ром в Шотландии, п-в Андрамэрхан в Шотландии, Кольский ф-в).

На овальных поднятиях (вал, брахиантиклиналь, локальные структуры прифлексурных зон) наиболее распространена радиальная система, которая выражена в виде трещин, направленных по падению слоев нормально к стратоизогипсам. Трещины этой системы, расположенные на двух крыльях поднятия, часто сливаются в сводовой части, образуя сквозные поперечные трещины (Белоусов, 1951). Радиальная система трещин (или диагональная, по Е. Н. Пермякову, 1951) возникает всегда в тех случаях, когда силы растягивания действуют не только в противоположных направлениях, но и под углом друг к другу. На брахиантиклинальных структурах Предуралья нами было установлено, что диагонально к направлениям простирания и падения трещины располагаются преимущественно в зоне, прилегающей к центру структуры. В периферийных же частях брахиантиклиналей главные направления трещиноватости ориентированы радиально. Вторая система трещин называется продольной: главные направления трещиноватости идут продольно к линиям падения и простирания.

Преобладание той или иной системы трещин на отдельных поднятиях определяется направлением максимального изгиба слоев: трещины располагаются перпендикулярно к направлению наибольшего изгиба.

Благодаря развитию горизонтальных растягивающих напряжений широкое развитие получают сбросы и раздвиги. Первые связаны с трещинами скалывания, вторые — с трещинами отрыва (Белоусов, 1976). Растягивающие напряжения, возникающие в обстановке выгибания земной коры или некоторых ее слоев, под влиянием сил, приложенных вертикально вверх (блоковая тектоника), обуславливают наличие областей растяжения на внешней стороне слоя, а на внутренней — сжатия. Однако вследствие малых амплитуд поднятия и небольших углов наклона слоев сжатие бывает незначительным и практического значения не имеет (Белоусов, Гзовский, 1964).

Появление диагональных разломов, проходящих через центр брахиантиклиналей, а также диагональной (радиальная, по В. В. Белоусову) системы трещин связано со скалыванием, подготовленным, в свою очередь, действием сил растяжения, направленных под углом друг к другу. Вследствие чрезвычайно малых углов изгиба относительно размеров структуры амплитуды смещения межразломных блоков незначительны (Пермяков, 1949, 1951).

Продольная система трещин подготовлена растягивающими усилиями, направленными в противоположные стороны в пределах каждого блока, ограниченного диагональными, скалывающими трещинами. Трещины продольной системы — не что иное как трещины отрыва, формирующиеся при увеличении амплитуды поднятия структуры после образования трещин скалывания.

В особую группу выделяются так называемые приразрывные опережающие и опережающие трещины. Первые возникают при смещении вдоль поверхности основного разлома. Обычно они расположены по обе стороны от сместителя разрыва в полосе, ширина которой тем больше, чем крупнее основной разрыв. Вторые опережают разрыв не только во времени, но и в пространстве, развиваясь по простиранию и падению разрыва дальше, чем прослеживается сместитель основного разрыва.

Основное отличие трещин отрыва от трещин скалывания заключается в характере поверхности стенок трещин. Так, трещины отрыва характеризуются неровными, бугристыми поверхностями без знаков скольжения (трения). На поверхности трещин скалывания имеются зеркала скольжения, борозды, края таких трещин ровные. Как правило, трещины отрыва по раскрытости значительно шире, чем трещины скалывания.

Раскрытость трещин, их протяженность и глубина распространения являются важным фактором водопроницаемости скальных массивов, обуславливающим развитие карстовых явлений в растворимых породах. Д. С. Соколов (1962), определяя значение трещиноватости как фактора водопроницаемости, указывает на следующие особенности:

1) в формировании водопроницаемости горных пород тектонические трещины играют значительно большую роль по сравнению с трещинами литогенетическими;

2) такое различие связано главным образом с наличием секущих тектонических трещин, которые так же, как и многие разрывные смещения, способствуют достаточно интенсивной циркуляции подземных вод на значительной глубине;

3) особенности распределения трещин изгиба обуслови-

вают слабое развитие трещинной водопроницаемости в отрицательных структурных элементах земной коры и, наоборот, широкое ее проявление в областях поднятий;

4) внутрислойные тектонические трещины обладают ничтожным «первичным» раскрытием, и они не могут обеспечить возможность интенсивной циркуляции подземных вод.

Как было отмечено выше, трещины в массивах горных пород, приуроченных к тектоническим структурам, распределены, как правило, неравномерно. Отмечаются зоны повышенной и незначительной трещиноватости. Характер распределения зон зависит от формы самой структуры, а также от механических свойств пород, в частности, прочности на разрыв, прочности в условиях трехосного сжатия, способности пород к пластическим деформациям и др. Вследствие этого проявляется неравномерность закарстованности как в плане, так и в глубину.

Зоны повышенной трещиноватости: своды положительных структур, их крутые крылья, приразрывные участки при прочих равных условиях будут иметь максимальную закарстованность. Весьма проблематичным остается вопрос о соотношении глубин распространения карста в карбонатных, сульфатных и соляных массивах. В частности, сульфатные массивы отличаются от карбонатных менее развитой глубинной закарстованностью. Ряд исследователей (Соколов, 1962) объясняют это слабой трещиноватостью гипсов и нераспространением секущих трещин на большой глубине вследствие высокой пластичности породы. Наши исследования, проведенные в Предуралье, Прикарпатье и Поволжье, показывают, что на глубинах 100 и более метров от земной поверхности тектоническая трещиноватость гипсов выражена достаточно четко. Слабая глубинная закарстованность сульфатных массивов обусловлена, прежде всего, быстрым насыщением воды сульфатом кальция при ее движении в глубь массива. В связи с этим развиваются преимущественно поверхностные карстовые формы.

Резюмируя вышеизложенное, необходимо отметить:

1. В платформенных условиях помимо литогенетических трещин, трещин разгрузки и выветривания широко представлены трещины тектонического происхождения, приуроченные к зонам сопряжения крупных положительных и отрицательных структур. Они развиты как в фундаменте, так и в осадочном комплексе пород.

2. В осадочных комплексах следует выделять трещины а) секущие (неограниченные одним слоем пород); б) приразрывные (расположенные в зонах, прилегающих к разрывным нарушениям); в) внутрислойные (развитые в пределах одно-

го слоя пород и независимые от ориентировки структуры). Наиболее четко секущие трещины выражены на антиклиналях.

3. На положительных структурах (вал, брахиантиклиналь, купол и т. д.) выделяют две главные системы тектонических трещин: диагональную (радиальную) и продольную (концентрическую на куполах). По механизму образования их подразделяют соответственно на трещины скальвания и отрыва. Вследствие малых углов наклона крыльев структур, а также из-за специфики механизма их образования плоскости секущих тектонических трещин имеют вертикальное или почти вертикальное падение.

4. Трещины локальных положительных структур распределены весьма неравномерно. Характер их распределения зависит от формы структуры, механических свойств пород, неоднородности массива. В связи с этим распределение поверхностных и подземных карстовых форм также неравномерно. Наиболее закарстованные участки приурочены к зонам максимальной трещиноватости (при условии наличия совокупности карстообразующих факторов).

5. Распределение глубинной закарстованности зависит не только от глубины проникновения секущих тектонических трещин, но и от растворяющей способности воды и от растворимости самих пород. Например, насыщение воды сульфатом кальция в сульфатных массивах происходит значительно быстрее, чем в карбонатных массивах карбонатом кальция. Вследствие этого в гипсовых и гипсо-ангидритовых массивах значительно сильнее развиты поверхностные формы карста.

Глава 1

МЕТОДИКА ПОЛЕВОГО ИЗУЧЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ДЛЯ КАРСТОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

Генетическая и количественная характеристика трещиноватости необходимы при оценке инженерно-геологических, гидрогеологических условий, территорий, изучении обвалов, оползней, карста, эрозии и других экзогенных геологических процессов и явлений. В связи с этим трещиноватость горных пород исследуется специалистами-геологами самых различных направлений.

До начала 50-х гг. XX в. исследования трещиноватости горных пород носили преимущественно качественный характер. Лишь с опубликованием работ Е. Н. Пермякова (1949),

Н. С. Кригера (1951), Л. И. Нейштадта (1957), Л. И. Нейштадта и И. А. Пирогова (1969) и других началась разработка специальных методов изучения и оценки трещиноватости для гидрогеологических и инженерно-геологических целей. В настоящее время накоплен большой опыт интегрального количественного изучения трещиноватости, разработан целый ряд эффективных методик исследования и изображения систем трещин, разбивающих массивы горных пород, обзор которых приводится ниже.

§ 1.1. Краткий обзор существующих методов изучения и изображения трещиноватости горных пород

Все методы исследования трещиноватости можно подразделить на три группы:

1) дистанционные методы (изучение трещиноватости путем анализа аэрофотокосмических снимков, а также снимков, выполненных с земли);

2) методы исследования трещиноватости на обнаженных поверхностях горных пород — в естественных обнажениях, на бортах карьеров, котлованов, в стенках шахт, штолен и других горных выработок;

3) методы изучения трещиноватости вне открытых поверхностей горных пород (анализ керна скважин, результатов бурения, опытнофильтрационных, геофизических работ).

1. Дистанционные методы исследования трещиноватости.

Прогресс науки и техники в последние десятилетия позволил получать качественные снимки земной поверхности, выполненные с самолета, спутников или непосредственно с земли, на которых с достаточной степенью точности можно дешифровать не только линеаменты и крупные разломы, но иногда и макротрещины (Методические рекомендации по использованию аэрофотоматериалов при изучении карста Украины, 1980). Надежные дешифровочные признаки, методика картирования трещиноватости по результатам аэрофото-, фототеодолитной съемки приводятся в указанных рекомендациях, работах У. Шарпе, Р. Парисока (Sharpe, Parisok, 1979), И. С. Гудилина и И. С. Комарова (1978) и др.

Для количественной оценки трещиноватости наиболее часто используются два показателя: плотность трещиноватости (количество трещин, приходящихся на единицу площади территории, $1/\text{км}^2$) и коэффициент трещиноватости (суммарная длина трещин, приходящихся на единицу площади, $\text{км}/\text{км}^2$).

Достоинство дистанционных методов заключается, во-первых, в их высокой эффективности. Так, по данным У. Шарпе и Р. Парисока, опытный дешифровщик способен закартиро-

вать трещиноватость на площади в 100 акров (0,405 км²) в течение нескольких минут. Кроме того, в районах, где коренные породы скрыты под почвенным покровом, четвертичными отложениями, сложно зафиксировать крупные тектонические трещины, разломы, находясь на земле, тогда как их выявление на фотоснимках не представляет труда. Во-вторых, аэрофотосъемка позволяет получить представление об основных особенностях трещиноватости тектонических структур и даже целых регионов, что помогает понять генезис и механизм образования трещин в изучаемом районе, правильной организовать наземное изучение трещиноватости.

2. Методы исследования трещиноватости на обнаженных поверхностях горных пород.

В этой группе можно выделить три основных метода изучения трещиноватости на обнаженных поверхностях горных пород: 1) метод беглого изучения, 2) статистический метод, 3) метод картирования трещин (Невский, 1979).

Метод беглого изучения применяется на первом этапе исследования трещиноватости. В качестве самостоятельного метода он используется лишь в тех случаях, когда перед исследователем стоит задача приблизительно оценить параметры трещиноватости. Главное его достоинство — малая трудоемкость и достаточно высокая производительность.

После выявления положения выбранных для изучения трещиноватости участков по отношению к сторонам света, геологическим структурам (складкам, разломам и т. п.) определяются системы трещин и их генетическая природа — относятся они к литогенетическим, тектоническим трещинам или трещинам выветривания. Затем изучается каждая выделенная система трещин в отдельности. Отмечаются длина, ширина, густота трещин, среднее расстояние между ними, тип заполнения. Путем замеров 10—20 трещин устанавливаются средние элементы залегания каждой системы и веер разброса замеров.

Для более точного выяснения закономерностей в распределении и ориентировке трещин применяются простейшие способы обработки результатов картирования. Первичный формой систематизации полевых данных являются таблицы трещиноватости, в которых приводятся сведения о генезисе трещин, элементах залегания, ширине, протяженности, характере выполнения и других характерных признаках. Таблицы служат основой для составления диаграмм трещиноватости: роз-диаграмм, лучевых круговых, точечных круговых диаграмм, графиков трещиноватости в прямоугольных координатах.

Для выявления преобладающих направлений простирания трещин наиболее удобны розы-диаграммы. При их составле-

нии вычерчивается полукруг произвольного радиуса, на который наносится градусная сетка с северными румбами. Через произвольно выбранные интервалы (от 2 до 10°) проводятся радиусы-меридианы. В соответствии с выбранным делением все трещины группируются по значениям их азимут простирания, подсчитывается количество трещин, попавших в каждый интервал. Полученные величины наносятся на розу-диаграмму в виде радиусов, направление которых отвечает среднему значению азимута простирания для данной группы, а длина пропорциональна количеству трещин. Концы отрезков соединяют прямыми линиями и полученную фигуру заштриховывают либо заштриховывают (рис. 1а).

Графики трещиноватости в прямоугольных координатах отличаются от роз-диаграмм способом изображения зависимости количества трещин от их положения в пространстве. Они менее наглядны (рис. 1б). Розы-диаграммы и графики в прямолинейных координатах могут быть использованы и для изображения углов падения трещин.

Построение диаграмм Тарра, мало используемых в настоящее время, аналогично построению розы трещиноватости. Они являются по сути дела негативом розы-диаграммы (рис. 2).

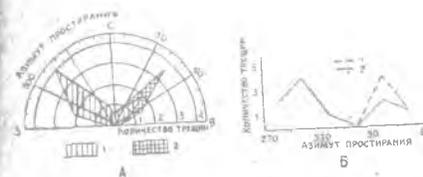


Рис. 1. Роза-диаграмма (А) и график трещиноватости в прямоугольных координатах (Б). Трещины: 1 — литогенетические, 2 — тектонические (по Г. С. Золотареву, Э. В. Калинину, А. В. Миннервину, 1970)

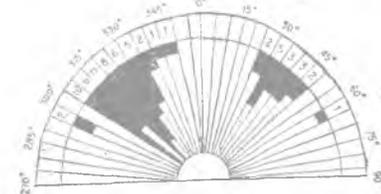


Рис. 2. Диаграмма Тарра. Цифры внутри полукруга соответствуют количеству трещин данного простирания

Лучевая круговая диаграмма трещиноватости составляется на круге с нанесенной градусной сеткой. Трещины изображаются в виде лучей, выходящих из центра круга в направлении, соответствующем азимуту их простирания. Линии простирания наносятся с таким расчетом, чтобы при прибавлении к азимуту простирания трещин 90° по ходу часовой стрелки получились азимуты их падения. Величина угла падения изображается длиной луча. Вертикальные углы падения соответствуют полной длине радиуса круга. Качественные отличия трещин (их генетический тип, ширина и т. д.)

показывают цветом луча, штриховкой и т. п. На рис. 3а пример лучевой диаграммы.

Точечная круговая диаграмма трещиноватости по содержанию и методике составления аналогична лучевой. В отличие от последней замеры трещин на точечной круговой диаграмме наносятся в виде точек, соответствующих азимуту и углу падения трещин (рис. 3б). Кроме трещин на круговые диаграммы целесообразно наносить особыми знаками элементы залегания пород, тектонических зон и т. п.

Статистический метод изучения трещиноватости сводится к массовым замерам элементов залегания трещин. Так же, как и в предыдущем методе, прежде чем производить замеры трещин на выбранной площадке, определяется ее геологическая позиция — к каким породам она приурочена, положение площадки по отношению к элементам рельефа, тектоническим структурам.

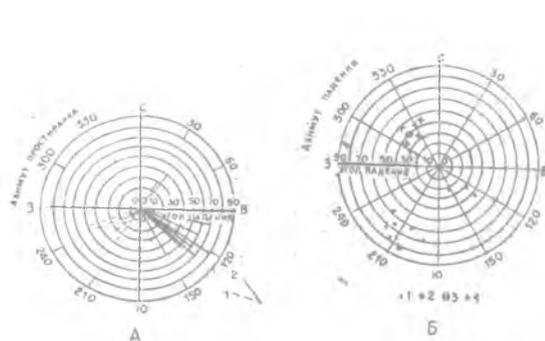


Рис. 3. Лучевая круговая (А) и точечная круговая (Б) диаграммы трещиноватости. Трещины: 1 — литогенетические, 2 — тектонические; элементы залегания: 3 — пород, 4 — зоны разлома (по Г. С. Золотареву, Э. В. Калинин, А. В. Минервину, 1970)

На выбранном участке замеряются все трещины подряд. Для получения достоверных данных достаточно замерить 100—150 максимум 200 трещин (Невский, 1979). Размер площадки должен быть такой, чтобы обеспечить необходимое количество замеров. Трещины должны располагаться в единой геолого-структурной позиции, что обеспечивает в дальнейшем возможность построения диаграмм трещиноватости, отражающих реальное положение вещей. Замер трещин на площадке с меняющейся ориентировкой элементов анизотропии в физико-механических свойствах горных пород (измени-

лись элементы залегания пластов, через площадку проходит разлом и т. п.) недопустим

Выявление систем трещин и определение их элементов залегания производится обычно при помощи круговых диаграмм в изолиниях. Для построения таких диаграмм используются различные стереографические сетки: Вульфа, Шмидта, Вульфа-Провинца, Сухоручкина (Золотарев, Калинин, Минервин, 1970; Невский, 1979; Molek, Reuter, 1979). Стереографические сетки представляют собой проекции полусферы с нанесенными на экваториальную или меридиональную плоскости параллелями и меридианами. Каждая трещина может быть изображена точкой, представляющей собой проекцию точки пересечения нормали к плоскости трещины или ее линии падения со сферой на плоскости.

В качестве примера рассмотрим построение круговой диаграммы в изолиниях по способу В. В. Сухоручкина. Она строится на полярной сетке, которая является проекцией на экваториальную плоскость широт и меридианов нижней полусферы и состоит из concentрических окружностей (проекций широт) и радиусов (проекций меридианов), проведенных через одинаковый угловой интервал (5—10°). При построении сетки вычерчивается окружность, в которой через определенное число градусов проводятся радиусы. Concentрические окружности описываются радиусами, равными расстояниям от точек пересечения радиусов с окружностью до вертикального или горизонтального диаметра (рис. 4).

Каждая трещина изображается точкой-проекцией на горизонтальную плоскость точки пересечения линии падения плоскости трещин с нижней полусферой. Для нанесения точек от верхнего конца вертикального диаметра (север) по часовой стрелке откладывают азимут падения трещины, а угол падения отсчитывают по кругам от периферии сетки к центру.

После того как все трещины будут нанесены на сетку, приступают к подсчету количества трещин, располагающихся в определенных угловых пространственных интервалах. Угловые расстояния между радиусами и кругами, ограничивающими площадки подсчета, зависят от заданной детальности выявления концентрации трещин. На сетке, у которой радиусы и круги проведены через 5°, можно пользоваться 15-градусной площадкой подсчета, на сетке с 10-градусными интервалами — 30-градусной площадкой и т. д.

Площадка подсчета объединяет девять элементарных 5- или 10-градусных площадок. Результаты подсчета количества трещин, расположенных в пределах всех девяти площадок, записываются в средней из них. Переменная площадка подсчета по окружности и по радиусам на величину интервала и

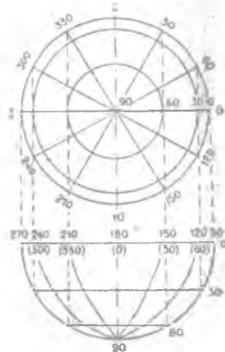


Рис. 4. Схема построения полярной сетки

Линейные коэффициенты трещиноватости горных пород

Коэффициент, его определение	Формула	Автор
1. Густота трещин (по Б. В. Боровскому и др.), линейная частота трещин (по Г. В. Чарушину), модуль трещиноватости (по А. И. Филину-Бекчурину)—отношение количества трещин, секущих нормаль, к их плоскостям, к единице длины-нормали	$\Gamma = \frac{\Delta n}{\Delta L}$ <p>где Γ — густота трещин, секущих нормаль к их плоскостям; ΔL — элемент длины этой нормали; Δn — количество трещин, секущих нормаль</p>	Г. В. Чарушин, 1967; Б. В. Боровский, М. А. Хордикайнен, Л. С. Язвин, 1968; А. И. Силин-Бекчурин, 1939
2. Удельная трещиноватость—среднее арифметическое количества трещин (на погонный метр обнажения) по соответствующим трем координатам (x, y, z)	$u = \frac{\Gamma_x + \Gamma_y + \Gamma_z}{3}$ <p>где u — удельная трещиноватость; Γ — густота трещин по осям x, y, z</p>	А. В. Корслев, 1951
3. Удельная густота (по Е. Н. Пермякову), линейная суммарная ширина трещин (по Г. В. Чарушину) — суммарная ширина трещин одного простирания на 1 пог. метре обнажения	$q = ut,$ <p>где q — удельная густота трещин; u — число трещин одного простирания на 1 п. м. метр разреза, причем берется среднее число их в типичном сечении протяженностью 10—20 м. и более; t — средняя ширина трещин</p>	Е. Н. Пермяков, 1949; Г. В. Чарушин, 1967
4. Линейная средняя ширина трещин—отношение суммы ширины трещин к общему количеству замеренных трещин	$\bar{u} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_n}{n}$ <p>где u_1, u_2, \dots, u_n — ширина отдельных трещин; n — общее количество замеренных трещин</p>	Г. В. Чарушин, 1967

каждый раз записывая результаты подсчета в средней элементарной ячейке, «обходят» всю сетку. В дальнейшем плотность точек выражают в процентах относительно общего количества замеров и проводят изолинии через выбранные интервалы. Пространство между отдельными изолиниями заштриховывается, более плотно в местах максимальной концентрации точек. На ориентированную диаграмму наносятся элементы залегания пород, направления разломов, количество нанесенных замеров и величина расстояния между изолиниями (рис. 5). Места сгущения плотности точек определяют системы трещин, а по максимумам сгущений определяются азимуты и углы падения соответствующих систем трещин.

Метод картирования трещин сводится к последовательному изучению трещиноватости всех коренных обна-

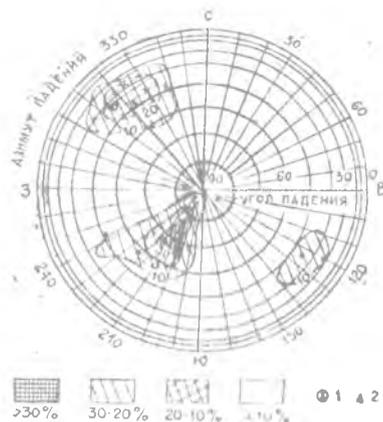


Рис. 5. Круговая диаграмма трещиноватости в изолиниях (по Г. С. Золотареву, Э. В. Калинин, А. В. Минервину, 1970). Нанесено 15 замеров. Изолинии проведены через 10 трещин; элементы залегания: 1 — пород, 2 — зоны разлома. На диаграмме видны две системы трещин: крутопадающие с простиранием 120° и углом падения $60-70^\circ$ и пологие северо-восточного простирания с углом падения $30-45^\circ$

жений в изучаемом районе. В обнажениях выделяются системы трещин, устанавливается генезис трещин каждой системы, определяются количественные показатели трещиноватости.

Для количественной оценки степени трещиноватости горных пород различными авторами предложен целый ряд коэффициентов, которые могут быть подразделены на 3 большие группы: 1) линейные, 2) площадные, 3) объемные (Чарушин, 1967).

В табл. 1—3 приводятся соответственно линейные, площадные и объемные показатели степени трещиноватости горных пород, наиболее часто используемые в отечественной и зарубежной практике.

Для определения степени трещиноватости карстующихся массивов целесообразней использовать 2 показателя: 1) объ-

Коэффициент, его определение	Формула	Автор
1. Площадная частота трещин — количество трещин на единицу площади обнажения	$q = \frac{n}{S}$ где n — количество трещин; S — площадь обнажения	Г. В. Чарушин, 1967
3. Площадная суммарная длина трещин (по Г. В. Чарушину) или поверхностная плотность трещиноватости (по Б. В. Боревскому и др.) — суммарная длина всех трещин, проходящих через элементарную площадку обнажения	$P = \frac{\Delta l}{\Delta S}$ где Δl — сумма длин всех трещин; ΔS — площадь элементарной площадки обнажения	Г. В. Чарушин, 1967; Б. В. Боревский, М. А. Хордикийнен, Л. С. Язвин, 1976
2. Коэффициент трещинной пустотности (по Л. И. Нейштадт), удельная трещинная проницаемость (по Е. Н. Пермякову), площадная суммарная раскрытость трещин (по Г. В. Чарушину), индекс разуплотненности по М. Матуле, Р. Хольцеру) — отношение (в процентах) общей площади трещин к площади изученной поверхности породы	$K_{тр} = \frac{S_{тр}}{S} \cdot 100\%$ где $S_{тр}$ — общая площадь трещин; S — площадь обнажения $S_{тр} = \sum_{i=1}^n L_i t_i$ где L_i — длина i -той трещины; t — ширина i -той трещины	Л. И. Нейштадт, 1957; Е. Н. Пермяков, 1949, 1953; Г. В. Чарушин, 1967; M. Matula, R. Holzer, 1979

Коэффициент, его определение	Формула	Автор
4. Площадная средняя раскрытость трещин — отношение суммы площадей трещин к их количеству	$P_p = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n}$ где P_1, P_2, \dots, P_n — площади трещин; n — общее количество замеренных трещин	Г. В. Чарушин, 1967
5. Площадная суммарная ширина трещин — отношение суммы ширины трещин к их количеству на единице площади обнажения	$\bar{U}_p = \frac{U_1 + U_2 + \dots + U_n}{n}$ где U_1, U_2, \dots, U_n — ширина трещин; n — общее количество замеренных трещин	Г. В. Чарушин, 1967
6. Площадная средняя длина трещин — отношение суммы длин всех трещин к их количеству на единице площади обнажения	$l_p = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{n}$ где l_1, l_2, \dots, l_n — длина трещин; n — общее количество замеренных трещин	Г. В. Чарушин, 1967

Объемные коэффициенты трещиноватости

Коэффициент, его определение	Формула	Автор
1. Объемная частота трещин — отношение количества трещин к единице объема породы	$q_V = \frac{q}{V},$ <p>где q — количество трещин; V — элементарный объем породы</p>	Г. В. Чарушин, 1967
2. Объемная суммарная площадь поверхности трещин (по Г. В. Чарушину) или объемная плотность трещиноватости (по Б. В. Боровскому и др.) — отношение суммы площадей поверхности трещин в элементарном объеме	$T = \frac{\Delta S}{\Delta V},$ <p>где ΔS — площадь поверхности всех трещин; ΔV — элементарный объем породы</p>	Г. В. Чарушин 1967; Б. В. Боровский, М. А. Хордикайнен, Л. С. Язвин, 1976
3. Объемная суммарная плотность трещин (по Г. В. Чарушину) или трещинная пустотность (по М. В. Рацу и др.) — отношение суммарного объема трещин к единице объема массива горных пород	$\Pi = \frac{\Delta V_{\text{тр}}}{\Delta V} = \sum_{i=0}^n \frac{\Delta a_i}{a_i + \Delta a_i},$ <p>где $\Delta V_{\text{тр}}$ — суммарный объем трещин; ΔV — объем породы; Δa_i — ширина трещин i-той системы; \bar{a}_i — среднее расстояние между трещинами i-той системы; n — число систем трещин, совместно развитых в данном объеме массива</p>	Г. В. Чарушин, 1967; М. В. Рац, С. Н. Чернышев, 1970

Продолжение таблицы 3

Коэффициент, его определение	Формула	Автор
4. Объемная средняя плотность трещин — отношение объема трещин к их количеству	$\bar{V} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{n},$ <p>где V_1, V_2, \dots, V_n — объем отдельных трещин; n — количество трещин</p>	Г. В. Чарушин, 1967
5. Блочность (по М. В. Рацу и др.), насыщенность горных пород трещинами (по В. А. Невскому) — линейный размер (длина) элементарного блока пород, ограниченного трещинами	$B = \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\left(1 + \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\bar{a}_4}}\right) \left(1 + \sqrt[3]{\frac{\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3}{\bar{a}_5}}\right)}},$ <p>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 — то же для систем более редких трещин, развитых совместно с тремя первыми</p>	М. В. Рац, С. Н. Чернышев, 1970; В. А. Невский, 1979
6. Индекс блочности — объем минимального блока пород, ограниченного трещинами	$I = \frac{\Gamma_1}{n_1} \cdot \frac{\Gamma_2}{n_2} \cdot \frac{\Gamma_3}{n_3},$ <p>где $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ — густота (линейная частота) трещин наиболее важных систем; n_1, n_2, n_3 — количество замеренных трещин в этих системах</p>	М. Matula, R. Holzer, 1979

Коэффициент, его определение	Формула	Автор
7. Коэффициент трещинной блочноватости — отношение объема среднего элементарного блока породы к объему 1 м ³	—	Г. С. Золотарев,
8. Показатель интенсивности трещиноватости — величина, обратная среднему размеру (в метрах) элементарного блока породы, ограниченного трещинами трех наиболее развитых систем	—	Э. В. Калинин, А. В. Минервин, 1970 М. П. Леонов, 1976

емную плотность трещиноватости или объемную суммарную площадь поверхности трещин. (Т) и 2) трещинную пустотность или объемную суммарную плотность трещин (П). Как известно, скорость карстовой денудации массивов растворимых горных пород непосредственно зависит от удельной поверхности пород, взаимодействующих с карстовыми водами. Коэффициенты Т и П позволяют непосредственно учитывать суммарную площадь поверхности взаимодействия растворимых пород с карстовыми водами.

По своему содержанию эти коэффициенты идентичны, так как, зная один из них, можно легко найти другой:

$$П = \sum_{i=0}^n T_i \bar{n}_i, \quad (1)$$

где T_i — объемная плотность трещиноватости i -той системы трещин;

n_i — средняя глубина трещин i -той системы;

n — число систем трещин, развитых в карстующемся массиве.

Достоинство коэффициентов Т и П заключается также и в том, что они легко могут быть выражены через другие показатели трещиноватости. Это существенно облегчает количественную оценку трещиноватости карстующегося массива; на отдельных участках которого уже проводилось изучение трещиноватости, так как различными исследователями для оценки степени трещиноватости пород часто используются разные коэффициенты трещиноватости. Отметим здесь лишь соотношения между Т, П и такими распространенными показателями, как густота трещин, поверхностная плотность трещиноватости, коэффициент трещинной пустотности (Б. В. Боровский и др., 1976; М. В. Рац, С. Н. Чернышов, 1970).

$$Т = \sum_{i=1}^n \Gamma_i; \quad (2)$$

$$Т = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\cos \theta_i}, \quad (3)$$

где Γ_i — густота трещин i -той системы;

P_i — поверхностная плотность трещиноватости i -той системы;

n — количество систем трещин;

θ_i — угол между плоскостью трещины системы i и плоскостью площадки, на которой измеряется величина P_i ;

$$P=1,5-2K_{тр},$$

(4)

где $K_{тр}$ — коэффициент трещинной пустотности.

После того, как трещиноватость всех обнажений или их элементов (в тех случаях, когда в пределах обнажения трещиноватость распределена неравномерно) оценена количественно, приступают к построению карт трещиноватости всей изучаемой территории.

К сожалению, методика построения таких карт разработана слабо. В большинстве случаев исследователи ограничиваются составлением карт изучаемого района, на которые наносятся все опробованные обнажения горных пород либо стенки выработок, где картировалась трещиноватость. Около обнажений приводятся подсчитанные коэффициенты трещиноватости, иногда розы трещиноватости или другие диаграммы. По сути дела это качественный подход к разрешению проблемы.

Нам известно лишь несколько примеров построения оригинальных карт трещиноватости. Так, во ВНИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела разработана методика построения карт интенсивности трещиноватости в изолиниях (Леонов, 1976). Однако показатель интенсивности трещиноватости, представляющий собой величину, обратную среднему размеру элементарного блока пород, неприемлем для оценки трещиноватости карстующихся массивов, так как он не несет необходимой информации. Этим показателем не учитываются ни удельная поверхность взаимодействия пород с карстовыми водами, ни ширина трещин, определяющая фильтрационную способность массива и т. д.

Наибольший интерес представляют исследования М. В. Раца и С. Н. Чернышова, положившие начало разработке нового количественного подхода к изучению трещиноватости и ее влияния на инженерно-геологические, гидрогеологические свойства скальных массивов. Наиболее подробно результаты исследований изложены в монографии М. В. Раца и С. Н. Чернышова (1970), в «Рекомендации по изучению трещиноватости горных пород при инженерных изысканиях для строительства» (1974).

Сущность методики сводится к следующему. В естественных обнажениях горных пород либо в искусственных горных выработках на выбранных интервалах исследований по «методу ломаной линии» (Жоличко, 1977) фиксируют все трещины, независимо от их генезиса. Учитываются азимут и угол падения, раскрытие, длина трещин, а также характер их стенок и тип заполнителя.

Камеральная обработка полученной информации достаточно трудоемка и нуждается в автоматизации. Процедура выделения систем трещин, как основа автоматической обработки данных, в известной степени моделирует построение и анализ структурных диаграмм трещиноватости, которые обычно делаются вручную. Решение задачи возможно при использовании статистических критериев классификации наблюдений, а также полуэмпирических моментов, заменяющих визуальный анализ диаграммы.

Предлагаемая М. В. Рацем, С. Н. Чернышовым и другими авторами система автоматической обработки данных (АСОД) по трещиноватости является первой такой системой в мировой практике. На вход поступают результаты массовых полевых измерений трещиноватости. На выходе — данные о числе и ориентировке систем трещин, объемной трещинной пустотности и блочности массива, а также оценка его деформируемости и водопроницаемости (Рац, Иванова, Русин, Слепцов, 1979).

При инженерно-геологическом изучении закарстованных территорий (особенно в районах закрытого карста) основной задачей является картирование рельефа кровли карстующегося массива. Для ее решения описанная методика неприемлема из-за ряда причин. Во-первых, формы карстового мезорельефа (воронки, шахты, пещеры и т. д.) приурочены к узлам перечисления отдельных трещин и не могут быть выявлены с помощью АСОД трещиноватости, в результате которой выделяются лишь системы трещин. Во-вторых, в процессе обработки данных не учитывается генезис трещин. При поинтервальном опробовании фиксируется больше литогенетических трещин и трещин выветривания, так как степень их густоты значительно выше, чем тектонических. Трещины выветривания при статистической обработке большей частью отбраковываются, но остаются еще литогенетические трещины. Поэтому на выходе отражается преимущественно распределение литогенетических трещин в массиве. Тектоническая же трещиноватость, играющая ведущую роль в формировании карста, лишь накладывается на литогенетическую. В-третьих, АСОД не предусматривает получения схемы распределения трещин в скальном массиве либо схемы изолиний значений коэффициентов трещинной блочности и пустотности, на основе которых возможно построение прогнозных карт рельефа кровли карстующегося массива в областях закрытого карста. В-четвертых, АСОД очень трудоемка: требуются для ее производства высококвалифицированные специалисты (как геологи, так и математики).

3. Методы изучения трещиноватости вне открытых поверхностей горных пород.

Эта группа подразделяется на две большие подгруппы: 1) прямые и 2) косвенные методы изучения трещиноватости горных пород (Lokin, Evgenovic, 1977).

Прямые методы подразделяются, в свою очередь, на методы исследования трещиноватости 1) в стенках скважин и 2) по керну буровых скважин.

Трещиноватость в стенках скважин может изучаться путем: а) визуальных наблюдений и б) анализа фотографических снимков. Для визуального осмотра стенок скважин используются различные приборы, преимущественно телевизионные камеры, перископы и бароскопы. В СССР для этих целей чаще всего применяются телевизионная аппаратура ФТЦИ (Ленинградский электротехнический институт) и скважинный перископ типа РВП диаметром от 30 до 400 мм. За рубежом используются камеры производства ФРГ «Истмен Р. В. 400», французские камеры Комиссариата по атомной энергии Франции, польское оборудование ТРК-16 и т. д. (Lokin, Evgenovic, 1977).

В последние годы все шире используются скважинные перископы, преимущество которых перед телевизионными камерами заключается в том, что они ориентируются непосредственно с поверхности грунта. Кроме того, они гораздо подвижней, проще в обращении, дешевле, чем телевизионное оборудование. Недостатком скважинных перископов является невозможность их использования на больших (более 30 м) глубинах и в скважинах, заполненных водой.

Для фотографирования стенок скважин применяются фотоаппараты и кинокамеры американского, французского, канадского производства. В СССР для этих целей используются аппараты ФБ-220, «Фотос», «ФБЦ», «Фотос-2», ФАЦ-1 и др. В Ленгидропроекте и Ленинградском институте связи создано оборудование, в котором помимо телевизионной камеры ФТЦИ используется и фотоаппарат УТ-1.

В последние годы рядом западных фирм изготовлены геофизические приборы, позволяющие определять элементы залегания трещин и их ширину, например, «Бердуэлл Сейсьювер», выпускаемый фирмой «Сейсмограф Сервис» (Оклахома, США) содержит вращающийся акустический излучатель. Отраженную от стенки скважины волну принимает детектор и передает совместно с обозначением севера, который выдает встроенный магнитометр, на фотографическое устройство. Поврежденные части массива отражаются хуже: трещины на фотографиях фиксируются в виде темных полос (Hansagi, 1974).

В целом необходимо отметить: несмотря на то, что с помощью теле-, фотоаппаратуры, перископов и геофизических приборов непосредственно в полевых условиях можно изучать все основные параметры трещиноватости (элементы залегания, ширину трещин), эти методы исследования трещиноватости пока не получили широкого распространения.

Изучение трещиноватости по керну буровых скважин. В подавляющем большинстве случаев в процессе бурения керн скважин не ориентируется в пространстве, так что, анализируя полученные материалы, можно сделать заключение только о степени трещиноватости горных пород в различных участках массива. Для количественной оценки степени трещиноватости пород по керну скважин предложен целый ряд показателей. Наиболее широко используемые приведены в табл. 4.

Лучше всего использовать показатель удельной раздробленности пород. Он может определяться непосредственно в полевых условиях, а успешное использование его для определения степени трещиноватости пород в различных геологических условиях (Пирогов, Ярцев, 1971; Анапольская, Ржевская, 1979; Сало, 1980) является доказательством его высокой эффективности. Кроме того, этот показатель легко коррелируется с густотой (модулем, линейной частотой) трещиноватости, что особенно важно при сопоставлении результатов изучения трещиноватости в обнажениях и по керну скважин.

Так, И. А. Пирогов и Н. А. Ярцев для двух участков (створ плотин Красноярской и Саянской ГЭС) вычислили средние значения модуля трещиноватости, измеренного вдоль разведочных шахт, сравнили их со средними значениями удельной раздробленности по керну разведочных скважин, пробуренных в непосредственной близости от шахты.

На графиках (рис. 6) отражена линейная зависимость модуля трещиноватости и удельной раздробленности керна. Величины удельной раздробленности больше, чем величины модуля трещиноватости. Это объясняется тем, что при определении модуля трещиноватости нельзя заметить все трещины, а при бурении по многим

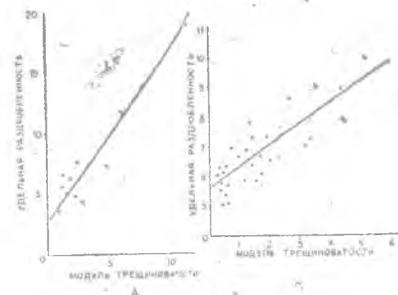


Рис. 6. Соотношение между удельной раздробленностью керна и модулем трещиноватости горной породы: А — для гранитов в створе плотины Красноярской ГЭС, Б — для сланцев в створе Саянской ГЭС (по И. А. Пирогову, Н. А. Ярцеву, 1972)

Показатели степени трещиноватости горных пород, определяемые по керну буровых скважин

Показатель, его определение	Формула	Автор
1. Процент выхода керна — отношение в процентах длины керна в пробуренном интервале к длине интервала	$K = \frac{L_k}{L},$	Кригер, 1951
2. Удельная раздробленность керна (по И. А. Пирогову, Н. А. Ярцеву) или степень трещиноватости керна (по Н. В. Анапольской, С. И. Ржевской) — среднее число кусков керна на 1 пог. метр скважины	—	Н. В. Анапольская, С. И. Ржевская, 1979
3. Показатель качества породы (rock quality designation) — процентная доля длины скважины, которая составляется из неповрежденных интервалов керна, длина которых превышает некоторое пороговое значение (обычно 0,1 м)	$RQD = \frac{L_p}{L_T} \cdot 100\%,$	S. D. Priest, J. A. Hadson, 1976; D. U. Deere, 1969
	где L_p — суммарная длина кусков керна более 0,1 м; L_T — длина пробуренного интервала, по С. Присту, Д. Хадсону	
	$RQD = 100^{-\lambda t} (\lambda t + 1),$	
	где λ — среднее количество нарушений сплошности керна, приходящихся на погонный метр;	

Продолжение таблицы 4.

Показатель, его определение	Формула	Автор
4. Показатель керна („Кируна фактор“)	$C = \frac{1}{2S} \left(pN + \frac{K}{n} \right),$	T. Hansagi, 1974
	где C — „Кируна фактор“; S — длина интервала бурения; p — число кусков в данном интервале; N — длина исследуемых образцов; K — общее число кусков керна; n — общее число кусков, более длинных, чем диаметр скважины	

из них происходит растрескивание керна. Применение RQD не всегда целесообразно (Lokin, Evremovic, 1977). Например, при определении RQD подсчитывается обычно суммарная длина кусков керна, каждый из которых длиннее 10 см.

Возможен случай, когда керн состоит полностью из кусков до 9 см ($RQD = 0\%$), тогда как в соседнем интервале глубин керн может состоять из кусков длиной 11 см, что будет соответствовать максимальной величине $RQD = 100\%$.

В последние годы предприняты попытки статистической обработки результатов изучения трещиноватости по этой методике (Kalhawy, 1978; Goodman, Smith, 1980).

Изменение степени трещиноватости скального массива в пространстве можно анализировать с помощью специальных карт в изолиниях. Строятся они следующим образом. На карте фактического материала указываются скважины, для которых были определены соответствующие показатели степени трещиноватости горных пород (процент выхода, удельная раздробленность керна и т. д.). Точки с одинаковыми значениями показателей соединяются изолиниями.

В качестве примера приводится карта трещиноватости Амбарнинского месторождения известняков (рис. 7). Исходным материалом для нее послужили результаты определения удельной раздробленности керна, извлеченного из разведочных скважин. На карте выделены 4 типа зон: 1) весьма трещиноватые, где удельная раздробленность керна составляет 50 1/м (50 кусков керна на 1 пог. метр скважины); 2) сильно трещиноватые — 20—50 1/м; 3) трещиноватые — 10—20 1/м; 4) слабо трещиноватые — менее 10 1/м (Анапольская, Ржевская, 1977).

Трещиноватость горных пород существенным образом изменяется с глубиной. В силу различных причин (неоднородность литологического состава пород, слагающих массив,

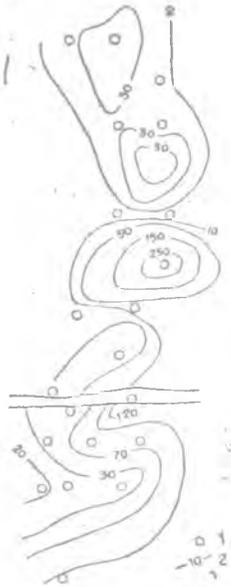


Рис. 7. Карта трещиноватости Амбарнинского месторождения известняков (по Н. В. Анапольской, С. И. Ржевской, 1977). Изолинии построены по показателям удельной раздробленности керна буровых скважин: 1 — скважины, 2 — изолинии степени трещиноватости

сложная история тектонического развития территории и т. д.) в вертикальном разрезе многих участков наблюдаются ярусы, различающиеся степенью трещиноватости пород. В таких случаях целесообразно поинтервальное определение показателей трещиноватости по керну скважин. Для каждого выделенного интервала глубин строится карта трещиноватости в изолиниях. Анализ всех полученных карт позволит получить целостное представление о трещиноватости массива горных пород.

В большинстве случаев интервалы глубин определяются приближенно, аналитически, без использования каких-либо достоверных критериев. Для преодоления этих трудностей П. Локином и М. Лабаном (Lokin, Laban, 1978) разработана методика объективного определения границ зон однородной трещиноватости.

В основу выделения зон с различной степенью трещиноватости пород положен следующий принцип: в пределах каждой зоны максимальная разница длины отдельных кусков керна должна быть меньше какого-то порогового значения λ . Таким образом, λ является критерием однородности породы по степени трещиноватости внутри зоны. Значение λ выбирается в зависимости от характеристик породы и точности исследований.

Данные о длинах кусков керна обрабатываются в таблицах с шахматным распределением полей (рис. 8). Способ зонирования следующий:

10	16	2	10	1	28	23	19	24	28	19	16	8	1	12
6	14	8	9	27	5	4	5	4	9	3	8	7	11	
				1									1	
			1	9							15	7		
						19					16			
					9	4	5	9	12	3				
13			4,3				24,4			17,5		4,5		12

Рис. 8. Пример таблицы для выделения зон однородной трещиноватости (по П. Локину, Д. Евремовичу)

— в первом ряду таблицы на белых полях записываются длины каждого отдельного куска керна;

— во втором ряду записываются абсолютные разницы длин каждых двух соседних кусков керна; в тех колонках, где абсолютная разница соседних кусков больше или равна величине λ , проводится вертикальная разграничительная линия;

— в третьем ряду указывается минимальная длина кусков керна в каждой зоне между двумя разграничительными линиями;

— в четвертом ряду указывается разница длины между самым коротким куском и другими кусками в зоне. Если будет определена разница, большая или равная λ , вычерчивается вертикальная разграничительная линия. Работа продолжается до тех пор, пока не будут выделены зоны, внутри которых максимальная разница между длинами кусков будет меньше величины λ .

П. Локином и М. Лабаном разработана программа выделения однородных зон для ЭВМ IBM-1130, что позволяет получить готовые диаграммы трещиноватости для любого значения λ , диаграммы погрешностей для соответствующих значений λ и цифровые данные о границах однородных зон, средней длине кусков керна внутри их.

Данные об элементах залегания трещин и их ширине можно получить лишь на основе изучения ориентированного керна скважин. В СССР разработаны и применяются два прибора для ориентировки керна (Нейштадт, Пирогов, 1969): керноскоп К-5 и кернометр КР-2. За рубежом для этих целей наиболее часто используют устройство «Крелиус» фирмы «Атлас Копко» и прибор фирмы «Истмен» (Lokin, Evreovic, 1977).

Следует отметить, что керноскопы могут быть применены для получения ориентированного керна только в слаботрещиноватых породах. В сильнотрещиноватых породах ориентируется лишь верхний обломок керна, поднимаемый буровым снарядом, поэтому использование керноскопов не получило широкого распространения.

Оригинальный метод извлечения ориентированного непрерывного керна разработан в Национальной лаборатории по механике горных пород в Лиссабоне (Rocha, Barrosos, 1970). Способ состоит в том, что вначале пробуривают скважину небольшого диаметра, в которую вводят обсадную трубу. Трубу ориентируют и затрубное пространство цементируют. После затвердевания цемента тот же самый интервал разбуривают большим диаметром, а выбуренный керн извлекают вместе с обсадной трубой. После этого возможно самое де-

тальное изучение трещиноватости. Учитывая сложность способа, на практике его можно применять для изучения трещиноватости на глубине до 100 м.

Подобный метод применяется в Английском национальном объединении угля (Ноек, Брау, 1974). Специальное устройство, заполненное полиэфирной смолой, опускают на дно скважины малого диаметра. Смола заполняет скважину, причем в смоле плавает компас. После затвердевания смолы бурится скважина большего диаметра и извлекается керн, скрепленный смолой. Таким образом был успешно извлечен ориентированный керн с глубины 125 м.

Е. Браун и другие (Brown, Harper, Hinds, 1979) пишут об успешном использовании в практике зонда для получения отпечатка стенок скважины. Зонд снабжен специальным пакером, который автоматически на заданной глубине прижимает оболочку из легкодеформируемой термопластиковой пленки к стенкам скважины. Оболочка также автоматически ориентируется относительно сторон света. Снятая развертка — слепок стенок скважины — дает возможность судить об ориентировке трещин и их удельной густоте.

Методы косвенного изучения трещиноватости горных пород предполагают измерение в скважинах различных физических характеристик горных пород, на основании которых возможна качественная оценка трещиноватости. Количественная оценка параметров трещиноватости в большинстве случаев невозможна, так как на результаты измерения тех или иных характеристик пород могут воздействовать многие факторы (анизотропия физико-механических свойств породы, неодинаковые условия проведения эксперимента и т. д.), в число которых входит и трещиноватость массива. Степень влияния различных факторов на результаты измерений трудно дифференцировать. Поэтому необходимо горную породу исследовать комплексно с целью изучения каждого из факторов, влияющих на измеряемую характеристику, для того чтобы правильной оценить влияние на нее степени трещиноватости.

Определение трещиноватости по фильтрационным характеристикам. Попытки установить связь между фильтрационными характеристиками, получаемыми в результате откачек, наливов, нагнетаний, и степенью трещиноватости горных пород предпринимались многими исследователями. Например, трещинную пустотность и блочность пород можно приблизительно оценивать по коэффициенту фильтрации (табл. 5).

Таблица

Взаимосвязь коэффициента фильтрации и параметров трещиноватости горных пород (по М. В. Рацу, С. Н. Чернышеву, 1970)

Трещинная пустотность, %	Коэффициенты фильтрации (K_f) при густоте сети (блочности), см			
	очень редкая	редкая	густая	очень густая
	300—100 K_f , м/сут	100—30 K_f , м/сут	30—10 K_f , м/сут	10—3 K_f , м/сут
Малая: 0,1—0,3	10^{-1}	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
Средняя: 0,3—1,0	$5 \cdot 10^0$	10^0	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}
Высокая: 1,0—3,1	10^2	10^1	$5 \cdot 10^0$	10^{-1}
Аномально высокая: 3,0—10,0	Возможно возникновение турбулентного течения в трещинах	$5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^1$	10^1

Ч. Луис (1967) приводит для коэффициента фильтрации (K) горной породы с одним рядом трещин с гладкими стенками следующее выражение (Ноек, Брау, 1974):

$$K = \frac{g l^3}{12 \nu B} \quad (5)$$

где g — ускорение силы тяжести (981 см/с^2);

l — раскрытие трещины, см;

B — расстояние между соседними трещинами, см;

ν — коэффициент вязкости (для чистой воды при температуре 20°C он составляет $0,0101 \text{ см}^2/\text{с}$).

Нэк и Брау (Ноек, Брау, 1974) представили выражение (5) в виде графика зависимости раскрытия трещин и расстояния между ними от коэффициента фильтрации в направлении, параллельном трещинам (рис. 9).

Подобное соотношение вывел Вегхем (1963) исследованием течения инъекционных растворов (Lokin, Evgenovic, 1977):

$$\sigma = \sqrt{\frac{2K}{N[\gamma_w]}} \quad (6)$$

где σ — ширина трещин,

N — число трещин,

K — коэффициент фильтрации,

$[\gamma_w]$ — удельная масса воды для инъекционного раствора.

32

Следует отметить, что все вышеприведенные методы определения трещиноватости на основании фильтрационных характеристик не учитывают возможности заполнения трещин тем или иным материалом. Это существенный недостаток, особенно при исследовании приповерхностных частей скальных массивов, где трещины почти всегда в той или иной степени заполнены продуктами гипергенных преобразований пород.

Оценка трещиноватости на основании определения воздухопроницаемости пород. Этот метод разработан в Ленгидропроекте. В принципе ничем не отличается от методов определения трещиноватости по результатам откачек, наливов, нагнетаний. А. А. Сорокин (1978) в качестве меры степени трещиноватости пород принимает скорость падения давления сжатого воздуха. Воздух под давлением подается в участок скважины, обычно длиной 0,5 м, в течение 1 мин.

$$V = \frac{P_0 - P_t}{t l} \quad (7)$$

где V — удельная воздухопроницаемость, ат/мин/м;

P_0 — начальное давление воздуха в баллоне, ат (обычно 3 ат);

P_t — давление воздуха после времени t ;

t — продолжительность опыта, мин (обычно 1 мин);

l — длина участка скважины, в котором проводятся испытания, м (обычно 0,5 м).

Недостатки этого способа заключаются в том, что его нельзя применять ни в среде, насыщенной водой, ни в породе с высокой степенью трещиноватости, в частности, при наличии широких трещин. Кроме того, испытания проводятся в горных породах до относительно небольших глубин (4,6 м).

Оценка трещиноватости на основании измерения скорости распространения продольных упругих волн. Скорость распространения продольных упругих волн различна при прохождении через монолитные и трещиноватые горные породы. Исходя из этого, К. Ту-

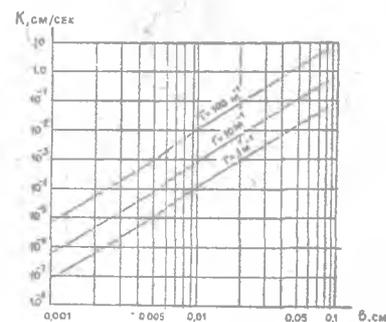


Рис. 9. Влияние ширины трещин (B , см) и расстояния между ними, выражаемого через густоту трещиноватости (Γ , м^{-1}) на коэффициент фильтрации (K , см/с) в направлении протирания ряда трещин с гладкими стенками (Ноек, Брау, 1974)

ренк и другие (Toungeng, Formaintraux, Denis, 1971) предлагают определять показатель качества породы по формуле:

$$RQD = \frac{V_l}{V_{lc}}, \quad (8)$$

где V_l — скорость упругих волн, полученная в полевых условиях;

V_{lc} — скорость упругих волн, полученная расчетным путем для монолитной породы.

В. В. Ржевский, В. С. Ямщик (1973) установили следующую зависимость:

$$N = \frac{(1-m)^2}{\frac{1}{m} - P} C_1^2 \sum_{i=1}^3 \frac{1}{(c_i)^2} - 3m, \quad (9)$$

где N — объемный коэффициент трещиноватости;

C_1 — скорость продольных упругих волн в монолитных участках массива;

C_i — скорость продольных упругих волн в трех взаимно перпендикулярных направлениях;

m — соотношение упругости трещиноватых и монолитных частей массива;

P — соотношение плотности трещиноватых и монолитных частей массива.

Недостатки этих способов состоят в том, что они не учитывают такие факторы, как наличие или отсутствие подземных вод в массиве, степень заполнения трещин и другие, существенно влияющие на точность определения степени трещиноватости.

В заключение необходимо отметить, что при детальном изучении трещиноватости необходимо использовать комплекс методов, которые должны применяться в определенной последовательности и взаимно дополнять друг друга. Исследования целесообразно начинать с дистанционного обследования территории, в результате которого картируются линеаменты, разломы, наиболее крупные тектонические трещины, выясняется связь трещиноватости с тектоническими структурами; выделяются опорные участки, на которых будет детально изучаться трещиноватость.

Затем производится наземное исследование трещиноватости в естественных обнажениях и искусственных горных выработках. Рекогносцировочные маршруты, в ходе которых производится беглое изучение трещиноватости на отдельных обнажениях, позволяют уточнить местоположение намеченных ранее опорных участков, нанести их на карту. При помощи статистических методов устанавливаются системы тре-

щиноватости, развитые в районе, определяют элементы залегания, другие параметры каждой системы трещиноватости, ее генезис.

Основной этап изучения трещиноватости — картирование трещин на опорных участках: строятся карты трещиноватости, позволяющие количественно оценить степень трещиноватости пород в любой точке изучаемой территории. В закарстованных районах особенностями пространственного размещения трещин в массиве (особенно тектонических) определяется местоположение, ориентировка и размеры как поверхностных, так и подземных карстовых форм. Следовательно, анализируя карты трещиноватости, можно не только правильно наметить размещение сети разведочных выработок, но и составить прогнозную карту рельефа кровли карстующихся пород, оконтурить наиболее благоприятные для развития карста участки.

Изучение трещиноватости в ходе проведения буровых работ (анализ результатов бурения, керн скважин, опытно-фильтрационные, геофизические исследования и т. д.) позволяет уточнить уже имеющиеся сведения, выяснить, как изменится трещиноватость с глубиной, выявить интервалы глубин, на которых породы наиболее сильно трещиноваты. Опыт изысканий в закарстованных районах показывает, что именно к таким интервалам часто приурочены ярусы подземных карстовых полостей. Построив карты изолиний значений удельной раздробленности керна для выделенных интервалов, окончательно локализуем положение в массиве участков повышенной трещиноватости, к которым могут быть приурочены карстовые полости.

Анализ литературы показывает, что наиболее слабым звеном в изучении трещиноватости является составление карт трещиноватости и, особенно, интерпретация полученных данных. В связи с этим на кафедре инженерной геологии Пермского университета была разработана методика полевого изучения тектонической трещиноватости, позволяющая в кратчайшие сроки и без привлечения большого количества исполнителей строить карты трещиноватости. Методика предусматривает также построение прогнозных карт рельефа кровли карстующегося массива, что особенно важно для решения ряда практических задач при изысканиях в районах закрытого карста.

Необходимость изучения прежде всего тектонической трещиноватости обуславливается тем, что, во-первых, в отличие от трещин других генетических типов тектонические характеризуются выдержанностью как по простиранию, так и по падению слоев, развиваются по одному плану в породах раз-

личного литологического состава, обуславливая отвод карстовых вод с поверхности в глубь массивов, их глубинную циркуляцию, карстование не только на поверхности, но и в глубине массивов, подземный вынос выщелоченных веществ.

Во-вторых, литогенетическими трещинами и трещинами выветривания карстующийся массив разбивается относительно равномерно. Поэтому условия растворения карстующихся пород в пределах всей территории будут приблизительно одинаковыми (если, конечно, на них не оказывают влияние другие факторы карстообразования). Следовательно, литогенетическую трещиноватость и трещиноватость выветривания нельзя признать фактором, определяющим местоположение и ориентировку карстовых форм (исключение составляют карры, небольшие воронки, полости).

Тектонические трещины разбивают карстующийся массив, как правило, неравномерно. В пределах тектонических структур достаточно четко прослеживаются закономерно ориентированные участки, зоны, характеризующиеся той или иной густотой тектонических трещин. Поскольку скорость карстовой денудации непосредственно зависит от удельной площади соприкосновения растворимой породы с природными водами, то неодинаковая плотность тектонической трещиноватости соседних зон может стать основной причиной образования карстовых форм.

§ 1.2. Методика изучения тектонической трещиноватости в полевых условиях

Полевое изучение тектонической трещиноватости целесообразно проводить в два этапа: 1) предварительные исследования и 2) картирование трещин.

1. Предварительные исследования.

Основная задача таких исследований — выбор участков для картирования тектонической трещиноватости. С этой целью прежде всего изучаются опубликованная и фондовая литература по геологии района изысканий, материалы аэрофотосъемок. Особое внимание уделяется тектоническому строению района, так как именно оно определяет основные закономерности пространственного размещения трещин в карстующемся массиве.

Важно установить, к какой структуре относится территория. В тех случаях, когда район находится на стыке соседних структур, необходимо его разделить на участки, каждый из которых целиком приурочен к какой-нибудь одной структуре. В дальнейшем исследуется каждый участок в отдельности. Аналогичным образом поступают и в отношении территорий, через которые проходят тектонические разломы.

Как известно, тектонические трещины (имеются в виду макротрещины) простираются на значительные расстояния. Они выклиниваются лишь вблизи разрывных нарушений более высокого порядка (разломы), ориентированных под углом к тектоническим трещинам данного простираения.

Следовательно, замерив тектоническую трещину в обнажении, мы можем перенести ее на карту в виде луча, выходящего из точки наблюдения в направлении, соответствующем ее простираению. Длина луча будет определяться расстоянием от точки наблюдения до ближайшего разлома либо до границы соседней тектонической структуры.

В областях закрытого карста, к которым относится большая часть карстовых районов СССР, протяженные обнажения растворимых пород редко встречаются в непосредственной близости от участков строительства тех или иных объектов. Между тем в практических целях особенно важно получить карты тектонической трещиноватости именно этих участков. Поэтому так необходимо тщательное выделение территорий, однородных в структурно-тектоническом отношении, в пределах которых тектонические трещины простираются вплоть до границы территории.

Затем производится маршрутное обследование каждого выделенного участка, в ходе которого фиксируются все обнажения растворимых пород. При описании обнажения

- 1) дается подробное описание его местоположения;
- 2) указывается номер обнажения с нанесением его на карту;
- 3) отмечается ориентировка обнажения в целом и описываемых стенок в отдельности по горному компасу (с отметкой об учете магнитного склонения);
- 4) приводится литолого-стратиграфическое описание разреза с указанием мощности отдельных слоев и выделением слоев, в которых производятся замеры трещиноватости;
- 5) определяются условия залегания слоев (с отметкой об учете магнитного склонения);
- 6) делаются фотоснимки или зарисовки характерных участков обнажения.

В выделяемых слоях пород производятся замеры тектонической трещиноватости (достаточно измерить 15-20 трещин).

После того как все обнажения нанесены на карту и для каждого из них построены розы тектонической трещиноватости, определяют те обнажения, в которых необходимо детальное картирование трещин (рис. 10). В данном случае для построения объективной карты трещиноватости достаточно будет закартировать все тектонические трещины в обнажениях 2, 4, 5.

2. Детальное картирование тектонических трещин.

Закljučается в последовательном картировании всех тектонических трещин, разбивающих обнажение растворимых пород. Отличить в обнажении тектонические трещины от трещин другого генезиса достаточно просто, зная главные особенности тектонической трещиноватости:

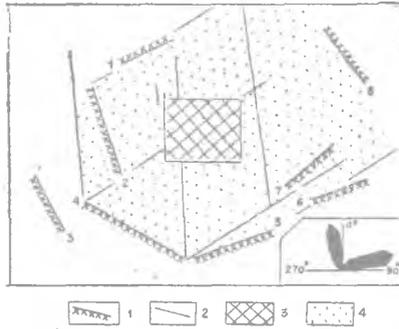


Рис. 10. К выбору обнажений, в которых необходимо детальное картирование тектонической трещиноватости: 1 — обнажения и их номер; 2 — простирание тектонических трещин, зафиксированных на окончаниях обнажений; 3 — участок, для которого необходимо построение карты трещиноватости; 4 — район, для которого может быть построена объективная карта трещиноватости в случае если трещины будут замерены в обнажениях 2, 4, 5

Порядок картирования следующий: определяется расстояние от начала обнажения до первой трещины. Производятся замеры элементов залегания, ширины трещины и т. п. Затем находится расстояние до следующей трещины, фиксируются все ее параметры и т. д. Результаты замеров заносятся в специальный журнал (табл. 6). Желательно картировать трещины на одном уровне.

В зависимости от требуемой точности при картировании трещиноватости применяют фототеодолитную, теодолитную либо глазомерную съемку. Для проведения наиболее общедоступной глазомерной съемки достаточно трех человек (один геолог и два рабочих). Геолог фиксирует в обнажении трещины и одной рукой с помощью горного компаса производит необходимые замеры. В другой руке геолога находится конец мерной ленты, второй конец ленты — в руках у рабочего. Второй рабочий записывает в журнал все необходимые сведения. Работы, проведенные кафедрой инженерной геологии Пермского университета, показывают, что бригада из

1. Общая выдержанность ориентировки по одному или нескольким направлениям.

2. Захват трещинами не отдельных слоев и горизонтов, а целых серий разнообразных по своему составу пород, при весьма значительном протяжении и глубине трещин.

3. В отличие от свежих трещин выветривания, взрывных и других для тектонических характерно наличие загара, отложений кальцита, гипса, глины на стенках. (Пермяков, 1949).

Таблица 6

Полевой журнал для картирования тектонической трещиноватости

Номер обнажения	Номер трещины	Элементы залегания			Ширина на трещине, мм	Расстояние до соседней трещины, м	Заполнение трещин	Примечание (характер поверхности трещины, извилистость и т. д.)
		азимут простирания, град.	поправка на отклонение от вертикали *	угол падения, град. *				
1	Начало обнажения							
	1	70	+	10	4	Открытая	Стенки гладкие	
	2	160	—	—	8	Заполнена кальцитом	То же	
	3	155	—	—	7	То же	То же	

Примечание. Графы, помеченные (*), заполняются лишь в том случае, если наблюдается существенное отклонение трещины от вертикали (объяснение в тексте).

трех человек может зарисовать от 2 до 3 пог. километров за день. Угол падения трещины отмечается лишь в том случае, если он значительно отклоняется от вертикального.

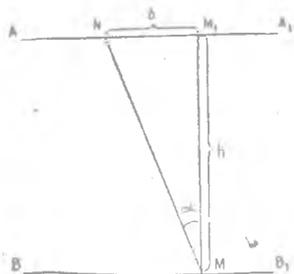


Рис. 11. К расчету минимального допустимого угла отклонения трещин от вертикали (α). AA_1 — линия кровли исследуемого пласта в обнажении; BB_1 — уровень, на котором производятся замеры трещин; M — точка, в которой была зафиксирована трещина; M_1 — проекция точки M на линию кровли пласта; N — положение выхода трещины на линии кровли пласта; α — угол отклонения трещины от вертикали

Минимальный угол отклонения от вертикали, который необходимо учитывать при дальнейших построениях, определяется следующим образом. Замеряется расстояние от кровли исследуемого слоя до уровня, на котором производится картирование трещин. Находится средний угол отклонения трещин от вертикали. Расстояние от проекции точки замера на линию кровли пласта до середины трещины (рис. 11) определяется по формуле

$$B = h \operatorname{tg} \alpha, \quad (10)$$

где h — расстояние на поверхности от кровли исследуемого слоя до уровня, на котором измеряются трещины, м; α — угол отклонения трещины от вертикали, град.

В том случае, когда $B > 1$ м (допустимая точность нанесения трещины на карту трещиноватости), при картировании трещин необходимо учитывать их азимут и угол падения. Поправка на отклонение от вертикали берется с плюсом (знак + в полевом журнале), если при построении карты трещиноватости точку, обозначающую выход трещины в обнажении, надо будет сместить на расстояние B по ходу замеров трещиноватости. В том случае, когда точку необходимо сместить на расстояние B против хода замеров, берется отрицательная поправка (знак — в полевом журнале).

§ 1.3. Камеральная обработка результатов полевого изучения тектонической трещиноватости

Построение карт трещиноватости может производиться либо вручную, либо автоматически с помощью ЭВМ.

1. Построение карт трещиноватости вручную.

По результатам картирования трещин в полевых условиях строится схема тектонической трещиноватости карстуемого массива. Она представляет собой крупномасштабную

кату (план) территории с нанесенными на нее тектоническими трещинами, выходящими из выбранных обнажений в интересующем нас направлении. Построения производятся в масштабе карты. Вся территория, занимаемая изучаемым районом на карте, разбивается равномерно на квадраты, площадь которых выбирается в соответствии с размерами района, густотой трещиноватости, требуемой точностью вычислений.

Наши исследования показывают, что целесообразней всего разбивать участки на квадраты площадью 1 га, либо 1000 м², что обеспечивает достаточную точность и вместе с тем простоту последующих вычислений. В том случае, когда все трещины невозможно нанести на карту в выбранном масштабе (большая густота трещин, мелкий масштаб карты), производится их систематизация. Близко расположенные трещины приблизительно одинакового простирания группируются в зоны трещиноватости, центральные части которых в виде луча соответствующего направления наносятся на карту. У основания луча указывается количество трещин, объединенных в зону.

Ширину зон следует ограничивать десятью метрами. Зоны с такой шириной можно нанести на карту в масштабе 1:5000. Более мелкий масштаб карты трещиноватости неприемлем, так как в этом случае нельзя производить последующие вычисления. Допустимая величина разброса азимутов простирания трещин, группируемых в зону, зависит от расстояния между обнажением и наиболее удаленным участком территории, а также от выбранной площади элементарных квадратов (1 га или 1000 м²). При нахождении ее исходят из того, что все трещины, объединенные в зону, должны проходить через один и тот же квадрат. Для приближенного определения допустимого отклонения азимутов простирания трещин, группируемых в зону ($\Delta\varphi$) от среднего азимута простирания зоны

$$\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n}{n}, \quad (12)$$

где n — число трещин, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ — азимуты простирания отдельных трещин, можно воспользоваться эмпирической табл. 7.

Для характеристики степени раздробленности массива тектоническими трещинами предлагается использовать три показателя: 1) количество трещин (M_T), 2) количество пересечений трещин (K_T) и 3) суммарную длину трещин (L_T) на единицу площади поверхности закарстованного массива (1 га, 1000 м²). Наиболее приемлемыми являются два по-

следних показателя. Показатель K_T дает представление о количестве возможных сосредоточенных путей фильтрации карстовых вод в толщу растворимых пород, а показатель L_T при переходе к объемным величинам — о площади взаимодействия породы с водой (Болотов, А. Печеркин, Молоков, 1980; J. Pechorin, A. Pechorin, Bolotov, 1980).

Т а б л и ц а 7

Площадь элементарного квадрата	Максимально допустимые значения $\Delta\phi$ (град) при расстоянии от середины зоны до дальней границы участка, (м)		
	200	500	1000
1 га	10	7	5
1000 м ²	8	6	4

Для каждого квадрата подсчитывается значение показателей степени трещиноватости. Полученные величины представляются в центре квадратов. Затем строятся карты изолиний значений M_T , K_T , L_T . При их построении применяют метод линейной интерполяции данных, широко используемый в топографии, структурной геологии для составления карт изолиний рельефа, структурных карт пласта (интерполяции данных по методу наименьших квадратов, треугольников и т. д.). Желательно строить три карты, так как при сопоставлении их можно получить наиболее полное представление о трещиноватости карстующегося массива.

При большом количестве точек построение карт изолиний трещиноватости — достаточно сложная задача. В тех случаях, когда диссонантный рельеф карстующихся массивов хорошо изучен на соседних участках, ее решение может быть существенно облегчено при помощи метода геометрической интерпретации карстового рельефа (Болотов, Печеркин, Печеркин, 1980). Метод сводится к тому, что каждую карстовую форму в плане можно вписать в ту или иную геометрическую фигуру. Например, контуры карстовых воронок, депрессий, останцов обычно хорошо вписываются в круг или эллипс, межостанцовые седловины (формы рельефа, разделяющие соседние останцы и депрессии) — в пространство, разделяющее сопряженные гиперболы и т. д. Проинтерпретировав таким образом карстовый рельеф, приступают к построению изолиний.

На схеме трещиноватости находятся точки с наименьшими и наибольшими значениями показателя трещиноватости. Первым будут соответствовать центральные части карстовых

останцов, вторым — центры депрессий. Зная все параметры, необходимые для построения фигур и главные направления трещиноватости, легко построить контуры геометрических фигур, в которые попадут соответственно все точки с минимальными значениями показателя (останцы) и точки с максимальными значениями показателя (депрессии). В пространстве между построенными фигурами окажутся точки со средними значениями показателя трещиноватости. В пределах, выделенных относительно небольших областей, нанесение изолиний с помощью метода линейной интерполяции не представит труда.

В качестве примера приведем построение карты изолиний трещиноватости участка Полазненского карстующегося массива (Камское водохранилище). Массив характеризуется диссонантным останцовым рельефом, амплитуда которого достигает 35-40 м (рис. 12). Отрицательные карстовые формы (депрессии и межостанцовые седловины) образовались в результате выщелачивания подземными водами гипсов и ангидридов (P_1kg) в зонах повышенной тектонической трещиноватости, которое сопровождалось проседанием и дроблением перекрывающих их соликамских известняков и мергелей (P_2uf). Над останцами соликамские породы сохранились в естественном залегании, в пределах депрессий и останцов они полностью разрушены. Обломки известняков сцементированы песчано-глинистым материалом.

После того как карты изолиний трещиноватости построены, приступают к их анализу. В общем случае замкнутые изолинии с наибольшими значениями показателей M_T , K_T и L_T отмечают положение отрицательных карстовых форм (воронок, депрессий), приуроченных к зонам повышенной трещиноватости. Замкнутые изолинии с наименьшими значениями K_T , M_T и L_T соответствуют карстовым останцам. Изолинии с промежуточными значениями K_T , M_T и L_T характеризуют среднюю степень раздробленности массива трещинами и отличают положение межостанцовых седловин — форм, разделяющих соседние останцы и депрессии.

Так, сопоставление карт изолиний показателей K_T , M_T и L_T (рис. 13—15) и карты изострат кровли Полазненского сульфатного массива (рис. 12) свидетельствует об их хорошей корреляции. Останцам соответствуют участки, оконтуренные замкнутыми изолиниями с $M_T < 60$, $K_T < 200$ и $L_T < 100$, депрессиям — участки с замкнутыми изолиниями с $M_T > 120$, $K_T > 500$ и $L_T > 400$. Области развития межостанцовых седловин характеризуются значениями M_T от 60 до 120, K_T от 200 до 500 и L_T от 100 до 400.

Данная методика с успехом применялась нами в ряде закарстованных районов Пермского Прикамья (Полазненский полуостров; Кунгурская ледяная гора, район д. Куликово

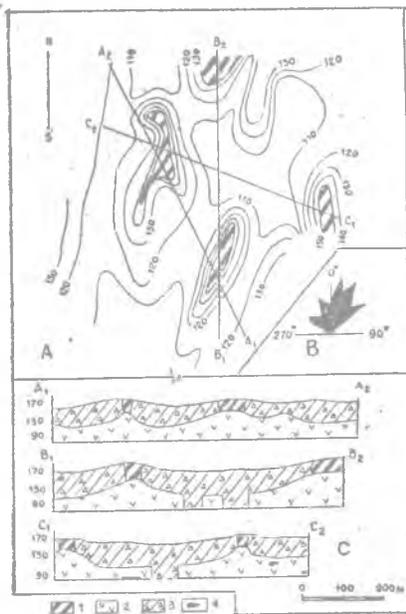


Рис. 12. Карта изострат кровли гипсов (А), роза тектонической трещиноватости (В) и разрезы (С) участка Полазненского закарстованного массива. 1 — соликамские мергели (P_{2u}), 2 — иренские гипсы и ангидриты (P_{1kg}), 3 — гравитационно-карстовые отложения (N—Q), 4 — встреченные скважинами карстовые полости

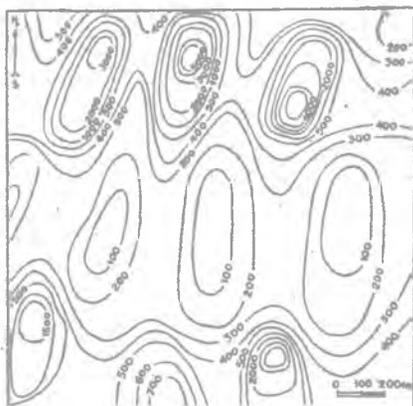


Рис. 13. Схема изолиний количества пересечений трещин на гектар поверхности растворимых пород (K_T) участка Полазненского закарстованного массива

на. В зависимости от опыта геологов при одной и той же системе точек наблюдений в принципе может быть столько вариантов карт, сколько было авторов или опытов рисовки

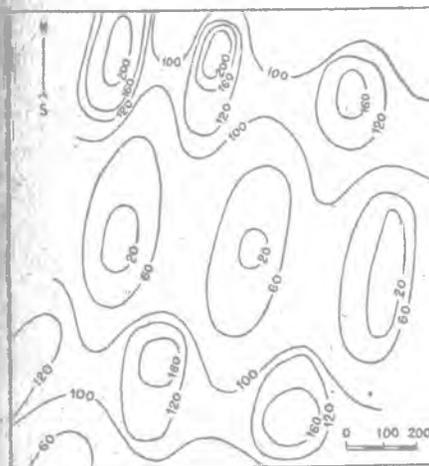


Рис. 14. Схема изолиний количества трещин, проходящих через гектар поверхности растворимых пород (M_T) участка Полазненского массива

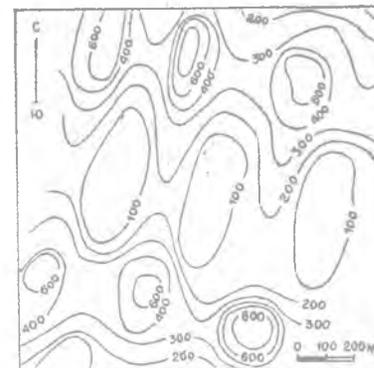


Рис. 15. Схема изолиний суммарной длины трещин на гектар поверхности растворимых пород (L_T) участка Полазненского закарстованного массива

Камское водохранилище), карьеры Саркаевский и гора Соколиная (Соколино-Саркаевское месторождение строительных гипсов), Среднего Урала (Гальяновское месторождение флюсовых известняков, г. Н. Тагил), Куйбышевского Поволжья (Северный, Северо-восточный карьеры Водинского месторождения серы), Предкарпатья (Подорожнянское, Раздольское, Язовское месторождения серы в Львовской области).

Построение карт трещиноватости с помощью ЭВМ имеет ряд преимуществ по сравнению с построением их вручную. Во-первых, ручная интерполяция данных многовариант-

рельефа. Избежать многовариантности позволяет метод геометрической интерпретации, однако он применим лишь для территорий, в пределах которых имеются детально изученные участки.

Машинная интерполяция инвариантна. Для данного дискретного набора точек ЭВМ при повторении операций будет строить один и тот же вариант карты, точность которого будет зависеть только от количества исходных данных и эффективности применяемого метода интерполяции.

Во-вторых, построение карт трещиноватости на ЭВМ гораздо менее трудоемко. Например, для построения карт изолиний K_T, M_T и L_T участка Полазненского карстового массива вручную потребовалось приблизительно 220 чел.-ч (27 чел.-дней), а на ЭВМ лишь 10 чел.-ч. Из них машинное время составило 1 ч, 6 ч ушло на подготовку материалов для перфорации и 3 ч — на интерпретацию построенных на ЭВМ карт.

В настоящее время выделяют два уровня использования ЭВМ в картографии. К первому уровню относится ЭВМ-кар-

тографирование, которое ограничено работой на ЭВМ и на принадлежащих им автоматических цифровых печатающих устройствах (АЦПУ). Ко второму уровню относится автоматическая картография с использованием более сложных приборов (различного рода графопостроители, микрофильм-плоттеры и т. д.) для изготовления оригинала карт в их традиционном виде (Жуков, Сербенюк, Тикунов, 1980).

Поскольку вычислительные центры многих геологических организаций не имеют специальных автоматизированных систем, мы остановились на использовании при построении карт изолиний K_T и M_T АЦПУ ЭВМ. Программа составлена на языке Фортран-IV (система ДОС/ЕС) для ЭВМ «ЕС-1022».

Блок-схема алгоритма построения карт изолиний K_T и M_T приведена на рис. 16. Исходная информация — азимуты простираения обнажений растворимых пород, тектонических трещин, их общее количество, расстояние между ними. Кроме того, задаются ширина исследуемого участка от линии обнажений в глубь массива, длина стороны элементарного квадрата, для которого подсчитываются показатели трещиноватости, длина рабочего интервала при определении координат точек.

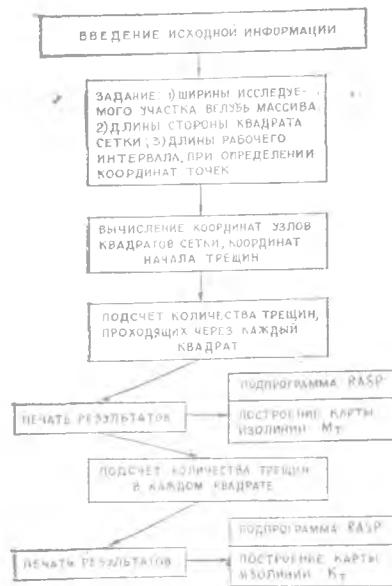


Рис. 16. Блок-схема алгоритма построения карт изолиний K_T и M_T

ки) изучаемого участка при помощи ЭВМ моделирует процедуру их подсчета вручную (Болотов, Печеркин, 1980).

Построение изолиний производится с помощью подпрограммы RASP. Показатели трещиноватости фиксируются в памяти машины как точки в центре квадратов с тем или иным значением K_T и M_T . Точки распределены по всей площади равномерно и достаточно густо. Поэтому при нахождении промежуточных значений K_T и M_T между точками с известными значениями их используется принцип линейной интерполяции. После получения цифровой модели поверхности зада-

ются интервалы значений K_T и M_T для расслоений цифровой модели (частота построения изолинии на АЦПУ). На основе автоматического заполнения каждого слоя выбранными для него символами составляются карты изолиний K_T и M_T . Для удобства чтения карты участка, заполненные символами, чередуются с участками, незаполненными символами.

Изолинии проводятся по границам участка вручную. Левый верхний угол карты — начало обнажения, простирацию которого соответствует линия: левый верхний угол — левый нижний угол. Зная азимут простираения обнажения, легко ориентировать полученную карту относительно сторон света. Масштаб карты определяется путем нахождения отношения длины исследуемого участка к его длине на карте. Проинтерпретированная таким образом карта приводится на рис. 17.

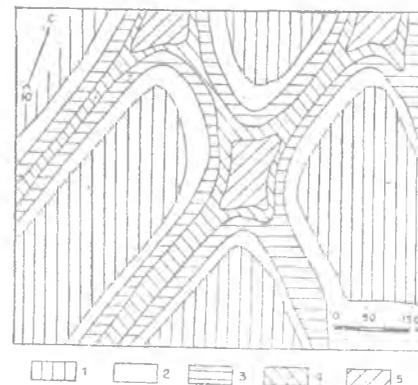


Рис. 17. Интерпретированная карта изолиний K_T участка Полазненского карстующегося массива, построенная на ЭВМ: 1 — $K < 200$, 2 — $K_T < 200 - 300$, 3 — $K = 300 - 400$, 4 — $K_T = 400 - 500$, $K > 500$

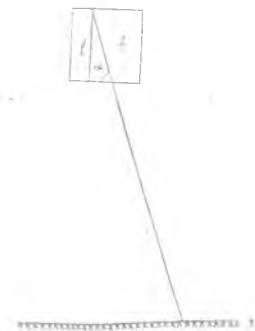


Рис. 18. К определению значения показателя L_T исходя из величины K_T : 1 — обнажение растворимых пород; 2 — элементарный квадрат, для которого подсчитываются значения L_T и K_T . l — длина квадрата, α — угол между направлениями обнажения и трещин

• Опыт применения программы показывает, что ее целесообразно использовать в том случае, когда количество тектонических трещин не превышает 3000. При большем количестве трещин затрудняется подсчет значений показателя K_T , в работе ЭВМ часто наблюдаются сбои. Кроме того, машинное время будет более 8 ч. Учитывая, что среднее расстояние между тектоническими трещинами редко превышает 5—10 м,

несложно подсчитать, что допустимая суммарная длина обнажений составит в среднем 15—30 км. Следовательно, программа вполне пригодна для использования в практических целях.

Подсчет показателя L_T на ЭВМ крайне затруднителен. Удовлетворительное решение задачи на кафедре инженерной геологии Пермского университета пока не найдено. Приближенно можно определить показатель через величину показателя K_T :

$$L_T = \frac{lK_T}{\sin \alpha} \quad (13)$$

где l — длина стороны элементарного квадрата;
 α — угол между простиранием обнажения и средним азимутом простирания трещин (рис. 18).

Глава 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАТФОРМЕННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИХ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

§ 2.1. Краткий обзор методов моделирования трещиноватости массивов горных пород

Основная трудность при детальном исследовании трещиноватости тектонических структур заключается в невозможности точного выявления глубины проникновения, мест расположения, интенсивности распределения трещиноватых зон и отдельных трещин в глубине скального массива.

Поэтому очевидна необходимость выявления общих закономерностей распределения трещиноватости на тектонических структурах антиклинального характера, а также частных особенностей конкретной структуры. В связи с этим в литературе появилось множество работ, посвященных результатам и основным условиям физического и математического моделирования возникновения трещиноватости как на локальных платформенных структурах, так и при формировании складчатости горных областей.

Вот далеко не полный перечень и некоторые результаты экспериментов физического моделирования.

В 1927—1931 гг. Т. А. Линк воспроизводит складки в виде купола, на них были получены системы концентричных и радиальных разрывов.

В 1945—1948 гг. Е. Н. Пермяков занимался изучением взаимосвязи трещиноватости осадочных пород Русской платформы и тектонического строения районов. В 1948 г. Е. Н. Пермяков и А. А. Русецкий проводили опыты на гипсовых пластинках овальной или прямоугольной формы, зажатой между листами резины. Размер пластины выбирался в масштабе 1 : 50 000 к размеру моделируемой структуры.

В зависимости от формы овала, сопротивления и места приложения давления на материале появляются разломы, ориентированные диагонально к длинной оси овала. Всегда появляются 4 различно ориентированных диагональных разлома. Затем вслед за диагональными разломами при продолжении нарастания давления на центр возникают продольные разломы и другие серии диагональных расколов, не проходящие уже через центр структуры, и наконец, периферические разломы вдоль контура овала, предшествующие полному разрушению пластины. В редких случаях, как исключение, наблюдалось появление, в первую очередь, продольных расколов, а диагональные при этом лишь слабо были намечены (Пермяков, 1949).

С 1948 по 1962 г. исследователями под руководством В. В. Белоусова было испытано много моделей антиклиналей поперечного изгиба: работы Е. И. Чертковой (1950), А. М. Сычевой-Михайловой (1958), которые были проведены в лаборатории тектонофизики Института физики Земли АН СССР.

Е. И. Черткова в принципе продолжила опыты Е. Н. Пермякова, но использовала для моделей парафиновые и стеариновые диски, имитировавшие тектонические кушоловидные поднятия. Однако в отличие от опытов Е. Н. Пермякова задача нагрузки производилась не через шарик или цилиндр, а через штамп, имитировавший блок фундамента.

Результаты в обоих случаях весьма близки друг к другу. На круглом поднятии образуются радиальные трещины. На овальном в сводовой части развиваются две продольные трещины, направленные параллельно длинной оси поднятия. Они соединяются между собой поперечными трещинами, а периферическая часть купола разбита рядом радиальных трещин. Часто помимо перечисленных трещин образуются кольцевые трещины (Черткова, 1950; Белоусов, 1951).

Особенно полно поперечный изгиб был исследован в поле и на моделях М. В. Гзовским и И. М. Кузнецовой, Е. И. Чертковой, Ма Цзинь.

За последние 15—20 лет этот тип деформации исследуется на моделях, которые рассматриваются в поперечном сечении. Кроме плоских, исследовались и объемные модели.

На объемных моделях, выполненных из пластичного, упругого или из маловязкого оптически активного материала были выявлены следующие закономерности развития структуры: повышенные значения максимальных касательных напряжений характерны для основания крыла складки, зоны, расположенной около краев движущейся глыбы и верхних частей крыльев. Эти максимумы наблюдаются в тех случаях, когда мощность модели меньше ширины поднимающейся глыбы. В противном случае два верхних максимума соединяются в один, расположенный на своде около оси антиклинали.

Разрывы развиваются в направлении от мест с большей величиной напряжений к местам с меньшей величиной, поэтому в складке поперечного изгиба одни разрывы растут снизу вверх, а другие — сверху вниз. В каждой части складки направление разрывов сколового типа должно быть близким к направлению главных касательных напряжений. При разделении моделей на крупные слои повышенные значения касательных напряжений отмечены преимущественно в средней части складки (Белоусов, Гзовский, 1964). Именно поэтому в природе, в случае многослоистости осадочного чехла, наиболее интенсивно раздроблена сводовая часть структуры.

Если поднятие имеет овальную форму — брахиантиклиналь, наибольшее распространение и здесь имеет радиальная система, которая выражена в виде трещин, направленных по падению слоев — нормально к стратоизогипсам. Трещины этой системы, расположенные на двух крыльях поднятия, часто сливаются между собой в сводовой части, образуя сквозные поперечные трещины. Кроме радиальных систем, наблюдаются продольные трещины, наиболее интенсивно развитые в сводовой части поднятия, но присутствующие повсеместно и на крыльях.

Помимо изучения напряженного состояния моделей сделаны попытки проследить изменение деформаций удлинения и укорочения (Михайлова, 1979).

При моделировании с применением хрупких пластин, будь то гипс или парафин, исследователи получали трещины скалывания двух систем — диагональной и вдольконтурной. Развитие трещин отрыва не наблюдалось.

Опыты с пластичными материалами, наоборот, приводили к появлению на модели только трещин отрыва, которые располагались параллельно контуру структуры.

Эксперименты выше названных исследователей в принципе правильно отразили процесс растрескивания пород брахиантиклинальных, куполовидных и других поднятий путем

развития трещин скалывания в результате действия главных нормальных напряжений.

Трещины отрыва обусловлены касательными напряжениями, возникающими в структуре при ее воздымании и изгибе, но распределение трещин на моделируемых структурах лишь в первом приближении отвечает их истинному распределению в природе. Это, видимо, объясняется сложностью подбора материала для экспериментов, который должен обладать одновременно хрупкими и пластичными свойствами и позволил бы воспроизвести процессы формирования трещин скалывания и отрыва во взаимодействии. В природе формирование тектонических структур длится геологическое время, а скорость движений крайне мала, поэтому горные породы, не теряя своих упругих свойств, приобретают способность деформироваться пластически. С другой стороны, физическое моделирование носит качественный характер и на основе полученных результатов нельзя дать количественную оценку напряженного состояния и трещиноватости конкретного скального массива на конкретном этапе развития структуры.

§ 2.2. Математическое моделирование состояния растрескивания брахиантиклиналей

Качественно иными являются результаты математического моделирования. Получаемые схемы распределения нормальных и касательных напряжений в определенном пласте пород при заданной амплитуде поднятия (изгибания) структуры дают возможность методом ключевых участков интерпретировать замеры трещиноватости по отдельным обнажениям на весь массив или, если это необходимо, на всю площадь тектонической структуры.

Для расчета напряжений, возникающих в пластах скальных горных пород и формировании брахиантиклинальных структур следует решить пространственную задачу по расчету главных и касательных напряжений при изгибе тонких пластин (Жемочкин, 1957). Выбор задачи такого типа обусловлен тем, что мощности исследуемого пласта много меньше его размеров по площади. Кроме этого, в решение вводятся ряд условий, изложенных ниже.

Необходимо отметить, что для наиболее достоверной корреляции получаемых значений распределения напряжений расчету должно предшествовать детальное изучение геологической истории развития массива, его геометрических параметров, а также условий залегания, прочностных и деформационных характеристик слагающих его горных пород.

Прежде всего необходимо определить систему координат, относительно которой ведутся все расчеты, а именно: ось OZ направлена вертикально вверх, OX — вправо, OY — на наблюдателя. Координатную плоскость XOY совместим с плоскостью, проходящей через середину мощности данного пласта пород, которую в дальнейшем будем называть «срединной плоскостью». Точка начала координат должна совпадать с так называемым структурным центром — точкой, расположенной на срединной плоскости рассматриваемого пласта с максимальной амплитудой поднятия (точка пересечения осей структуры). Нагрузка на подошву рассматриваемого пласта, параллельна OZ и передается от нижележащего слоя пород или непосредственно от фундамента (рис. 19).

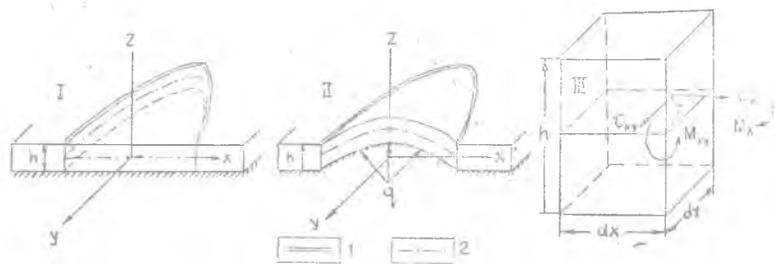


Рис. 19. Схема к расчету напряжений, возникающих при формировании брахиантиклиналей: 1 — контур структуры, 2 — контур срединной поверхности

Условие, определяемое «тонкой пластиной» или плитой, позволяет ввести ряд допущений, значительно упрощающих вычисления:

1. Срединная плоскость пласта не деформируется в плоскости XOY , а только изгибается, таким образом, горизонтальные нормальные напряжения в этой плоскости (σ_x и σ_y) равны нулю.

2. Отдельные прослои рассматриваемой толщи не оказывают давления друг на друга и во всех ее точках $\sigma_z = 0$.

3. Перпендикуляры, проведенные с кровли на подошву толщи, при ее деформациях наклоняются, но не искривляются.

4. Точки срединной плоскости толщи перемещаются только вертикально, так как при начале растрескивания горизонтальные перемещения отдельных блоков настолько малы, что ими можно пренебречь.

До начала тектонических движений (движения вертикального характера, способствующие изгибу пород), приведших

к формированию рассматриваемой брахиантиклинальной структуры, лежащий на ее поверхности пласт пород будем рассматривать как эллиптическую пластину, закрепленную по контуру. При этом после начала воздымания вертикальные и горизонтальные движения на контуре отсутствуют. Такое условие позволяет пренебречь трением, которое может возникнуть по плоскостям напластования слоистой толщи. В первоначальном состоянии (сразу после седиментации и литификации осадка, до начала тектонического воздымания и растрескивания) массив рассматривается как сплошное изотропное тело. Наличие литогенетической трещиноватости не будет противоречить такому условию, так как по простиранию пласта она распространена более или менее равномерно. Частота трещин зависит от мощности пласта и таких свойств пород, как кавернозность и пористость. Для определенного пласта или толщи пород, представленного однородной горной породой, эти параметры принимаются постоянными.

При изгибании пласта вследствие тектонических усилий, которое начинается сразу после появления трещин скалывания, образование трещин отрыва начинается с верхних слоев (не считая тех нарушений, которые возникают на границе кристаллический фундамент — осадочная порода, т. е. непосредственно у поднимающегося блока фундамента) и постепенно распространяются на нижние. При таком механизме верхние слои (растресканные) постепенно исключаются из расчетов. Вместе с тем в расчетах следует учитывать изменчивость с глубиной физических свойств даже литологически однородных горных пород (рис. 20) и изменять их значения в

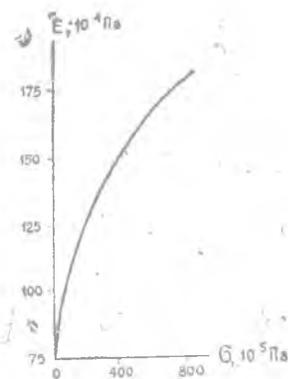


Рис. 20. Изменение физико-механических свойств гипса с глубиной (Мюллер, 1971)

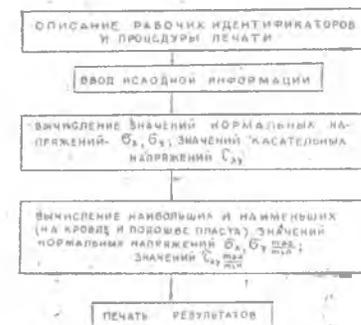


Рис. 21. Блок-схема алгоритма вычисления нормальных и касательных напряжений (БЭСМ-4, «АЛГОЛ»)

расчетных формулах при переходе растрескивания из верхних горизонтов в нижние.

Уравнение, описывающее контур рассматриваемой структуры, будет уравнением эллипса:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 = 0. \quad (14)$$

Зададимся функцией прогиба в виде

$$w = C \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 \right)^2, \quad (15)$$

где C — постоянный коэффициент, удовлетворяющий основному уравнению изгиба

$$\left(\frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dy^2} \right) \left(\frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dy^2} \right) = \frac{q}{D} \quad (16)$$

в виде

$$C = \frac{q}{8D \left(\frac{3}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{3}{b^4} \right)} \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 \right)^2, \quad (17)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая жесткость, $q = \gamma h + \Delta q$ —

прикладываемая нагрузка, E — модуль Юнга (10^{-5} Па), μ — коэффициент Пуассона, Δq — некоторое добавочное усилие, необходимое для того, чтобы приподнять пласт (10^{-5} Па), h — мощность пласта (м), γ — объемный вес горной породы (10^{-3} кг/м³), a и b — протяженность соответственно длинной и короткой полуосей структуры (м).

При изгибе пласта на каждый его элементарный объем действуют изгибающие моменты:

в направлении параллельном оси OX

$$M_x = D \left(\frac{d^2 w}{dx^2} + \mu \frac{d^2 w}{dy^2} \right), \quad (18)$$

в направлении параллельном оси OY

$$M_y = D \left(\frac{d^2 w}{dy^2} + \mu \frac{d^2 w}{dx^2} \right), \quad (19)$$

в плоскости координат YOZ

$$M_{xy} = (1 - \mu) D \frac{d^2 w}{dx dy}. \quad (20)$$

Изгибающие моменты и напряжения, возникающие при изгибе срединной плоскости, связаны соотношениями:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{I} \cdot Z; \quad (21) \quad \tau_{xy} = \frac{M_{xy}}{I} \cdot Z; \quad (23)$$

$$\sigma_y = \frac{M_y}{I} \cdot Z; \quad (22) \quad I = \frac{h^3}{12}, \quad (24)$$

где I — момент инерции (м), Z — амплитуда поднятия точек срединной плоскости по оси OZ относительно начала координат (м).

Наибольшие напряжения возникают на кровле и подошве пласта:

$$\sigma_x \frac{\max}{\min} = \pm \frac{6M_x}{h^2}; \quad (25)$$

$$\sigma_y \frac{\max}{\min} = \pm \frac{6M_y}{h^2}; \quad (26)$$

$$\tau_{xy} \frac{\max}{\min} = \pm \frac{6M_{xy}}{h^2}. \quad (27)$$

В случае отсутствия тангенциального сжатия массива вертикальные напряжения определяются согласно теории Гейма:

$$\Sigma_z = \frac{\Sigma_x (1 - \mu)}{\mu}. \quad (28)$$

Для удобства и быстроты расчетов составлена программа на языке АЛГОЛ для ЭВМ БЭСМ-4 (рис. 21).

Принципиальная схема расчета выглядит следующим образом:

- I. 1. Расчет значений напряжений σ_x .
2. Расчет значений напряжений σ_y .
3. Расчет значений касательных напряжений τ_{xy} .

Расчет ведется для определенного фиксированного значения z — амплитуды поднятия пласта.

II. Изменение значений амплитуды поднятия от 1 до 10 м при циклическом повторении 3 подэтапов предыдущего 1-го этапа.

1. Расчет значений напряжений $\pm \sigma_x \frac{\max}{\min}$.
2. Расчет значений напряжений $\pm \sigma_y \frac{\max}{\min}$.
3. Расчет значений касательных напряжений $\pm \tau_{xy} \frac{\max}{\min}$.

Расчет значений напряжений I и II этапов ведется для каждой из четырех четвертей, образованных пересечением структурных осей. Масштаб системы координат выбирается в зависимости от размеров полуосей.

Результаты печатаются в виде таблиц, где по горизонтали расположены значения напряжений по оси OY , по вертикали — по оси OX . Получаемые значения напряжений позволяют построить схемы их распределения по площади массива в виде изолиний.

Нормальные напряжения (σ_x и σ_y) развиваются в зависимости от амплитуды поднятия пласта от структурного центра, в котором они имеют наибольшие значения, к периферийным зонам.

В центре сгущения изолиний напряжений образуются диагонально пересекающиеся зоны. От центральных диагоналей сгущений к переклинальным окончаниям структуры сгущения изолиний σ_x и σ_y образуются зоны, проходящие через оси структуры, не пересекающие друг друга, а сегментарно вложенные друг в друга. Зоны характеризуются высокими значениями граничных изолиний, причем одинаковыми на всем протяжении пласта при данных условиях. Значения изолиний уменьшаются к центральной части зон.

Касательные напряжения (τ_{xy}) начинают формироваться также в центральной части структуры (где развиты особенно хорошо), но развиваются отдельно в каждом сегменте, образованном сгущением изолиний нормальных напряжений. В отдельном сегменте (преимущественно в центральной части структуры) касательные напряжения ориентированы субперпендикулярно нормальным, но значительно меньше последних по значениям. Развиваясь к периферийным сегментам, направления касательных напряжений совпадают с направлениями нормальных, но проходят они в местах развития минимальных значений нормальных напряжений. Там, где развиты наибольшие нормальные напряжения, проходят изолинии τ_{xy} с нулевыми отметками (рис. 22, 23, 24). Стоит отметить, что даже при минимальных значениях амплитуды поднятия (порядка 1 м) значения нормальных напряжений много выше (на 1—2 порядка) значений касательных напряжений, что свидетельствует об определяющей роли нормальных напряжений в трещинообразовании. Касательные напряжения, значения которых превосходят предел прочности пород на разрыв, появляются лишь при значительных изгибах пласта, т. е. фактически в заключительную стадию формирования трещиноватости.

Вследствие малой толщины пласта относительно его площадного распределения в разрезе направление изолиний на-

пряжений σ_x , σ_y , имеет вертикальный характер. Наклон изолиний в разрезе обусловлен только изгибом пласта.

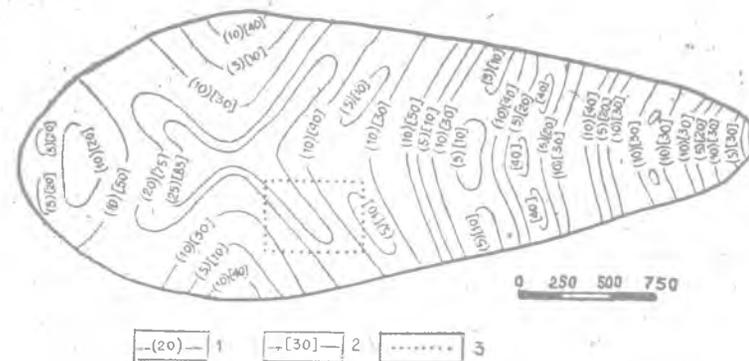


Рис. 22. Схема распределения изолиний наибольшего (σ_y) и наименьшего (σ_x) главных напряжений. 1 — изолинии значений σ_x , 2 — изолинии значений σ_y (значения напряжений в 10^{-5} Па, амплитуда поднятия пласта 1 м)

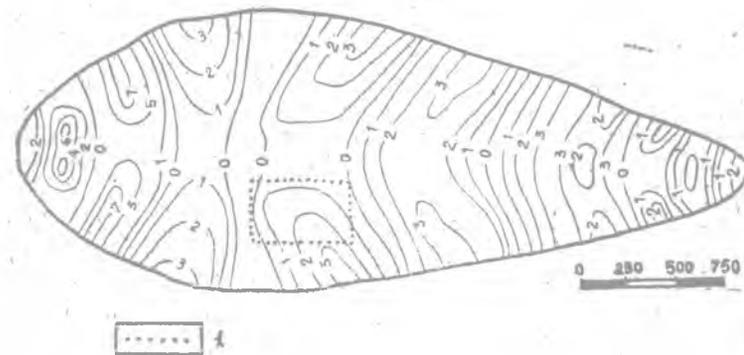


Рис. 23. Схема распределения изолиний касательных напряжений (τ_{xy}). (Значения напряжений в 10^{-5} Па. Амплитуда поднятия пласта 1 м. Пунктиром обозначен участок гипсоангидритового массива — место массовых замеров трещин)

Учитывая, что трещиноватость возникает только в случае, если напряжения становятся больше механической прочности пород, нормальные напряжения обуславливают развитие трещин скальвания, а касательные — трещин отрыва, по результатам расчетов представим поэтапное развитие тектонической трещиноватости на структурах брахиантиклинального типа.

На первом этапе тектонического воздымания (первые метры) закладываются диагональные разломы, проходящие через структурный центр.

На втором этапе трещины скалывания развиваются по всей площади. В центральной части структуры формируются трещины отрыва.

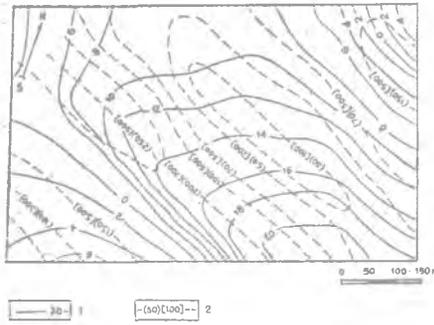


Рис. 24. Схематическая карта изолиний напряжений в гипсо-ангидритовых породах участка Полазненского массива (обозначенного на рис. 23 пунктиром). Амплитуда поднятия пласта 10 м. 1 — изолинии касательных напряжений (τ_{xy}); 2 — изолинии нормальных напряжений (σ_x) и (σ_y) (значения напряжений в 10^{-5} Па)

породы, от амплитуды поднятия исследуемого пласта.

Приведенные сведения о результатах математического моделирования и распределения трещиноватости в брахиантиклинальной структуре совпадают с результатами исследований на физических моделях, а также с нашими полевыми наблюдениями в районе Камского водохранилища.

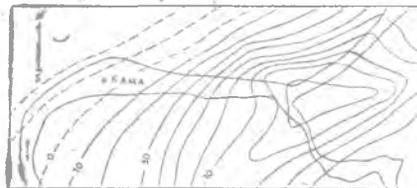


Рис. 25. Структурная схема Полазненского поднятия. Стратоизогипсы проведены по поверхности иренской свиты гипсо-ангидритов (Чернышев, 1959)

ность пласта гипсо-ангидритов 65 м.

На третьем, заключительном, этапе трещины отрыва захватывают всю площадь поднятия. В дальнейшем преобладает расширение и удлинение сформировавшихся трещин. Новые зоны дробления не образуются.

Следует отметить, что направление развития напряжений, а равно и трещин, зависит от геометрических параметров самой структуры, от свойств (механических, физических) растрескиваемой

В качестве примера рассмотрим Полазненский гипсо-ангидритовый массив, который находится в 20 км выше плотины Камской ГЭС и является частью локальной тектонической структуры брахиантиклинального типа с амплитудой поднятия в центре 11 м, длиной 5,7 км и шириной 1,5 км (рис. 25). Средняя мощ-

Гипсо-ангидритовые породы (P_1kg), составляющие верхнюю часть отложений данной структуры, характеризуются сравнительно небольшой ($10-12 \cdot 10^{-5}$ Па) сопротивляемостью на разрыв. При испытаниях в условиях одноосного сжатия временное сопротивление образцов колеблется от 150 до $190 \cdot 10^{-5}$ Па. Результаты испытаний образцов на трехосное сжатие представлены в виде графика на рис. 26.

На рис. 22 изображена схематическая карта изолиний наибольшего (σ_y) и наименьшего (σ_x) главных, нормальных

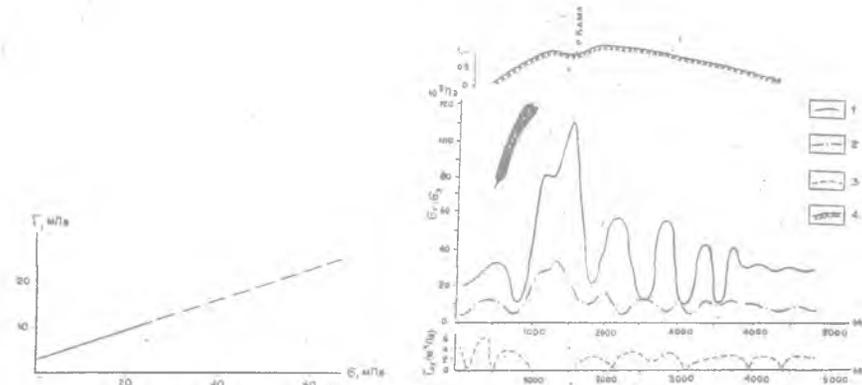


Рис. 26. График разрушения гипсо-ангидрита при трехосном сжатии

Рис. 27. Графики распределения главных и касательных напряжений по длинной оси структуры (X) при амплитуде поднятия пласта 1 м: 1 — график значений σ_y , 2 — график значений σ_x , 3 — график значений τ_{xy} , 4 — условная поверхность структуры

напряжений, действующих параллельно осям OX и OY и определяющих направление и интенсивность трещин скалывания. Среднее главное напряжение (σ_z) в рассматриваемом случае действует по оси Z и обусловлено весом пород. Вследствие такого распределения сил большинство трещин будет иметь вертикальные или близкие к вертикальным углы падения. Отклонение от вертикали обусловлено изгибом пласта.

Анализируя схему изолиний σ_x и σ_y , можно резюмировать, следующее.

Через структурный центр проходят секущие структуру по диагонали изолинии с наибольшими (при любой фиксированной амплитуде поднятия) значениями главных напряжений (σ_x — более $200-250 \cdot 10^{-5}$ Па, σ_y — более $750-850 \cdot 10^{-5}$ Па,

$z=10$ м — в дальнейшем все цифры приводятся для указанной амплитуды).

Максимальные по значению изолинии оконтуривают зоны главных диагональных расколов, причем расположены они по отношению к оси OX под углом $\alpha=43-55^\circ$, что соответствует углу скальвания.

Проследивая распределение напряжений σ_x и σ_y вдоль длинной и короткой осей структуры, можно определить характерные колебания значений (рис. 27, 28). В центре структу-

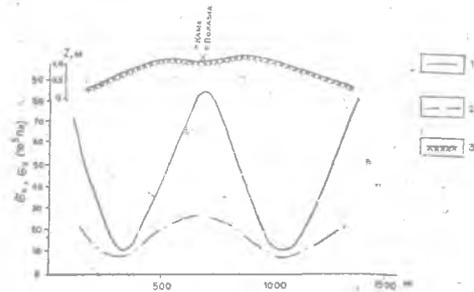


Рис. 28. Графики распределения главных напряжений по короткой оси структуры (Y) при амплитуде поднятия пласта 1 м: 1 — график значений σ_y , 2 — график значений σ_x , 3 — условная поверхность структуры

ры σ_x достигает $300 \cdot 10^{-5}$ Па, σ_y — $1,1 \cdot 10^{-2}$ Па, затем следует спад, характеризующийся значениями σ_x до $50 \cdot 10^{-5}$ Па и σ_y — до $100-110 \cdot 10^{-5}$ Па; далее снова повышение: σ_x — порядка $150 \cdot 10^{-5}$ Па, σ_y — порядка $500 \cdot 10^{-5}$ Па. Такая смена экстремумов прослеживается вплоть до границ структуры. Изолинии напряжений образуют «сгущения» в местах понижения значений и «разреженные» пространства в местах развития повышенных значений σ_x и σ_y .

При параметрах структуры, указанных выше, зоны сгущения имеют ширину от 100 м в периферийной части до 250 м в центральной. Они пересекают поперек, через длинную ось, всю структуру. Направление их определено диагональными зонами. Зоны разрежения густоты изолиний, являющиеся местами средоточия повышенных значений напряжений и, как будет показано ниже, местами максимального развития трещиноватости, имеют в ширину 100—150 м.

Изолинии касательных напряжений (τ_{xy}) также группируются в зоны, простирающиеся соответственно падению крыльев структуры (рис. 27), которые ограничены изолиниями с нулевыми значениями τ_{xy} . Нулевые значения имеют место по оси Y и в центре структуры. Большие значения τ наблюдаются на центральных осях и достигают максимума в точках их пересечения с границей структуры, где достигают $70 \cdot 10^{-5}$ Па. Относительное увеличение касательных напряже-

ний отмечается на середине левой (до $60 \cdot 10^{-5}$ Па) и правой (до $40 \cdot 10^{-5}$ Па) полуосей структуры.

Сопоставление схем изолиний и графиков распределения главных и касательных напряжений показывает, что наибольшие значения σ_x и σ_y соответствуют нулевым значениям τ_{xy} .

Это объясняется тем, что даже при близкой к нулевому значению амплитуде поднятия, напряжения σ_x и σ_y достаточно четко в количественном отношении выражены по всей структуре, тогда как τ_{xy} фактически равно нулю. При повышении амплитуды поднятия величины нормальных напряжений превосходят предел прочности пород на скальвание, обуславливают значительную раздробленность горных пород. В результате этого сопротивление массива растягивающим усилиям минимально или вообще отсутствует.

Максимальных значений касательные напряжения достигают в местах, где главные напряжения минимальны, это участки, наименее разбитые трещинами скальвания. Сопротивление массива растяжению вследствие изгиба здесь более полноценно.

Сопоставление схем изолиний нормальных и касательных напряжений с распределением в исследуемом районе элементов рельефа показывает, что по северо-восточному и северо-западному диагональному расколу заложено русло р. Камы, по юго-восточному — долина р. Полазны, а юго-западному соответствует линейно вытянутая зона наибольшего развития поверхностных карстовых форм (воронки). Зона пересечения расколов (центр брахиантиклинали) является самой раздробленной и ослабленной частью структуры, о чем свидетельствует заметное понижение кровли гипсо-ангидритов в результате денудационных процессов. Поперечно вытянутые зоны повышенных значений нормальных напряжений являются местами заложения узких понижений — логов, выходящих к урзу р. Камы.

Массовые замеры тектонических трещин в обнажениях и построение схемы изолиний их общей длины на гектар поверхности массива (см. рис. 15) позволили вплотную подойти к установлению эмпирической взаимосвязи между величинами напряжений и степенью раздробленности горных пород. Расположение района массовых замеров трещин обозначено пунктирной линией на рис. 22, 23. Здесь по характеру распределения главных и касательных напряжений выделяются три типа участков, отличающихся также степенью раздробленности тектоническими трещинами.

Участки с максимальной раздробленностью характеризуются общей длиной трещин на гектар поверхности массива от 300 до 900 м и более. Здесь представлены трещины сколо-

вого типа, обусловленные развитием нормальных напряжений ($\sigma_x = 150-200 \cdot 10^{-5}$ Па, $\sigma_y = 500-700 \cdot 10^{-5}$ Па), ориентированных с запада на восток узкими зонами шириной от 150 до 200 м. На этих участках касательные напряжения равны нулю или имеют значения, близкие к нулевому. Участки наиболее благоприятны для развития карстовых форм в растворимых породах, так как являются путями движения локализованных потоков подземных вод от длинной оси структуры к периферии. На поверхности, как правило, участки выражены линейными понижениями и часто служат местом заложения русел постоянных или временных водотоков.

В инженерно-геологическом отношении эти участки являются наиболее неблагоприятными, опасными для существующих и возводимых наземных и подземных сооружений.

Участки со средней раздробленностью характеризуются общей длиной трещин на гектар поверхности от 100 до 300 м. На участках развиты параллельные трещины скалывания и отрыва западно-восточного направления. Значения нормальных напряжений изменяются от 100 до $150 \cdot 10^{-5}$ Па для σ_x и от 300 до 500 для σ_y . Значения τ_{xy} колеблются от 2 до $10 \cdot 10^{-5}$ Па, в связи с этим трещины отрыва имеют подчиненное значение. Ширина участков достигает 80 м.

Инженерно-геологические условия этих участков более благоприятны, так как они не сильно разбиты тектоническими трещинами, горные породы менее обводнены и более устойчивы к воздействию инженерных сооружений. Вместе с тем единое направление простирания трещин скалывания и отрыва способствует локализации путей движения подземных вод и создает опасность обильных водопритоков в горные выработки, если таковые имеются.

Участки с минимальной раздробленностью расположены в центральной части зон, ограниченных в данном случае изолиниями со значениями $100 \cdot 10^{-5}$ Па (σ_x) и $300 \cdot 10^{-5}$ Па (σ_y). Здесь развиты нормальные напряжения со значениями менее $100 \cdot 10^{-5}$ Па (σ_x) и $300 \cdot 10^{-5}$ Па (σ_y). Изолинии касательных напряжений имеют значения от 10 до $20 \cdot 10^{-5}$ Па и пересекают изолинии нормальных напряжений под углом $180^\circ - \alpha$. На окраинах участков изолинии τ_{xy} изгибаются и пересекаются с изолиниями нормальных напряжений под острыми углами, вершины которых направлены по падению крыльев структуры. Ширина участков достигает 250—300 м. Это участки с наиболее благоприятными инженерно-геологическими условиями, так как раздробленность их тектоническими трещинами незначительна и составляет всего 80—20 м на гектар поверхности.

Главные пути движения подземных вод приурочены к трещинам скалывания, которые, как и в первых двух случаях, образуют угол α с длинной осью структуры.

Трещины отрыва располагаются перпендикулярно или субперпендикулярно линии падения крыльев структуры. Они играют роль своеобразных дрен и затрудняют движение подземных вод, отводя их на участки с повышенной трещиноватостью. В результате не наблюдается локализованных путей фильтрации, хотя общее направление движения воды сохраняется от центра брахиантиклинали к периферии. Подобному положению способствует и незначительная трещинная раздробленность горных пород, обуславливающая их малую водообильность и высокую устойчивость массива к инженерным воздействиям.

В случае осложнения структуры поднятиями низшего порядка схема расчета и интерпретация результатов несколько изменяется.

В качестве примера рассмотрим результаты расчета напряжений и проанализируем данные по трещиноватости в верховья р. Паланкасо (Пиренеи, Испания). На участке выделена крупная брахиантиклинальная структура (размеры структурных осей 6461×2856 м), северное крыло которой осложнено чередованием синклинали и антиклинальной (2543×1035 м) складок более низкого порядка (рис. 29).

В пределах выделенных структур на поверхность выходят отложения меловой системы сеноманского яруса, представленные аргиллитами и доломитами (C_1) мощностью до 114 м и известняками, доломитизированные известняки и доломиты туронского яруса (C_2) мощностью до 107 м (Eraso A., 1979). Сеноманские отложения выходят на поверхность в осевой части структуры первого порядка, формируя ее ядро. Отложения туронского яруса повсеместно распространены на крыльях структур первого и второго порядка, формируют периклинальные и центриклинальные окончания. Вопрос о порядке структур решается на основе анализа их геометрических параметров и степени выраженности. Нормальное залегание пород позволяет исключить возможность тангенциальных усилий при формировании данных структур, оно свидетельствует о вертикальных подвижках блоков фундамента («блоковая тектоника»). Вследствие больших мощностей верхнего структурного этажа вертикальные нагрузки от нижних слоев к верхним распределяются равномерно.

С учетом механизма формирования структур в верховьях реки Palancaso выбран метод расчета напряжений, аналогичный описанному на примере Полазненского локального под-

нения. Сложность анализа заключается в наличии на северном крыле структуры складок более низкого порядка.

В качестве структурных центров, определяющих положение начала координат, были выбраны точки пересечения шар-

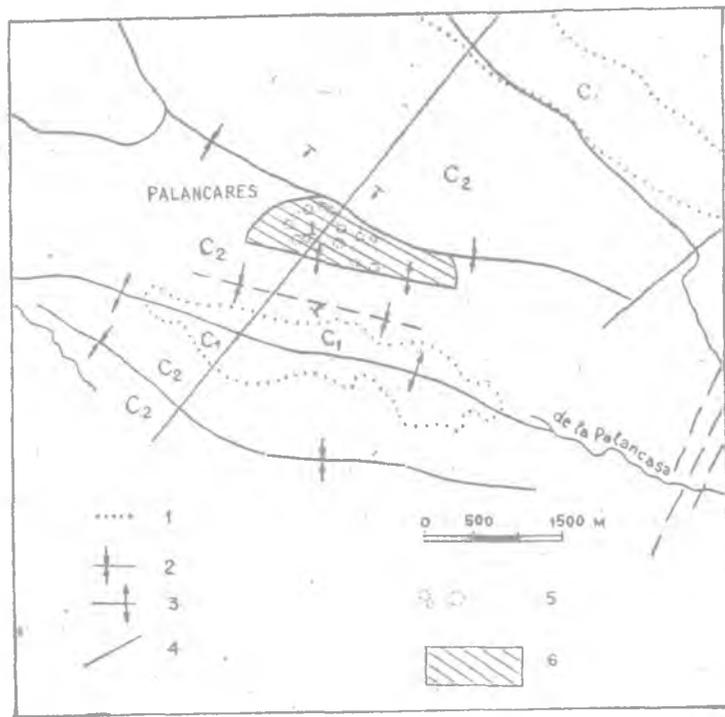


Рис. 29. Геологическая карта района Palancares (Eraso and Ball, 1979)

ниров антиклинальных складок региональным тектоническим разломом, пересекающим участок в направлении ЮЗ—СВ.

Решение производилось в прямоугольной системе координат, где ось Ox направлена по длинным осям структур, Oy — по коротким, а Oz перпендикулярна плоскости HOY и восстановлена из точки начала координат.

В соответствии с периодичностью формирования структур расчет и анализ был проведен в 5 этапов.

1. Количественный расчет и выявление пространственного распределения полей нормальных σ_x , σ_y и касательных τ_{xy} напряжений в пределах структуры первого порядка на ранних этапах ее развития, т. е. в то время, когда структура второго порядка еще не образовалась.

2. Обособленный расчет и выявление полей напряжений структуры второго порядка без учета влияния первичного фона напряженного состояния.

3. Выявление взаимосвязи полей главных и касательных напряжений первичной и вторичной структур путем наложения схем распределения напряжений, выполненных в изолиниях.

4. Составление карт показателей трещиноватости на единицу площади по имеющимся данным о тектонической трещиноватости участка.

5. Сопоставление распределения полей напряжений и интенсивности трещиноватости с целью выявления характерных особенностей формирования и распределения трещиноватости в данных условиях.

Расчет напряжений, сопоставление и анализ трещиноватости проводились для известняков и доломитизированных известняков туронского яруса (C_2).

Участок исследований занимает практически все северо-восточное крыло антиклинальной структуры второго порядка.

Интерпретация данных о напряженном состоянии толщи туронских отложений основывается на механизме формирования обеих структур.

Распределение изолиний нормальных и касательных напряжений (σ_x , σ_y , τ_{xy}) свидетельствует о четко выраженной зональности относительно структурного центра и длинной оси вторичной складки (рис. 30, 31, 32)*.

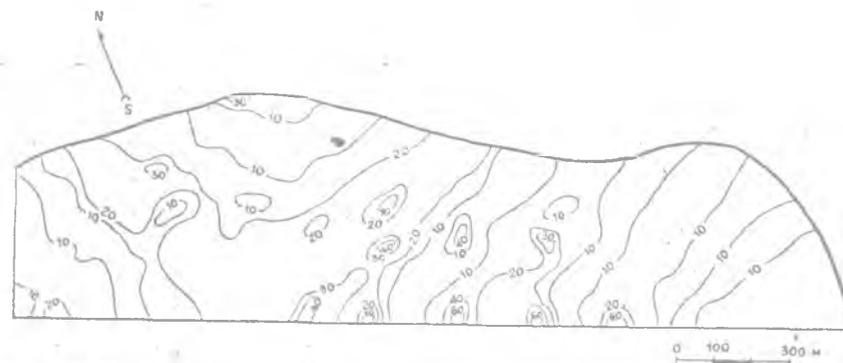


Рис. 30. Схема распределения изолиний наименьшего главного напряжения (σ_x , 10^{-5} Па) на 0,25 га (участок исследованый, см. рис. 29)

* Значения напряжений приведены для амплитуды поднятия пласта 1 м.



Рис. 31. Схема распределения изолиний касательных напряжений (τ_{xy} , 10^{-5} Па) (участок исследований, см. рис. 29)

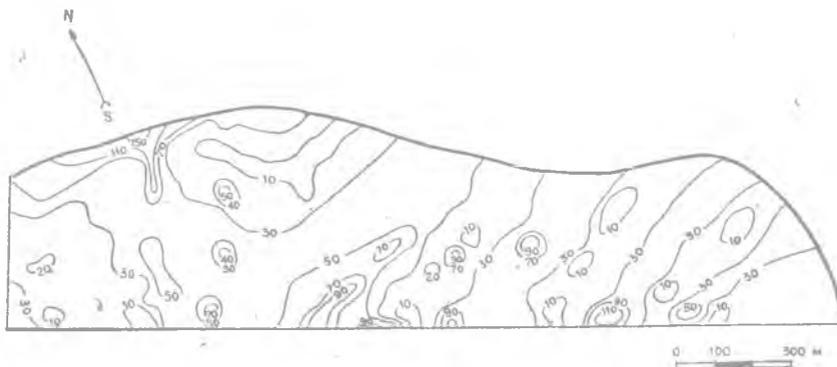


Рис. 32. Схема распределения изолиний наибольшего главного напряжения (σ_y , 10^{-5} Па) (участок исследований, см. рис. 29)

В результате тектонических усилий толща пород была выведена из относительного равновесия, что отразилось на распределении напряжений.

Относительно центра выделяются две взаимно пересекающиеся под $\angle \alpha \pm 68^\circ$ зоны, имеющие субширотное и субмеридиональное простирание. Ширина их колеблется от 220 до 320 м. Зоны ограничены изолиниями со значениями $\sigma_x = 20 \cdot 10^{-5}$ Па, $\sigma_y = 30 \cdot 10^{-5}$ Па. От периферийных к осевым частям зон наблюдается увеличение значений напряжений σ_x до $40 \cdot 10^{-5}$ Па, σ_y до $90 \cdot 10^{-5}$ Па (восточная зона) и до $110 \cdot 10^{-5}$ Па (северная зона). Значения τ_{xy} в пределах этих зон колеблются от 0 до $1,1-1,16 \cdot 10^{-5}$ Па. Здесь же выделяются отдельные участки замкнутых изолиний со значениями σ_x от 10 до $40 \cdot 10^{-5}$ Па, σ_y от 30 до $80 \cdot 10^{-5}$ Па, τ_{xy} от 1 до $5 \cdot 10^{-5}$ Па.

Это обусловлено наличием фона напряжений, возникших при формировании структуры первого порядка.

Указанные зоны, пересекающиеся в максимально приподнятой части структуры, являются наиболее напряженными по сравнению со смежными.

Соседние зоны, распределенные по длинной оси структуры, представляют собой вытянутые параллельные участки шириной до 170 м, ограниченные изолиниями со значениями σ_x $10 \cdot 10^{-5}$ Па, σ_y $-30 \cdot 10^{-5}$, τ_{xy} $-3 \cdot 10^{-5}$ Па.

Зоны, выделенные в северо-восточной оконечности короткой оси вторичной структуры, сегментарно вложены одна в другую, значения изолиний напряжений увеличиваются от центра к периферии. Изолинии значений главных напряжений, формирующие указанные зоны, в основном, вытянуты в направлении с азимутами 60 и 352°, в то время как изолинии касательных напряжений имеют азимуты от 75 до 133°, т. е. пересекают изолинии σ_x и σ_y под углами 23—141°, 15—73°. В пределах периферийных зон, так же, как и в центрально пересекающихся, выделены участки с замкнутыми изолиниями σ_x — до $60 \cdot 10^{-5}$ Па, σ_y — до $100-110 \cdot 10^{-5}$ Па. Повышенные значения напряжений на этих участках также обусловлены остаточными напряжениями, возникшими при формировании первичной структуры.

Сравнение карт-схем распределения значений напряжений (рис. 30, 31, 32) с картой распределения общей длины трещин (рис. 33) позволяет сделать вывод о взаимосвязи напряжен-

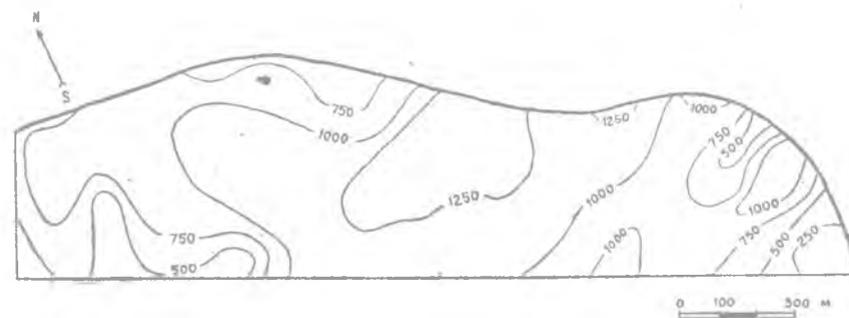


Рис. 33. Схема распределения изолиний общей длины трещин (L_t , м) (участок исследований, см. рис. 29)

ного состояния пород и трещиноватости на фоне структур. Наибольшие значения длины трещин, до 1000—1250 м на 0,25 га, приурочены к центрально пересекающимся зонам главных напряжений и участкам с замкнутыми изолиниями главных и касательных напряжений. Смежные с централь-

ными зоны характеризуются длиной трещин от 500 до 1000 м на 0,25 га.

Иными словами, центральная часть структуры наиболее раздроблена, здесь развиты трещины скалывания преимущественно двух систем с азимутами простирания ($60 \pm 10^\circ$ и $345 \pm 10^\circ$), аналогичными простиранию зон напряжений. Трещины отрыва, обусловленные растягивающими усилиями касательных напряжений, развиты слабо по окраинным частям зон, на участках между аномальными сгущениями трещин скалывания.

Северо-западная часть структуры характеризуется общей длиной трещин от 500 до 100 м/0,25 га. Здесь развиты преимущественно трещины скалывания с азимутом простирания 60° . Пересекающие их трещины имеют подчиненное значение.

В юго-восточной периклинальной зоне структуры преобладают трещины скалывания и отрыва с азимутами простирания $55 \pm 5^\circ$ и $15 \pm 5^\circ$ соответственно. Общая длина трещин от 250 м (на участке погружения пород) до 1000 м на 0,25 га (в приосевой части и на крыле).

Взаимосвязь напряжений и трещиноватости проявляется не только количественно, но и качественно. Например, конфигурация изолиний показателя трещиноватости (рис. 33) совпадает с конфигурацией изолиний напряжений, отражая зональность распределения напряжений и основные направления трещин, а участки с наибольшей раздробленностью пород трещинами и соответствующие им изолинии с максимальными значениями напряжений показывают расположение карстовых провалов на поверхности массива.

Примеры расчета главных и касательных напряжений, возникающих при формировании брахиантиклиналей в толще пород, а также интерпретация их с точки зрения влияния на раздробленность пород тектоническими трещинами показывают приемлемость данного метода — математического моделирования при решении ряда инженерно-геологических задач. Так, при выявлении мест, наиболее перспективных в отношении развития таких геологических процессов, как карстовые, суффозионные, эрозионные и другие, результаты метода вполне применимы в работах по выявлению наиболее экономически эффективных участков для строительства любых видов инженерных сооружений. Значение подобного прогноза повышается в районах, где возможность непосредственного изучения карстующихся пород уменьшается вследствие частичного перекрытия их неастворимыми отложениями. В этом случае участки выходов на поверхность растворимых пород являются ключевыми, на них сопоставляются значения напряжений и показателей раздробленности. Далее, показав

тели трещиноватости с ключевых участков интерполируются на весь элемент структуры. Подобный анализ был проведен авторами на одной из брахиантиклинальных складок юго-востока Беломорско-Кулойского плато.

Согласно схеме тектонического строения в пределах юго-восточной части плато, в бассейне р. Сотки, выделяются две крупные структуры, ограниченные разломами фундамента. С востока они ограничены флексурой, являющейся границей

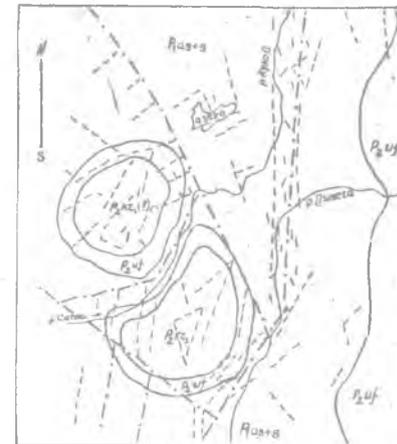


Рис. 34. Картограмма геологического строения юго-восточной части Беломорско-Кулойского плато с элементами разрывной тектоники (по Н. П. Торсуеву и С. А. Левину, 1977): 1 — сульфатные породы асельско-сакмарского яруса нижней перми; 2 — огипсованные красноцветы уфимского яруса верхней перми; 3 — карбонатные породы нижнеказанского подъяруса верхней перми; 4 — границы литолого-стратиграфического комплекса; 5 — разломы фундамента (а), разломы, сопровождающиеся зонами дизъюнктивных нарушений в осадочном чехле (б)

плато. Долина р. Сотки заложена по разломной зоне в месте сочленения (рис. 34) структур (Торсуев, Левин, 1977).

В данной области интенсивно закарстованы галогенные породы верхней толщи нижнепермских отложений, представленные ангидритами, сменяющимися в верхней части разреза на гипсы. Мощность галогенной толщи варьирует от 39 до 112 м. Ангидриты подстилаются доломитами мощностью до 115 м. Карстующиеся отложения перекрыты немymi огипсованными красноцветами вихтовской свиты уфимского яруса мощностью от 60 до 80 м.

Вследствие денудационных процессов гипс-ангидритовые породы обнажены на значительном протяжении долины р. Сотки. Именно для этой территории была первоначально построена карта суммарной длины тектонических трещин на единицу площади поверхности массива в 1,5 га. Закарстованная территория захватывала узкую полосу (до 500 м) южного крыла структуры.

По значениям L_T здесь были выделены следующие участки:

слабораздробленные — 500—1000 м/1,5 га;
 среднераздробленные — 1000—3000 м/1,5 га;
 сильнораздробленные — 3000—5000 м/1,5 га;
 со значениями L_T более 5000 м/1,5 га.

Для выявления характера распределения зон повышенных значений напряжений и их соотношения с показателем L_T нами было проведено математическое моделирование напряженного состояния гипсо-ангидритового пласта на ранних этапах воздымания структуры, расположенной к северу от долины реки.

В результате выяснилось, что наиболее напряженным являлось южное крыло структуры, непосредственно примыкающее к долине. Значения напряжений распределялись не хаотично, а в определенных зонах, ориентированных по направлению к центральной части структуры. Местоположение зон высоких значений σ_x и σ_y южного крыла совпало с местоположениями участков интенсивного дробления, зафиксированных при интерпретации данных систем тектонической трещиноватости.

На северном крыле, ближе к границе структуры, выделяется зона аномально-повышенных значений напряжений. Эта зона ориентирована в широтном направлении.

При наложении карты трещиноватости на схему распределения напряжений было выявлено, что участкам и зонам с определенной степенью раздробленности соответствуют зоны с определенными значениями напряжений (табл. 8).

Таблица 8

Зоны	Значение L_T , м/1,5 га	Значение напряжений, 10^{-5} Па		
		σ_x	σ_y	τ_{xy}
Слабораздробленные	от 500 до 1000	от 5 до 10	от 20 до 30	от 6 и более
Среднераздробленные	от 1000 до 3000	от 10 до 20	от 30 до 60	от 6 до 4
Сильнораздробленные	от 3000 до 5000 и более 5000	от 20 и более	от 60 и более	от 4 и более

Графически данная зависимость представлена на рис. 35. Следовательно, зная распределение зон с различными значе-

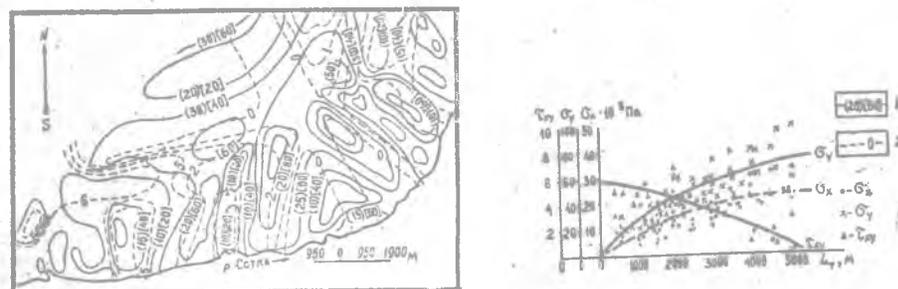


Рис. 35. Схема распределения напряжений в пласте гипсо-ангидритов при амплитуде воздымания структуры ($z=0,1$ м) и график соотношения этих напряжений с показателем L_T (юго-восток Беломорско-Кулойского плато): 1 — изолинии напряжений (σ_x), [σ_y]; 2 — изолинии касательных напряжений (τ_{xy})

ниями напряжений и значения показателей трещиноватости в них, мы можем составить схему распределения зон с различной раздробленностью на всю структуру (рис. 36).

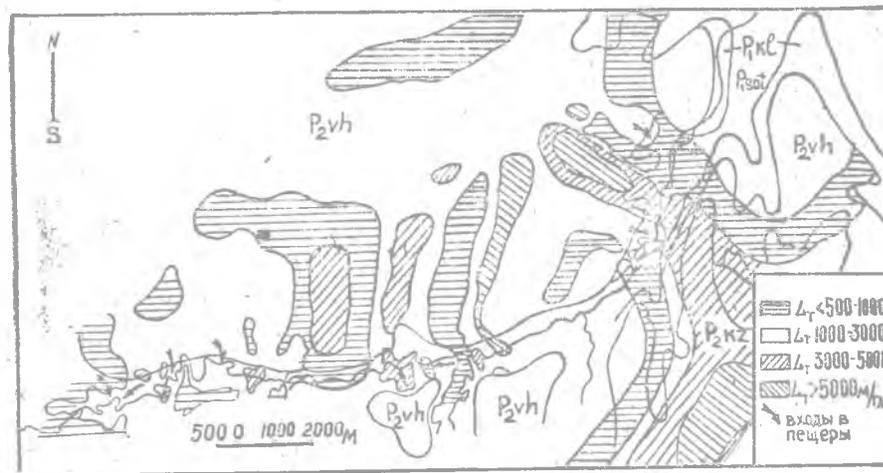


Рис. 36. Карта трещиноватости пласта гипсо-ангидритов, слагающих брахиантиклинальную структуру в районе левобережья р. Сотки (юго-восток Беломорско-Кулойского плато): 1 — слабораздробленные участки ($L_T < 500-1000$ м/1,5 га); 2 — среднераздробленные участки ($L_T 1000-3000$ м/1,5 га); 3 — сильнораздробленные участки ($L_T 3000-5000$ м/1,5 га); 4 — участки, где показатель L_T более 5000 м/1,5 га; 5 — входы и галереи пещер

Данные исследования позволили выявить зоны дробления гипс-ангидритов, развитые под покровом красноцветных отложений. Именно к ним приурочены интенсивные проявления как поверхностных, так и подземных форм карста.

Глава 3 ИЗУЧЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ГОРНЫХ ПОРОД

Рентгеноструктурный анализ довольно широко применяется в геологии для уточнения стратиграфического разреза, уточнения минералогического состава компонентов, слагающих образец, их количества в процентном отношении к объему взятой пробы (фазовый состав), в кристаллографии.

Нами впервые применен рентгеноструктурный анализ для уточнения границ зон с различной степенью трещиноватости для косвенного определения показателей трещиноватости на закрытых для визуального изучения площадях.

Известно, что кристаллы минералов, образующих горную породу, проходя длительный этап диагенеза, приобретают большое количество изменений, «накладывающихся» на дефекты (формы и композиции), образующиеся в период кристаллизации. Совокупность генетических и приобретенных дефектов есть не что иное, как характеристический показатель состояния кристалла в определенный отрезок времени.

Состояние пород на микроуровне предопределяет их физико-механические свойства, отражает определенную взаимосвязь между суммой дефектов природных кристаллов в породе и инженерно-геологическими характеристиками пород в массиве.

Основным и интегральным показателем состояния природных кристаллов в рентгеноструктурном анализе (метод порошка) является интенсивность рассеивания, определяемая по рентгенограммам и интерпретируемая на них в виде размеров площади характеристического пика (I , мм²), т. е. пика кривой рентгенограммы, характерного для минерала (химического соединения), с определенным межплоскостным расстоянием (d) и углом рассеивания (θ).

Факторы, определяющие интенсивность рассеивания для монокристалла, весьма многочисленны. В основном, они определяются и типом аппаратуры, и методикой проведения анализа, и внутренней композицией кристалла (Лонсдейл, 1952;

Шишаков, 1968 и др.). На интенсивность рассеивания природных кристаллов, кроме перечисленных факторов, влияют изменения, возникающие при его формировании и росте: условия кристаллизации (температура, давление) и диагенеза осадков. Небольшие изменения параметров кристаллической решетки связаны с присутствием посторонних примесей в структуре кристалла, которые являются важным признаком структурного типоморфизма, характеризующим условия образования данного образца. Примеси влияют на свойства кристаллов, служат причиной появления напряжений, которые часто приводят к видимой трещиноватости, дислокационным нарушениям (Руководство., 1975).

Представив совокупность дефектов (того или иного характера) как отличительный признак зарождения и последующего изменения кристаллов в образцах исследуемых пород и оценивая интенсивность рассеивания, можно выделять участки или зоны в массиве (при соответствующем интервале отбора образцов), различные по сумме дефектов.

Следуя разделению М. В. Раца и С. Н. Чернышова (1970) нарушений сплошности по уровням, авторы предполагают, что в массиве скальных горных пород трещиноватость на высшем, IV, уровне (дефекты кристаллической решетки минералов, составляющих породу: вакансии, межузельные атомы, дислокации и т. п., изучаемые в физике) не равнозначна как в плане, так и в вертикальном разрезе. Максимальные нарушения на микроуровне должны отражать характер напряженного состояния толщи пород. Зоны и участки развития напряжений, превосходящих по значению прочность пород в условиях трехосного сжатия, должны характеризоваться определенной для литологического типа и диагенетических условий интенсивностью рассеивания минералов-компонентов. Закономерное изменение значений интенсивности рассеивания (I_i) является индикатором смены напряженного состояния массива.

Из всего сказанного следует вывод о возможности определения с помощью рентгеноструктурного анализа границ зон с различной интенсивностью тектонической трещиноватости, обусловленной различной степенью напряженного состояния. Такое определение в лабораторных условиях тем более необходимо, поскольку иногда при массовых замерах трещин в полевых условиях визуальное выделение указанных зон затруднительно.

На основе рентгеноструктурного анализа в инженерной геологии можно получить качественную информацию о границах распространения зон с различной степенью трещиновой раздробленности на этапе инженерно-геологического району-

рования трещиноватых массивов. На более поздних этапах детального изучения выделенных районов анализ позволяет ввести количественные характеристики по составу минералов в породе, их процентному содержанию, позволяющие устанавливать корреляционные связи между напряженным состоянием, количественно-качественным составом и физико-механическими свойствами пород.

Основы рентгеноструктурного анализа освещены в специализированной литературе, а также в многочисленных рекомендациях и руководствах. В связи с этим мы в данной работе ограничиваемся описанием только основных этапов анализа, не вдаваясь в подробности, приводим характеристические данные аппаратуры и условий опыта.

Проведение анализа сводится к следующему:

— образец (навеска в 3 г*) исследуемой породы истирается в порошок (метод порошка) с размером частиц порядка 10 мк;

— порошок под различными углами «просвечивается» в интервале длин волн $\lambda_{\text{ср}} = 1,54178 \text{ \AA}$ с интенсивностью излучения $I = 4000 \text{ имп./мин}$ (аппаратура ДРОН-2,0);

— с помощью регистрационной и самопишущей аппаратуры отрисовывается рентгенограмма;

— подсчитываются интенсивность (I_i) рассеивания (площадь максимального для определенного минерала пика в мм^2) и процентное содержание каждого из регистрируемых минералов;

— по таблицам характеристических данных известных минералов и соответствующих условий опыта определяется наличие тех или иных материалов — компонентов.

В определенных условиях опыта (одна длина волн, интенсивность излучения, одинаковая аппаратура) так называемые атомарные плоскости каждого из кристаллов минералов-компонентов будут рассеивать попадающие на них лучи в определенном, присущем только этому минералу диапазоне излучаемых волн. Причем максимальная интенсивность рассеивания наблюдается при строго определенном межплоскостном расстоянии (d) и угле рассеивания (θ). Например, для ангидрита $d = 3,49 \text{ \AA}$, $2\theta = 25,5^\circ$, для гипса $d = 3,06 \text{ \AA}$, $2\theta = 29,2^\circ$ (рис. 37).

Основываясь на приведенном выше предположении о взаимосвязи дефектов кристаллического строения пород и интенсивности рассеивания как интегрального показателя совокупности генетических и приобретенных дефектов, авторы провели анализ результатов рентгеноструктурных исследований гипсо-ангидритовых пород кунгурского яруса нижней пер-

ми массивов в районах п. Полазна (Камское водохранилище) и д. Куликовка (р. Сылва), а также гипсов и ангидритов того же возраста в районе с. Кишертъ (Предуралье),

Анализ полазенских и куликовских гипсо-ангидритов проводился на образцах, отобранных из береговых обнажений с интервалом 10 м в горизонтальном направлении и в 2 м по вертикали. Кишертские гипсы и ангидриты исследовались по керну скважин в интервале глубин от 30 до 140 м. Интенсивность рассеивания, качественный состав и процентное соотношение компонентов, включая примеси, отражены в табл. 9.

Данные, полученные в полевых условиях и в лаборатории, сопоставлялись по 3 направлениям.

1. Рентгеноструктурное изучение деформации кристаллической решетки минералов в образцах, взятых из зон с известной степенью раздробленности тектоническими трещинами, последующее сравнение результатов исследования образцов из участков массива, степень трещиноватости которых невозможно измерить.

2. Сравнение степени деформируемости кристаллов с напряженным состоянием исследуемой толщи пород.

3. Сопоставление качественного и количественного содержания минералов-компонентов в зонах с различной интенсивностью дробления.

Исследованиям предшествовало детальное изучение тектонической трещиноватости гипсо-ангидритов, которое позволило выделить в массиве 3 участка (следствие композиций зон с различной степенью трещиноватости):

— слабораздробленные (длина трещин на 1 га поверхности $L_T = 20-80 \text{ м}$),

— среднераздробленные ($L_T = 80-140 \text{ м}$),

— сильнораздробленные ($L_T = 140-200 \text{ м}$).

Из зон с известными показателями трещиноватости отбирались образцы на рентгеноструктурный анализ. По результатам анализа строилась зависимость деформируемости кристаллической решетки минералов от показателей трещиноватости (рис. 34). Затем изучались образцы из зон, где эти показатели неизвестны, и сравнивались с ранее построенной зависимостью. Таким образом определялись показатели тре-

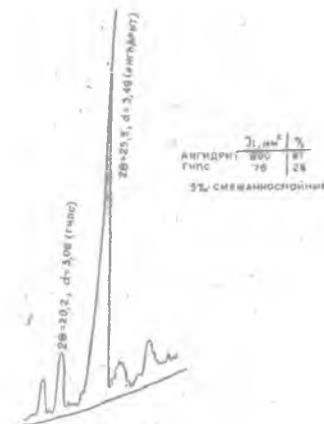


Рис. 37. Вид кривой рентгеноструктурного анализа гипсо-ангидритовой породы

Таблица 9

Данные рентгеноструктурного анализа образцов из обнажений Полазненского и Куликовского массивов

Степень тектонического дробления зон по участкам	Состав породы по результатам рентгеноструктурного анализа	Содержание компонентов, %	Интенсивность рассеивания, I_i , мм ²
Полазна	1 Гипс	100	200
	2 Гипс	28	186
Слабораздробленная	3 Смешаннослойные	5	30
	4 Гипс	100	208
	5 Гипс	94	161
	6 Смешаннослойные	6	35
	7 Гипс	28	75
	8 Ангидрит	67	800
Сильнораздробленная	9 Смешаннослойные	5	45
	10 Гипс	84	136
	11 Ангидрит	11	81
	12 Смешаннослойные	5	26
Слабораздробленная	13 Гипс	37	63
	14 Ангидрит	63	477
	15 Гипс	93	216
Слабораздробленная	16 Ангидрит	3	34
	17 Смешаннослойные	4	28
	18 Гипс	100	200
Слабораздробленная	19 Гипс	94	154
	20 Ангидрит	6	45
Куликово	21 Гипс	94	175
	22 Смешаннослойные	6	38
Слабораздробленная	23 Гипс	100	144
	24 Гипс	97	212
	25 Смешаннослойные	3	25
	26 Гипс	31	60
	27 Ангидрит	69	590
Слабораздробленная	28 Гипс	69	120
	29 Ангидрит	27	208

Степень тектонического дробления зон по участкам	Состав породы по результатам рентгеноструктурного анализа	Содержание компонентов, %	Интенсивность рассеивания, I_i , мм ²
Сильнораздробленная	30 Смешаннослойные	4	25
	31 Гипс	100	160
	32 Гипс	100	164
Слабораздробленная	33 Гипс	97	208
	34 Смешаннослойные	3	22
	35 Доломит	100	272
	36 Гипс	100	274
	37 Гипс	100	217

циноватости в зонах, недоступных для визуального изучения.

Практически в обнажениях Полазны и Куликово можно выделить два типа зон: сильно- и слабораздробленные.

Относительно сильнораздробленные зоны в обнажениях Полазненского массива характеризуются интенсивностью рассеивания для ангидрита от 120 до 800 мм², для гипса от 60 до 140 мм², слабораздробленные — для ангидрита от 0 до 120 мм², для гипса от 140 до 220 мм² (рис. 38).

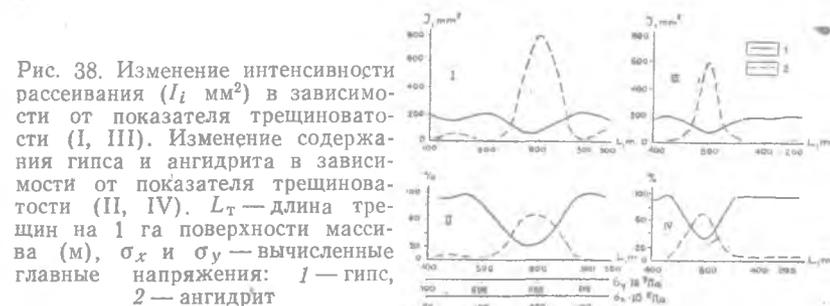


Рис. 38. Изменение интенсивности рассеивания (I_i , мм²) в зависимости от показателя трещиноватости (I, III). Изменение содержания гипса и ангидрита в зависимости от показателя трещиноватости (II, IV). L_T — длина трещин на 1 га поверхности массива (м), σ_x и σ_y — вычисленные главные напряжения: 1 — гипс, 2 — ангидрит

В обнажениях Куликовского массива интенсивность рассеивания для ангидрита в сильнораздробленных зонах варьирует от 200 до 600 мм², для гипса — от 60 до 140 мм².

Слабораздробленные зоны характеризуются интенсивностью рассеивания для ангидрита от 0 до 120 мм², для гипса — от 140 до 200 мм² (рис. 38, III).

При сопоставлении степени деформируемости кристаллов в зависимости от интенсивности трещиноватости массива выяснилось, что можно более точно, нежели визуально или путем интерпретации массовых замеров трещин, определить размеры (мощности) указанных зон, определить их границы в обнажениях.

Чтобы на графическую зависимость изменения интенсивности гипса или ангидрита не влияло наличие в образце пород дополнительных примесей (смешаннослойных минералов), а также для того, чтобы избавиться от влияния присутствия гипса на кривую ангидрита и наоборот, значения интенсивностей пересчитывались с первичных данных (табл. 8, 9) по формуле

$$I_n = \frac{I_{100\%} \cdot N}{100}, \quad (28)$$

где I_n — значение интенсивности без влияния примесей и минералов-компонентов;

$I_{100\%}$ — значение интенсивности минерала, принятого за 100%;

N — процентное содержание минерала, для которого рассчитывается I_n .

Изменение степени деформируемости кристаллов по линии простираения обнажения в горизонтальном плане (рис. 39)

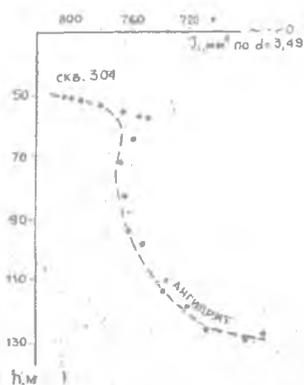


Рис. 39. Изменение интенсивности рассеивания (I_i) ангидрита с глубиной (h)

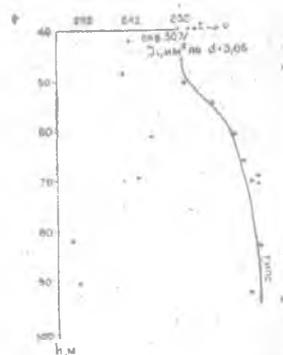


Рис. 40. Изменение интенсивности рассеивания (I_i) гипса с глубиной (h)

указывает на далеко не одинаковые условия развития массива, что подтверждается распределением напряжений при фор-

мировании тектонической структуры. Зоны повышенных значений нормальных и касательных напряжений обуславливают наличие относительно сильнораздробленных зон, а также определяют степень деформации внутреннего строения пород. Интенсивность рассеивания у гипсов в сильнораздробленных зонах резко уменьшается и резко повышается у ангидритов. В слабораздробленных зонах наблюдается обратное. Отметим, что сильнораздробленные зоны характеризуются повышенными значениями нормальных (σ_x и σ_y) напряжений (σ_x от 150 до 200 $\cdot 10^{-5}$ Па, σ_y от 500 до 700 $\cdot 10^{-5}$ Па). Касательные напряжения (τ_{xy}) в этих зонах равны 0. Слабораздробленные зоны характеризуются значениями σ_x менее 100 $\cdot 10^{-5}$ Па, σ_y менее 300 $\cdot 10^{-5}$ Па, τ_{xy} — 10—20 $\cdot 10^{-5}$ Па (значения σ_x ; σ_y , τ_{xy} взяты для толщи гипсо-ангидритов Полазненской структуры при амплитуде поднятия пласта 10 м).

Согласно приведенным данным наблюдается эмпирическая зависимость между напряжениями, формирующими тектоническую трещиноватость конкретной структуры и деформативными характеристиками состояния пород и минералов на микроуровне: при увеличении значений нормальных напряжений интенсивность рассеивания, а значит, и степень сохранности ангидритов возрастает. Для гипсов отмечается обратная зависимость. Такая закономерность обусловлена спецификой геологического развития гипсо-ангидритового массива в районе п. Полазна: первоначально в бассейне осаждался ангидрит, консолидированный затем в горную породу. Тектоническое воздымание толщи привело к гидратации верхней части ангидритов (порядка 65—70 м), но в зонах повышенных значений напряжений процесс гидратации шел медленно. В связи с этим наиболее раздробленные зоны характеризуются повышенным содержанием ангидрита (60—70%) и его лучшей сохранностью ($I=600—800$ мм²) на общем гипсовом фоне (рис. 38, II—IV).

В настоящее время бывшие зоны повышенного давления представлены зонами дробления, являющимися дренами подземных и поверхностных вод, в которых происходит гидратация ангидрита по стенкам многочисленных трещин с образованием гипса в виде корки.

Необходимо отметить, что присутствие минералов-примесей в определяемых образцах соответствует зональности интенсивности трещиноватости. В слабораздробленных зонах количество смешаннослойных минералов достигает 3—4%, в сильнораздробленных до 6% и более. Присутствие минералов-примесей в повышенном количестве в последней зоне указывает на большое количество микротрещин в образцах этой зоны (табл. 9).

Анализ рентгеноструктурных исследований распределения содержания гипса и ангидрита по глубине был приведен на образцах из ряда скважин в районе с. Усть-Кишерть (Предуралье). Несмотря на сложный фашиально-изменчивый геологический разрез отложений этого района, удалось выявить определенную закономерность изменения интенсивности рассеяния гипсов и ангидритов с глубиной:

— для ангидритов (скв. 304) интенсивность уменьшается от 800 мм² на 55,6 м до 296 мм² на глубине 122,6 м (рис. 40);

— для гипсов (скв. 307) в интервале глубин от 44 до 89 м интенсивность рассеивания колеблется в пределах от 192 до 385 мм² (84 м) (рис. 41), увеличиваясь к глубинам распространения ангидрита;

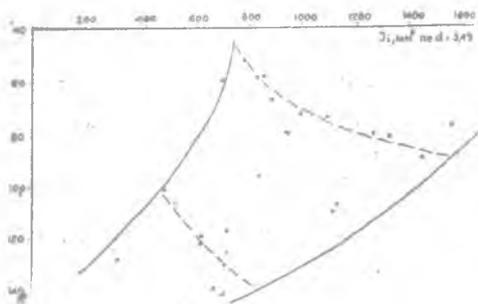


Рис. 41. Общее изменение интенсивности рассеивания (I_i) ангидрита с глубиной (h)

— общая картина изменения интенсивности рассеивания представлена на рис. 34. С глубин порядка 50 м до 95—100 м происходит общее увеличение интенсивности рассеивания от 600 до 1400 мм².

С глубины от 100 м до 140 м интенсивность также увеличивается от 300 до 850—900 мм², т. е. на более низком уровне. Общая же тенденция изменения интенсивности — к уменьшению.

Авторами была выявлена зависимость снижения интенсивности рассеивания ангидритов с глубиной от изменения (уменьшения) размеров кристаллов, образующих породу (рис. 42).

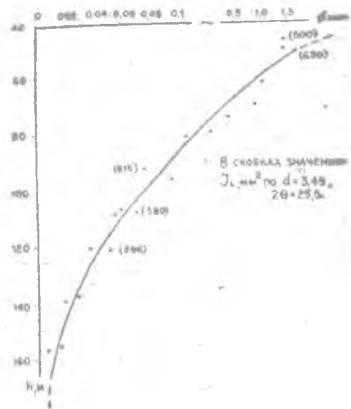


Рис. 42. Изменение размеров зерен (\varnothing) и интенсивности рассеивания ангидрита с глубиной (h)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение и картирование тектонической трещиноватости массивов растворимых горных пород для карстологических целей — сложная и трудоемкая задача. В результате исследований геолог должен получить представление о подземной и поверхностной закарстованности массива, о возможных путях движения карстовых вод, а также о размещении в массиве зон с пониженной несущей способностью. Изучение трещиноватости закарстованных массивов должно быть комплексным, на геолого-генетической основе, с учетом истории тектонических движений, структурного плана территории, литологических особенностей горных пород, их изменений.

Комплексная оценка тектонической трещиноватости закарстованного массива должна сводиться к следующему.

1. Замерить параметры трещиноватости на всех обнажениях горных пород, выполнить вычисление площадных показателей степени раздробленности массива тектоническими трещинами (количество трещин, количество пересечений трещин, общая длина трещин на единицу поверхности массива) и построение карт изолиний этих показателей.

2. Основываясь на знании истории тектонических движений и структурного плана рассматриваемой территории, используя элементы теории упругости, необходимо построить математическую модель тектонического деформирования массива и рассчитать напряжения, приведшие к его растрескиванию. Результаты расчетов представить в виде карт изолиний главных и касательных напряжений, а также в виде графиков их распределения по интересующим направлениям.

3. Произвести отбор образцов горных пород из зон с различной степенью раздробленности тектоническими трещинами, основываясь на результатах их рентгеноструктурного анализа, выявить взаимосвязь между степенью деформирования кристаллической решетки минералов, трещинной раздробленностью массива и вычисленным напряженным состоянием, которое привело к его растрескиванию.

Только такой путь исследований позволит однозначно решить вопрос о степени раздробленности массива тектоническими трещинами и построить достоверные карты их распределения, основанные на сопоставлении полевых замеров трещин в обнажениях, результатов расчета напряженного состояния массива, приведшего к его растрескиванию и степени деформированности кристаллической решетки минералов. На основе таких карт можно дать качественную оценку закарстованности массива, наметить конкретный участок для проведения детальных изысканий.

ЛИТЕРАТУРА

Анапольская Н. В., Ржевская С. И. Геометрические исследования трещиноватости горного массива по Амбарнинскому месторождению известняков. — В кн.: Развитие и совершенствование горно-металлургического производства на предприятиях Норильского промышленного комплекса. Норильск, 1977, с. 54—56.

Белоусов В. В. Тектонические разрывы, их типы и механизм образования. — Изв. АН СССР, 1952, № 7 (144), 145 с.

Белоусов В. В., Гзовский М. В. Экспериментальная тектоника. М., Недра, 1964, 119 с.

Белоусов В. В. Геотектоника. М., Изд-во МГУ, 1976, 333 с.

Болотов Г. Б., Печеркин А. И., Молоков Н. А. Использование карт трещиноватости при изучении подземного рельефа кровли карстующихся массивов. — В кн.: Инженерная геология Западного Урала: Тезисы докладов научно-технического совещания. Пермь, 1980, с. 21—22.

Болотов Г. Б., Печеркин И. А., Печеркин А. И. К вопросу о геометрической интерпретации диссонантного рельефа Полааненского закарстованного массива. — В кн.: Карст Нечерноземья: Тезисы докладов Всесоюзного совещания. Пермь, 1980, с. 81—85.

Болотов Г. Б., Печеркин А. И. Использование ЭВМ при инженерно-геологическом изучении тектонической трещиноватости карстующихся массивов. — В кн.: Геология и минерально-сырьевые ресурсы Западно-Сибирской плиты и ее складчатого обрамления. Тюмень, 1980, с. 144—146.

Боревский Б. В., Хордикийен М. А., Язвин Л. С. Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М., Недра, 1976, 248 с.

Варга А. А. О генетическом подходе к инженерно-геологическому изучению трещиноватости. — В кн.: Научные тр. Гидропроекта имени С. Я. Жука. Проблемы повышения эффективности и качества изысканий для гидротехнического строительства. М., 1979, с. 56—64.

Гудилин И. С., Комаров И. С. Применение аэрометодов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. М., Недра, 1978, 319 с.

Жемочкин Б. Н. Теория упругости. М., Госстройиздат, 1957, 380 с.

Жуков В. Т., Сербенюк С. Н., Тикунов В. С. Математико-картографическое моделирование в географии. М., Мысль, 1980, 224 с.

Золотарев Г. С., Калинин Э. В., Минервин А. В. Учебное пособие по инженерной геологии. М., Изд-во МГУ, 1970, 383 с.

Калачева В. Н., Киоринг А. Д. Закономерности развития трещиноватости на структурах различного типа (в складчатых и платформенных областях). — В кн.: Трещинные коллекторы нефти и газа и методы их изучения. Тр. ВНИГНИ. Л., Недра, 1965, вып. 242.

Королев А. В. Методы изучения мелкой трещиноватости горных пород. — Тр. Института геологических наук АН УзССР, 1951, вып. 6, с. 166—193.

Кригер Н. И. Трещиноватость и методы ее изучения при гидрогеологической съемке. М., Металлургиздат, 1951, 139 с.

Леонов М. П. О построении и использовании карт интенсивности трещиноватости пород скальных оснований гидротехнических сооружений. — Тр. Гидропроекта, 1976, вып. 50, с. 144—157.

Лонсдейл К. Кристаллы и рентгеновские лучи. М., Иностранная литература, 1952, 202 с.

Методические рекомендации по использованию аэрофотоматериалов при изучении карста Украины. Симферополь, 1980, 42 с.

Михайлова А. В. Моделирование процессов формирования тектонических структур при некоторых механизмах деформирования. — В кн.: Поля напряжений и деформаций в литосфере. М., Наука, 1979, с. 245—251.

Мюллер Л. Механика скальных массивов. М., 1971, 252 с.

Невский В. А. Классификация трещин по типу разрушения горных пород. — Изв. вузов, сер. Геология и разведка, 1963, № 12, с. 8—15.

Невский В. А. Трещинная тектоника рудных полей и месторождений. М., Недра, 1979, 224 с.

Нейштадт Л. И. Методы геологического изучения трещиноватости горных пород при инженерно-геологических исследованиях. М., Госэнергиздат, 1957, 127 с.

Нейштадт Л. И., Пирогов И. А. Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. М., Энергия, 1969, 182 с.

Пермяков Е. Н. Тектоническая трещиноватость Русской платформы. — В кн.: Материалы к познанию геологического строения СССР. М., Изд-во Моск. об-ва испытателей природы, 1949, вып. 12, с. 3—213.

Пермяков Е. Н. Основы методики использования трещиноватости горных пород для изучения тектоники платформенных областей. — В кн.: Основные результаты изучения геологии и нефтеносности Русской платформы. М.; Л., Гостоптехиздат, 1951, с. 122—158.

Пермяков Е. Н., Каравашкина Ю. А. Поиски и изучение платформенных структур методами исследования тектонической трещиноватости. — Булл. Моск. об-ва испытателей природы, геол. отдел, 1953, т. XXVIII, вып. 6, с. 57—71.

Пирогов И. Я., Ярцев Н. А. Кусковатость зерна как показатель трещиноватости горных пород. — Тр. Гидропроекта. Л., 1972, вып. 1, с. 24—30.

Рац М. В. К вопросу о зависимости густоты трещин от мощности слоя. — Докл. АН СССР, т. 144, № 3, с. 622—625.

Рац М. В., Чернышов С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М., Недра, 1970, 160 с.

Рац М. В., Иванова Н. Б., Русин Г. Л., Слепцов Б. Г. Автоматизированная система обработки данных (АСОД) по трещиноватости горных пород для инженерно-геологических целей. — Инженерная геология, 1979, № 5, с. 78—89.

Рекомендации по изучению трещиноватости горных пород при инженерных изысканиях для строительства. М., Стройиздат, 1973, 39 с.

Ржевский В. В., Ямщик В. С. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. М., 1973, 271 с.

Розанов Л. Н. Физико-механические условия образования тектонических структур платформенного типа. Л., Недра, 1965, 180 с.

Руководство по рентгеновскому исследованию минералов. Л., Недра, 1975, 86 с.

Салло Р. Н. Трещиноватость, зоны дробления углевмещающих пород Аладано-Чульманского района и их учет при инженерно-геологических исследованиях. — Тр. Всесоюз. НИИ горной механики и маркшейдерского дела, 1979, с. 112—116.

Смирнов Г. А. О некоторых закономерностях в развитии трещин отдельностей. — Изв. АН СССР, сер. геол., 1949, № 3, с. 99—101.

Соколов Д. С. Основные условия развития карста. М., Госгеолтехиздат, 1962, 321 с.

Сорокин А. А. Опыт применения метода воздушного определения трещиноватости (ВОТ). — Тр. Гидропроекта, 1978, № 66, с. 62—65.

Сычева-Михайлова А. М. Некоторые результаты моделирования глыбовых платформенных складок. — Советская геология, 1958, № 9, с. 13—25.

Торсуев Н. П., Левин С. А. Современные карстовые морфоскульптурные новообразования на севере Русской равнины. — Изв. Всесоюз. географического общества, 1977, т. 109, вып. 1, с. 90—95.

Чарушин Г. В. Количественные параметры трещиноватости горных пород в инженерно-геологических исследованиях (к теоретической постановке вопроса). — В кн.: Гидрогеология и инженерная геология Поволжья. Казань, 1967, вып. 17, сб. 1, с. 129—137.

Черткова Е. И. Некоторые результаты моделирования тектонических разрывов. — Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1950, т. 14, вып. 5, с. 19—24.

Чернышев Н. И. Тектоническая трещиноватость верхнепермских пород Пермско-Сарапульского Прикамья. — Изв. вузов, сер. Геология и разведка, 1959, № 12, с. 26—30.

Шишаков Н. А. Основные понятия структурного анализа. М., АН СССР, 1961, 182 с.

Brown E. T., Harper T. R., Hinds D. D. Discontinuity measurement using the borehole impression probe, a case study. IV-th Int. Congr. Rock Mech. Montreux, 1979, Proc., vol. 2, Rotterdam, 1979, p. 57—62.

Deere D. U. Geological consideration of rock mechanics in engineering practice. London, 1969.

Goodman R. E., Smith H. R. RQD and fracture spacing. — Journal of geotechnical engineering division. Proc. of the ASCE, 1980, vol. 106, N 6TZ, p. 192—193.

Hansagi I. A method of determining the degree of fissuration of rock. Int. Journal of Rock Mech. and Mining Sci., 1974, vol. 11.

Hoek E., Bray J. W. Rock slope engineering. The Institution of Mining and Metallurgy London, 1973.

Hudson J. A., Priest S. D. Discontinuities and rock mass geometry. — Int. Journal of Rock Mech. and Mining, 1979, vol. 16, N 16, p. 339—362.

Kalhawy F. H. Geomechanical model for rock foundation settlement. — Journal of the geotechnical engineering division. Proc. of the ASCE, 1978, vol. 104, N 6TZ, p. 2111—228.

Lokin P., Evremovic D. Metodologija ispitivanja ispucaosti neotkrivenih shenskih masa. — Zbornik radova Rudarsko — Geoloski facultet Univerziteta u Beogradu, 1977, t. 20, s. 311—334.

Lokin P., Loban M. A new method of estimating rock mass fissuration from standard boreholes cores. — 3 rd Int. Congr. of Int. Assoc. of Engineering Geologists — Madrid, 1978.

Matula M., Holzer R. Inzinierskogeologická tipologická klasifikcia horninových masivov. — Inzinierskogeol. stud. horninov. prostredi r geodyn. procesy, 1979, s. 55—76.

Molek H., Reuter F. Probleme bei der Erfassung repräsentativer Klüftparameter als Grundlage für Standsicherheit-sbeurteilungen von Felsboschungen. — Zeitschrift für angewandte Geologie, 1979, Bd. 25, N 40, s. 494—497.

Pechorkin I. A., Pechorkin A. I., Bolotov G. B. Formation of the relief of the underground surface. — European conf. of speleology. Solja, Bulgaria, 1980.

Priest S. D., Hudson J. A. Discontinuity spacing in rock — Int. Journal of Rock Mech. and Mining Sci., 1979, vol. 16, N 5, p. 135—148.

Rocha M., Barrososo M. Some application of the new integral sampling method in rock masses. — Symposium of Rock Mech. Nansy, 1971.

Sharpe W., Parizek R. Water well location by fracture trace mapping. — Water Well Journall, 1979, vol. 33, N 11, p. 38—41.

Tourenq C., Formaintroux., Denis A. Propagation des ondes et discontinuite des roches. — Symposia dell Societe Internationale de Mechanique des roches, Nansy, 1971.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Методика полевого изучения трещиноватости для карсто-логических целей	8
§ 1.1. Краткий обзор существующих методов изучения и изображения трещиноватости горных пород	9
§ 1.2. Методика изучения тектонической трещиноватости в полевых условиях	36
§ 1.3. Камеральная обработка результатов полевого изучения тектонической трещиноватости	40
Глава 2. Математическое моделирование напряженного состояния платформенных структур для изучения их трещиноватости	48
§ 2.1. Краткий обзор методов моделирования трещиноватости массивов горных пород	48
§ 2.2. Математическое моделирование состояния растрескивания брахиантиклиналей	51
Глава 3. Изучение тектонической трещиноватости по результатам рентгеноструктурного анализа горных пород	72
Заключение	81
ЛИТЕРАТУРА	82