

Глава 3.

Изучение трещинной тектоники

Трещинная тектоника во многих случаях является определяющим фактором локализации прежде всего эндогенных, но нередко и экзогенных месторождений. Если крупные разрывные нарушения обычно являются рудоподводящими, то мелкая трещиноватость приобретает основное значение при формировании рудолокализирующих структур. Разломы также могут являться рудолокализирующими структурами, например, для жильных месторождений, рудоносных даек, линзообразных метасоматических тел или зон дробления. Линейные зоны трещиноватости, развитые вдоль разрывных нарушений, сети трещин в горизонтах хрупких пород, в штоках малых интрузий или неках определяют их повышенную проницаемость. Они могут быть рудовмещающими структурами для крупных по запасам штокверковых месторождений, в т.ч. порфировых. Нередко зоны трещиноватости и узлы их пересечения служат также рудоподводящими структурами. Установлено, например, что к ним приурочены многие кимберлитовые трубки, прорывающие кристаллические породы фундамента и мощные отложения чехла платформ в этих ослабленных участках коры.

Изучение закономерностей распределения, последовательности образования и ориентировки различных типов трещин на площади изучаемого рудного объекта оказывает существенную помощь геологам при анализе истории формирования рудоносных структур и, в конечном счете, в выявлении закономерностей размещения оруденения.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВ ТРЕЩИН

Трещины представляют собой поверхности раздела (нарушения сплошности строения) в твердом теле. В процессе статистического изучения и картирования трещинной тектоники всегда определяются типы трещин. Классификация типов трещин производится по их размерам (длине), форме, морфогенетическим и генетическим особенностям, возрастным взаимоотношениям, ориентировке по отношению к структурным элементам складок, связи с разрывными нарушениями или со строением интрузивных массивов. Геолого-генетическая характеристика и классификация типов трещин рассмотрены В.А. Невским в работе «Трещинная тектоника рудных полей и месторождений» (1979 г.).

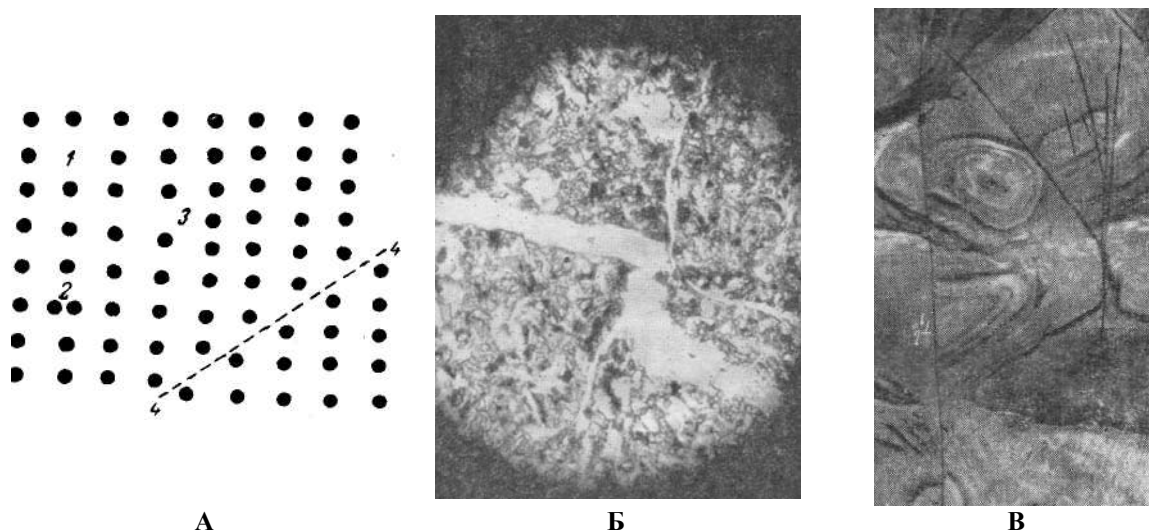
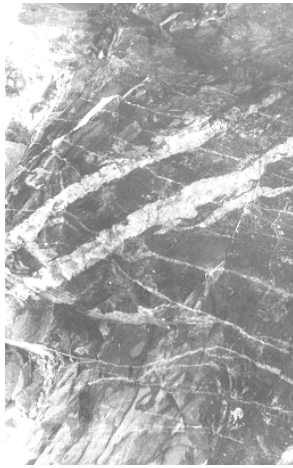


Рис. 3.1. Примеры трещин различных размеров

А- дефекты решетки (по Иденблему, Орлову); Б - микротрещины порфировом базальте, ув.70 (по Шаумяну); В- тектонические нарушения в складчатых толщах полуострова Челекен. (аэрофотоснимок)



А



Б



В



Г

Рис. 3.2. Примеры распространенных типов трещин в породах.

А: трещины отрыва (мощные прожилки в центре) и скалывания (тонкие прожилки) в сланцах вольфрамового месторождения Верхние Кайракты (Ц. Казахстан); размеры площадки 0.8 x 0.4м. Б: две генерации вольфрамит-кварцевых прожилков в трещинах скалывания в «фестончатых» микрогранитах месторождения Селтей (Ц. Казахстан). Фестончатые кварцевые прожилки фиксируют зоны расслоения вязкого расплава и ориентируются по направлению его движения. В: пересечение разновозрастных прожилков в трещинах скалывания в алевролитах (вольфрамовый штокверк месторождения Батыстау, Ц. Казахстан) - верхний снимок; начальный этап слияния кулисно расположенных трещин скалывания в песчанике, выполненных шеелит-кварцевыми прожилками (месторождение Акбиик, Ц. Казахстан) - нижний снимок. Г: Трещина отрыва в гранитном парапете смотровой площадки на Воробьевых горах, возникшая вследствие оползневых просадок.

По размерам трещины классифицируются в зависимости от их протяженности (длины) (рис.3.1, 3.2):

- дефекты в кристаллической решетке минералов или зародышевые трещины (длина менее $n \cdot 10^{-2}$ мм);
- микротрещины ($n \cdot 10^{-2}$ мм – n см);
- макротрещины ($n \cdot 10$ см – $n \cdot 10$ м);
- локальные разрывные нарушения ($n \cdot 100$ м – первые км);

На региональном и планетарном уровне можно рассматривать как трещинные структуры в земной коре и верхних частях мантии региональные и глубинные разломы, включая трансконтинентальные линеаменты.

Иногда считается, что разрывные нарушения всегда сопровождаются видимыми смещениями их бортов, а трещины – практически нет. Однако величина смещения по трещинам зависит от их размеров и типов. Существуют также трещины отрыва и разломы типа раздвигов. Продольные смещения бортов у них отсутствуют, а имеет место поперечное раздвижение. Во всех случаях вдоль поверхностей трещин происходит нарушение первичных связей между структурными элементами пород или минералов (ячейками кристаллической решетки минералов, контактов между зернами минералов и т.д.).

Необходимо отличать трещины от плоскостных структур минералов и пород, которые в отличие от них не представляют собой поверхности нарушения внутренних связей в твердом теле. В плоскостях спайности в минералах сила связей максимальна, а в поперечном направлении – минимальна (но в отличие от трещин эти связи не нарушены). В тонкой плоскостной структуре кливажа течения вследствие пластической деформации возникают плоскости скольжения, которые ослабляют связи между частицами породы по этим направлениям. При дальнейшем развитии процесса могут возникнуть мелкие трещины. Ослабленные направления в минералах и породах благоприятны для более быстрого развития диффузионного метасоматоза. В отличие от них, трещины служат каналами фильтрации для растворов и газов, которая на несколько порядков увеличивает скорость переноса компонентов по сравнению с диффузией.

М.А. Садовским (1995) на основе статистических исследований выявлено дискретное распределение трещин по их размерам в земной коре на разных масштабных уровнях. Теоретически, соседние по размерам классы трещин, возникающие в некотором объеме пород, различаются по средней длине примерно 2.7 - 3 раза. Однако в реальных массивах отдельные их классы могут отсутствовать, что связано с конкретными геологическими условиями их формирования. Например, закономерное уменьшение размеров трещин наблюдается при переходе от батолитов к малым интрузиям и далее к субвулканическим образованиям. С уменьшением зернистости пород размеры трещин также снижаются, при этом частота распространения (плотность сетей трещин) обычно возрастает. Так, в крупнозернистых гранитах-рапакиви расстояние между трещинами на Карельском перешейке обычно достигает 5-7 м, а в средне-мелкозернистых гранитах – 1-3 м.

Значительная часть тектонических трещин возникает в процессе подготовки и возникновения землетрясений. По данным исследования очагов землетрясений (М.В. Гзовский, 1975) энергия землетрясений пропорциональна третьей степени длины разрыва. При этом число возникающих разрывов (n) и их длина (l) находятся в обратной зависимости. Чем более крупные возникают разрывы (трещины), тем число их в данном блоке земной коры меньше. Установлена следующая зависимость между этими величинами:

$$\Delta \lg n = -1.2 \Delta \lg l$$

По форме выделяются прямолинейные, кольцевые (дугообразные) и трещины сложной формы (разветвленные, извилистые).

Прямолинейные трещины типичны для зон разрывных нарушений и складок, кольцевые типичны для интрузивных массивов и вулкано-плутонических структур, а также брахикупольных структур в чехле над соляными диапирами, неглубоко залегающими интрузиями. Трещины сложной формы обычно возникают как комбинация простых форм, а также в ходе деформации отрыва в толщах неоднородного строения.

Кольцевые трещины также подразделяются на цилиндрические и конические (рис.3.3). Кольцевые трещины отрыва возникают над внедряющимися интрузивными массивами, в процессе просадок кровли над магматическими очагами на этапе завершения активной фазы вулканической деятельности и кальдерообразования, контракции плутонов при их застывании. В одних случаях это могут быть кольцевые сбросы цилиндрической формы. Конические трещины характерны для этапа внедрения магмы и взрывных процессов в трубках взрыва (кимберлиты, некоторые щелочно-ультраосновые массивы с карбонатитами). В этом случае возникает коническая плоскость действия максимальных касательных напряжений с общим центром в очаге взрыва на глубине или осевой части магматического очага.

По морфогенетическим признакам выделяются трещины отрыва, скалывания и сплющивания. Каждый из этих типов отличается как по морфологии, так и по механизму образования (рис. 3.2 А, Б, В).

Трещины отрыва (отрывы) имеют относительно небольшую длину, неровные, часто зазубренные поверхности, характерным признаком которых является то, что выступы поверхности одного борта таких трещин совпадают с углублениями второго. Это связано с тем, что их образование происходило путем разрыва и раздвижения бортов перпендикулярно их простиранию, т.е. вдоль оси максимального растягивающего напряжения σ_1 . Поэтому такие трещины имеют большую по сравнению с другими амплитуду раскрытия. Другим характерным их признаком является сильная зависимость распространения от физико-механических свойств пород, что приводит к их ветвлению и извилистости, а также быстрому выклиниванию при переходе в более пластичные или прочные толщи. Одним из распространенных процессов их образования является взрывной. Это может быть также гидроразрыв. Сеть возникающих трещин отрыва в этом случае в основном повторяет разноориентированные ослабленные участки между зернами минералов и их агрегатами в породе, зоны контактов между слоями, линзами и т.п. С глубиной распространение трещин отрыва резко снижается в связи с возрастающим всесторонним давлением. Поэтому наиболее часто они встречаются в эпизоне, постепенно уступая место в мезозоне трещинам скалывания.

Трещины скалывания (сколы) отличаются от первых значительно большей длиной, ровными притертыми контактами бортов, на поверхностях которых (так называемых зеркалах скольжения) часто отмечаются характерные удлиненные выступы - штрихи скольжения и углубления - борозды скольжения (рис. 3.2 Г). Острый конец борозды и тупой конец штриха направлены в сторону смещения противоположного (обычно отсутствующего) борта разлома или трещины. Иногда трещины заполнены тонкодисперсным материалом – глиной трения. Эти признаки свидетельствуют о том, что сколы возникают при относительных смещениях их бортов в противоположных направлениях под действием максимальных касательных напряжений, превышавших в момент их образования предел прочности породы на сдвиг. При последующих подвижках обычно происходит подновление имеющихся сколов, а иногда и трещин отрыва, по которым уже происходят продольные смещения. В этих случаях наибольшие для данного направления касательные напряжения обычно значительно меньше максимальных касательных и превышают только трение на поверхности трещины. При этом наличие глины трения и воды значительно сни-

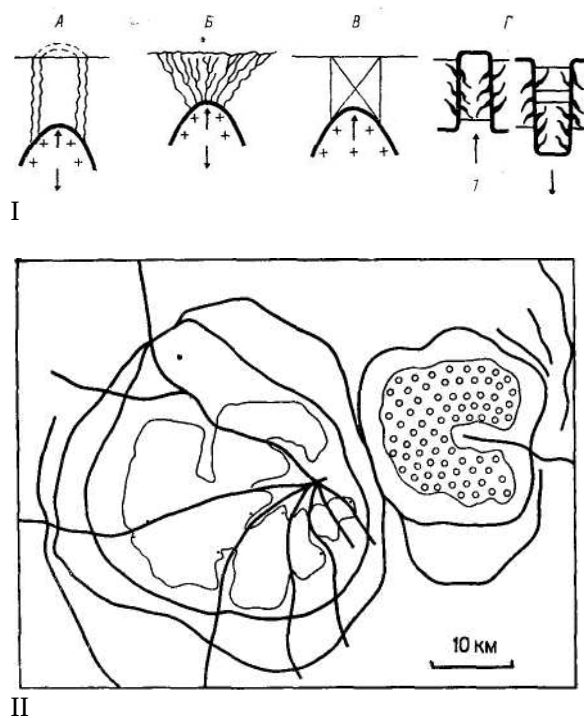


Рис. 3.3. Кольцевые трещины и разрывные нарушения.

I - Образование трещин (по В. А. Невскому): А - цилиндрических отрыва; Б - центриклинальных конических; В - центриклинальных скалывания; Г - оперяющих конических трещин отрыва: 1-центриклинальных (при возникновении кольцевого горста); 2- периклинальных (при возникновении кольцевого грабена).

II - Схематическая геологическая карта Хибинского (точечный крап) и Ловозерского (кружки) массивов на Кольском полуострове (по данным Ф.М. Онохина, 1975). Массивы оконтурены несколькими линиями периферических сбросов во вмещающих породах В Хибинском массиве наблюдается пучок радиальных сбросов, положение которых показывает, что тектоническое ядро массива располагается эксцентрично. К узлу их пересечения приурочен карбонатитовый шток.

жает трение. Благодаря этому крупные блоки пород в зонах покровов могут смещаться вследствие гравитационных сил.

Зависимость сколов от типа пересекаемых пород минимальна. Иногда можно наблюдать пересечение ими гальки в конгломератах без признаков выклинивания. Поверхности сколов часто слабоволнисты. Это связано с определенным влиянием упруго-пластических свойств пород. При переходе из одной породы в другую направление трещины меняется из-за различной величины угла скалывания в контактирующих породах. Кроме того, поскольку крупные сколы обычно возникают в результате слияния мелких трещин, а мелкие сколы располагаются кулисообразно по отношению друг к другу, при их слиянии возникает волнистость на поверхности магистральной трещины (рис. 3.2 В).

Более редкий тип трещин - *трещины сплющивания*, которые обычно возникают вдоль контактов отдельных прослоев с разным составом и вязкостью или вдоль метаморфогенной полосчатости и кливажа течения. По существу это тоже трещины скалывания, возникшие вдоль границ отдельных зон с различной скоростью ламинарного пластического течения пород в условиях сильного тектонического стресса в зонах смятия и напряженной складчатости. Они ориентированы перпендикулярно напряжению максимального сжатия σ_3 .

Перпендикулярно сжатию также ориентированы основные плоские поверхности стиллолитовых швов, которые по виду напоминают сейсмограммы. На «пиках» таких зигзагообразных трещин возникают зубцы, где происходит отложение растворенного под действием давления вещества пород. Оно выносится с плоских участков швов при росте растворимости компонентов в зоне сжатия.

В генетическом отношении все трещины разделены В.А. Невским на две группы – *эндокинетические* и *экзокинетические*. В первую группу входят трещины различных типов, образование которых обусловлено внутренними источниками напряжений. Это *литогенетические* трещины отрыва, возникающие при усыхании илистых отложений; от-

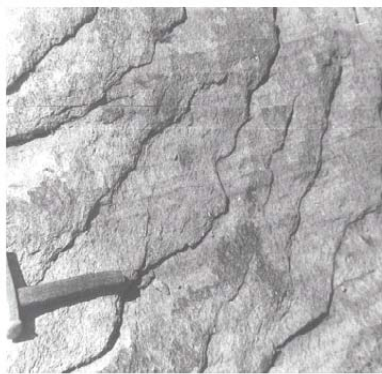


Рис. 3.4. Пологие контракционные трещины отрыва в гранитах массива Кызылтау (Ц, Казахстан).

рывные трещины *выветривания*; трещины *теплового расширения*, связанные с объемным расширением пород при прогреве их магматическими телами; трещины *контракции*, возникающие перпендикулярно оси растяжения при охлаждении и сжатии магматических пород. Последние часто представляют собой пологие трещины отрыва в эндоконтактах интрузий, что связано с более быстрым остыванием внешних частей массивов. Трещины контракции также образуют вертикальные полигональные сети в покровах базальтов и некоторых риолитов (рис. 3.4, 3.5 А, Б). К этой группе можно отнести и *трещины литостатической разгрузки*.

Вторая группа объединяет трещины, образованные в результате внешнего силового воздействия – *тектонические* и *трещины интрузивного давления*. Тектонические трещины распространены наиболее широко. Среди них можно особо отметить *оперяющие* сколы и отрывы, закономерно ориентированные по отношению к разломам, в связи с подвижками по которым они и возникают. Это сопряженные сколы Ридделя, одни из которых почти параллельны, а другие (более редкие) почти перпендикулярны плоскости сместителя. Трещины отрыва здесь направлены под острым углом к сместителю в сторону смещения блока, в котором они находятся (рис. 3.6). Кроме того, выделяются тектонические трещины, связанные со складками. В зависимости от их ориентировки по отношению к осям складок различают продольные, поперечные и диагональные трещины.

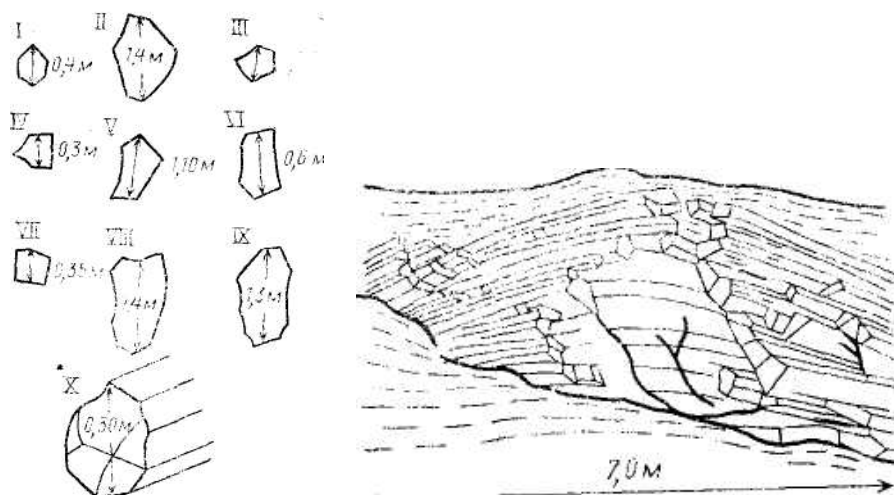


Рис. 3.5 - А. Столбчатая отдельность в вулканических покровах: *а* — форма и размеры (м) горизонтального сечения столбов; *б* — изгиб длинных осей столбов в покрове спилитов (по В. А. Невскому, 1979)

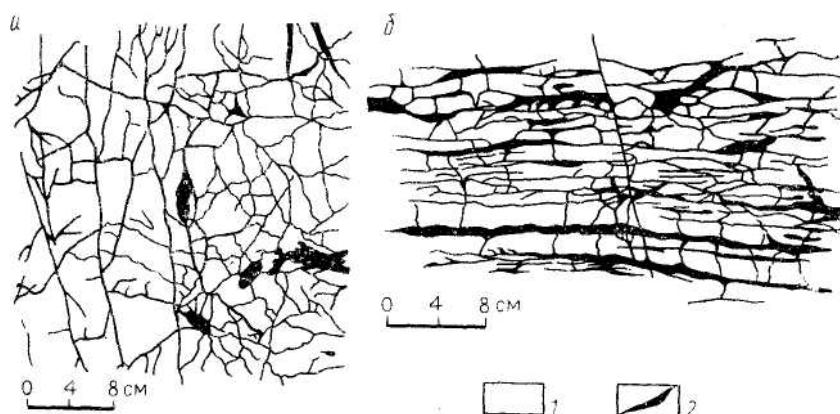


Рис. 3.5 - Б. Трещины усыхания и тонкослоистых известняках рифея - нижнего кембрия, залеченные аргиллитами: *а* — план (в плоскости пласта известняков), *б* — разрез. 1 — известняки, 2 — аргиллиты

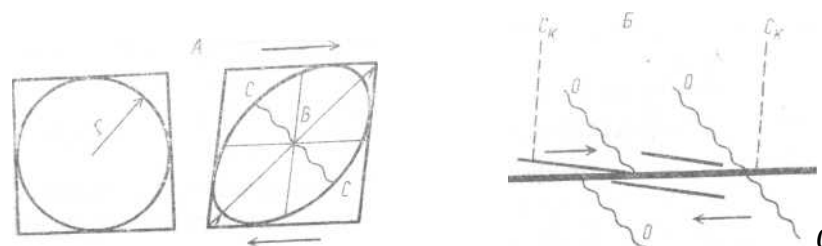


Рис. 3.6. Деформация «сдвига» квадрата выделенного в изотропной породе. А — положение осей главных напряжений; Б — положение опоряющих трещин скалывания (C_k) и отрыва (O) в зоне сдвига (по Л. И. Лукину)

Среди тектонических трещин особое значение имеют *сопряженные трещины скалывания*, закономерно ориентированные по отношению к осям главных нормальных напряжений. Они возникают одновременно вдоль плоскостей действия максимальных касательных напряжений, ориентированных под углами около 45° (часто от 30° до 50°) к оси максимального сжатия. Признаками таких трещин является соразмерность, один и тот же

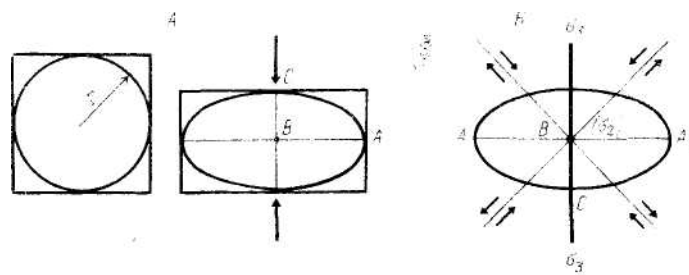


Рис.3.7. Образование сопряженных трещин скалывания при сжатии ($\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$).

A — деформация кубика упругого материала под воздействием сжатия (показано стрелками); *B* — эллипсоид деформации (сплошной контур), проекция на площадь, параллельную большой (*A*) и малой (*C*) осям деформации; средняя ось *B* перпендикулярна плоскости чертежа. Стрелки показывают направления перемещений по трещинам скалывания

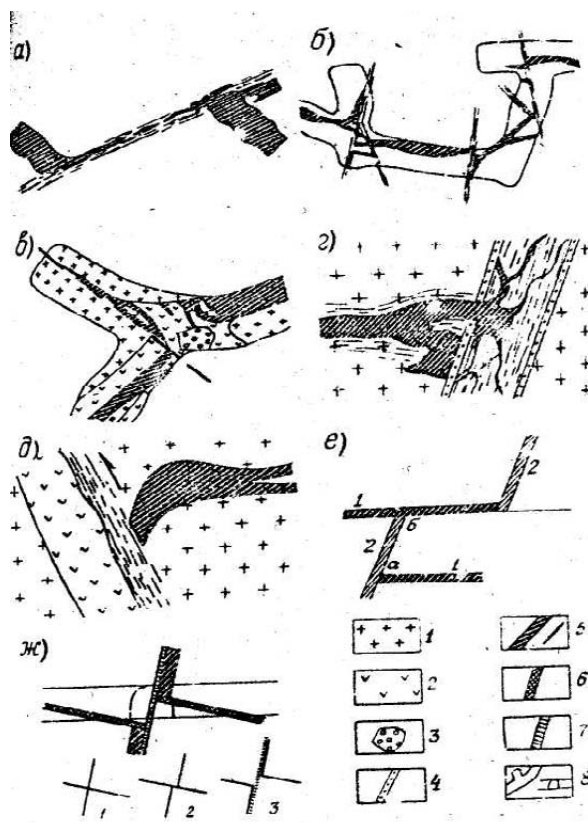


Рис.3.8 (А). Признаки различных возрастных взаимоотношения трещин.

а- разлинзование рудных тел в зоне дорудного нарушения; б - ветвление рудной жилы в зоне дорудного разлома (по ю.в. Лиру); в - увеличение мощности рудного тела в зоне дорудного разлома (по А.П. Смолину); г - зливообразное развитие рудной зоны в пределах раннего нарушения; д - изгиб и срезание рудного тела пострудным разломом; е - повторные подвижки по стадиям минерализации; ж - повторные смещения и приоткрывания рудовмещающих трещин (по А.В. Дружинину)

1- гранитоиды» 2 - основные породы; 3 - кварц; 4 - тектоническая глина; 5 - рудные жилы, прожилки, линзы; 6 - пологие жилы; 7 - жилы халцедоновые; 8 - горные выработки.

(в одной породе на площадке) близкий к прямому угол пересечения, наличие микросмещений, фиксируемых по бороздам скольжения на их плоскостях. При этом всегда направление таких смещений одинаково в противоположных блоках (квadrантах), ограниченных трещинами. В квадрантах сжатия смещения направлены к линии пересечения, а в смежных с ними квадрантах растяжения — от нее (рис. 3.7). Ориентировка сопряженных сколов, возникших в одном поле напряжений и наблюдаемых в одном и том же блоке пород одного состава, сохраняется постоянной.

В природе далеко не всегда возникают две сопряженные системы трещин близкой плотности. Нередко одна из них (с большей плотностью) образуется несколько раньше и может пересекать вторую. Это связано с неоднородностью строения самого блока пород (ориентированные текстуры, наличие более ранних систем трещин, которые могут подновляться). В складках продольного изгиба линия пересечения таких сопряженных сколов, иногда переходящих во взбросы, параллельна оси складки. Вдоль зоны сдвига также часто одна из систем выражена лучше, что связано с кинематикой смещений по нему.

По *последовательности образования* трещины разделяются на ранние, одновременные и поздние. Основным критерием отнесения трещины к более раннему этапу является смещение ее более поздней. При выполнении трещин жильным или магматическим материалом можно использовать большое число различных признаков для установления последовательности их образования и подновления (рис. 3.8 А, 3.8 Б).



Рис. 3.8 (Б). Зональное строение кварцеворудного прожилка. Ранняя генерация (светлое) рассечена трещиной в осевой зоне, выполненной мусковитом (м-е Акбиик, Ц. Казахстан).

Одновременно образовавшиеся трещины при взаимных пересечениях не смещают друг друга. Обычно такие трещины образуют характерные сети (как одно-двухсистемные, так и полигональные). Это, например, устанавливается для сопряженных, контракционных, оперяющих трещин, трещин усыхания.

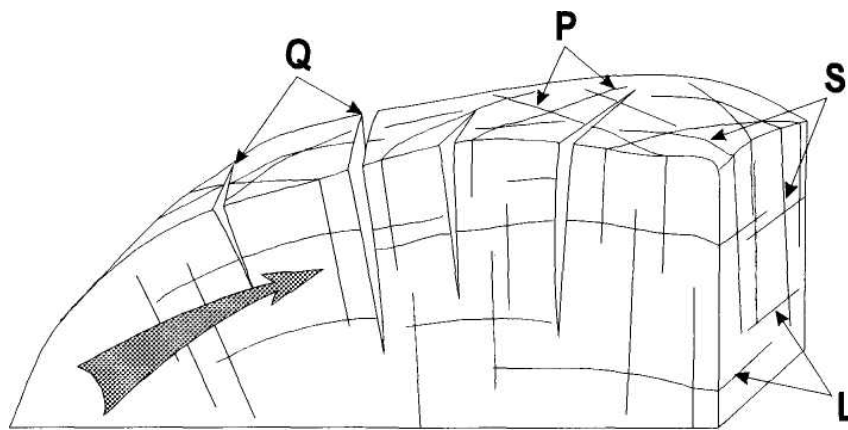


Рис.3.9. Системы трещин, возникающие при внедрении интрузивного массива (стрелка показывает направление внедрения массива, параллельно которому ориентируются линейные текстуры). Q - поперечные трещины (перпендикулярно к возникающим линейным текстурам); S - продольные (крутопадающие и параллельные в плане линейным текстурам); L - пологие, или пластовая отдельность (пологие трещины, параллельные линейной текстуре); P -диагональные (делят угол между Q и S).

По положению трещин в интрузивных массивах и их ориентировке Г. Клоосом (1930 г.) выделено несколько систем или типов трещин (рис. 3.9.). Продольные трещины (S), и поперечные (Q) крутопадающие пологие (L) образуют характерную ортогональную сеть, разбивающую массив на отдельные прямоугольные блоки. Диагональные трещины (P) обычно связаны с поздними тектоническими нарушениями или с общим тектоническим сжатием застывшего массива. Продольные трещины обычно наследуют линейные (полосчатые) текстуры, возникающие при внедрении, а пологие возникали в результате контракции как трещины отрыва.

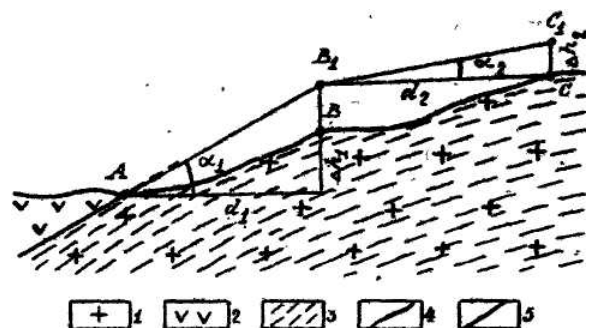


Рис. 3.10. Схема реставрации палеокровли интрузива (по В.Ф. Николаеву) 1 - граниты; 2 - вмещающие породы; 3 - пологие трещины контракции 4 - поверхность рельефа; 5 - контакт массива.

Картирование пологих контракционных трещин на частично эродированных массивах позволяет определять степень его эрозионного среза (рис. 3.10). С учетом закономерного положения этих трещин параллельно контакту массива по элементам ориентировки сохранившихся их систем в выходах массива можно восстанавливать пространственное положение ранее уничтоженных эрозией участков его контакта. Путем интерполяции определяется уровень среза вскрытых эрозией частей массива.

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕЩИННОЙ ТЕКТониКИ

Анализ трещинной тектоники является структурным методом, по существу относящимся как к аналитическим, так и к картировочным. Он проводится в комплексе с общим изучением геологической структуры рудных полей и месторождений (детальной геологической съемкой, различными видами фациального анализа, структурно-петрологическим, структурно-петрофизическим, структурно-морфологическим и другими типами структурного анализа) и включает ряд этапов или отдельных методов изучения трещиноватости: *метод беглого изучения и зарисовок, статистический и картировочный*.

Метод беглого изучения и зарисовок предшествует остальным. Он позволяет получить предварительное заключение о типах трещин, их преобладающих ориентировках и связи с теми или иными геологическими структурами и породами. На отдельных точках наблюдения производится по 5-10 замеров трещин преобладающих ориентировок, устанавливаются их тип, возрастные взаимоотношения, плотность (количество трещин на один погонный или квадратный метр), минеральное выполнение и связь с геологическим строением данного участка (приуроченность к тектоническим нарушениям, складкам, отдельным пластам и толщам или их контактам, рудным телам и т.д.). Эти наблюдения сопровождаются зарисовками в полевом дневнике в соответствующем масштабе, на которых показывается морфология трещин, структуры взаимного пересечения, характер выполнения, ориентировка, геологическое строение данного обнажения и т.д..

Картировочный метод включает сбор аналогичной информации, но уже по определенной сети наблюдений, куда входят и имеющиеся горные выработки и керн скважин. На каждой точке наблюдения или интервале керна производится замер ориентировки трещин и прожилков (в керне – относительно его оси), минеральный состав прожилков, их мощность. Замеряются все имеющиеся трещины и прожилки. После этого определяется размер (площадь или длина) участка или интервала замеров (обычно несколько квадратных или погонных метров) для расчета структурных параметров зон трещиноватости или штокверка. В дневнике составляется таблица, в столбцах которой записываются: порядковый номер замера – азимут падения – угол падения – мощность прожилка (амплитуда раскрытия трещины) – примечание. В примечании отмечается состав минерального выполнения (в условных обозначениях), тип трещины, ее взаимоотношения с другими трещинами (пересечения), зональность строения прожилка. Последнее имеет место при повторных раскрытиях трещин, когда состав выполнения также изменялся. Иногда состав может не меняться, но структура (зернистость, ориентировка зерен и т.п.) изменялась от одной стадии выполнения к другой. Здесь может использоваться метод зарисовок.

По полученным данным производится расчет структурных параметров сети трещин или штокверка. *Сеть трещин* – это их совокупность в пределах рассматриваемой площади или блока пород, интрузива в целом или отдельной его фазы, пласта или толщи осадочных отложений и т.д. Сети трещин разделяются на типы по степени связи трещин между собой и по характеру распределения в пространстве (рис. 3.11 А, Б).

По первому признаку выделяются *непрерывные, промежуточные и прерывистые* сети трещин. В непрерывных системах каждая трещина имеет хотя бы одно пересечение с другой. В прерывистых сетях пересечений трещин не отмечается. В промежуточных типах только отдельные трещины имеют видимые пересечения с другими.

По второму признаку выделяются *многосистемные, односистемные и хаотические* сети трещин. Иногда отдельно также рассматриваются *полигональные сети*. Система трещин (прожилков) – это совокупность трещин с близкой ориентировкой в данном блоке (массиве) пород, т.е. таких трещин, которые почти параллельны друг другу. В системах кольцевых (дуговых) и радиальных трещин их ориентировка меняется в соответствии с центральной симметрией. Если в сети трещин выделяются ряд систем, то эта сеть является многосистемной. Односистемная сеть – это линейная зона трещиноватости или линейный штокверк, часто связанные с тектоническими нарушениями обычно сдвигового типа (зоны расщепления). В хаотической сети системы трещин отсутствуют. Хаотические сети могут возникать в зоне сложного пересечения разрывных нарушений, проявлений взрывных процессов.

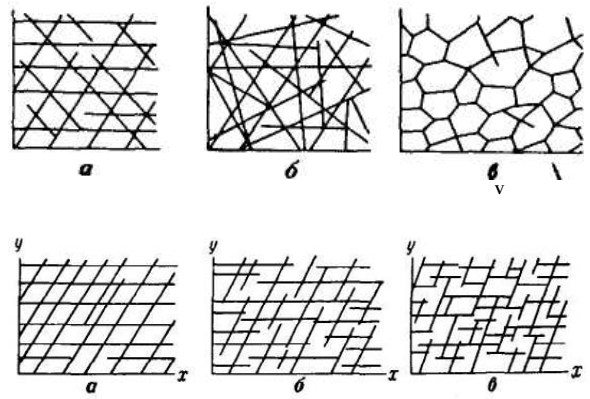


Рис. 3.11 (А, Б). Типы сетей трещин:

А: а - системная, б - хаотическая, в - полигональная.

Б: системные сети трещин: а - непрерывная, б - промежуточная, в - прерывистая

Полигональные сети связаны с определенными геологическими процессами. Они возникают в вулканических, субвулканических породах и иногда дайках. В породах в результате выветривания возникает характерная столбчатая или плитчатая отдельность, когда отдельные трещины образуют грани 4-6-ти угольных блоков пород (см. рис. 3.5). Такие же структуры возникают и в результате усыхания илистых отложений (такыры). В более крупном плане к таким сетям могут относиться и «системы радиальных и кольцевых трещин» (см. рис.3.2). Ориентировка радиальных трещин (которые по масштабу могут приближаться к разрывным нарушениям) различна. Они простираются по разным направлениям от центра интрузива, с которым связано их возникновение. По существу, вместе с кольцевыми трещинами они образуют сети трещин, близкие к полигональным.

Структурное картирование сетей трещин и также штокверков производится на основе статистического исследования их структурных параметров, в число которых входят *плотность трещин (прожилков) – Р, средняя мощность прожилков – m_{cp} и объем жильно-прожилковой массы – V%*. Величины плотности и объема жильно-прожилковой массы могут быть линейными, площадными или объемными. Площадные и объемные параметры рассчитываются для единицы площади S (кв. м) или объема v (куб.м), а линейные – на линейный интервал L (погонный метр) обычно вкрест простирания основной системы. Расчет их производится по следующим формулам:

- плотность трещин (штокверка):

$$P_L = N / L \text{ (шт/м)}; P_s = N / S \text{ (шт/м}^2\text{)}, P_v = N / v \text{ (шт/м}^3\text{)},$$

- средняя мощность прожилков:

$$m_{cp} = \sum m_i / N \text{ (см)};$$

- жильно-прожилковая масса штокверка:

$$V\%_L = \sum m_i / L; V\%_s = \sum m_i / S, V\%_v = \sum m_i / v, \text{ или}$$

$$V\%_L = P_L * m_{cp}; V\%_s = P_s * m_{cp}; V\%_v = P_v * m_{cp}$$

Значения мощности прожилков должны переводиться в см, когда затем определяется объем жильно-прожилковой массы, который получается в %. Индексы при обозначениях плотности или прожилковой массы могут не указываться, если приведены единицы их измерения, по которым видно, площадная, объемная или линейная величина их получена.

По полученным для каждой точки наблюдения значениям структурных параметров строятся схемы трещиноватости или строения штокверка в изолиниях (рис.3.12). Полученные схемы-накладки анализируются в совокупности с геологической картой, гео-

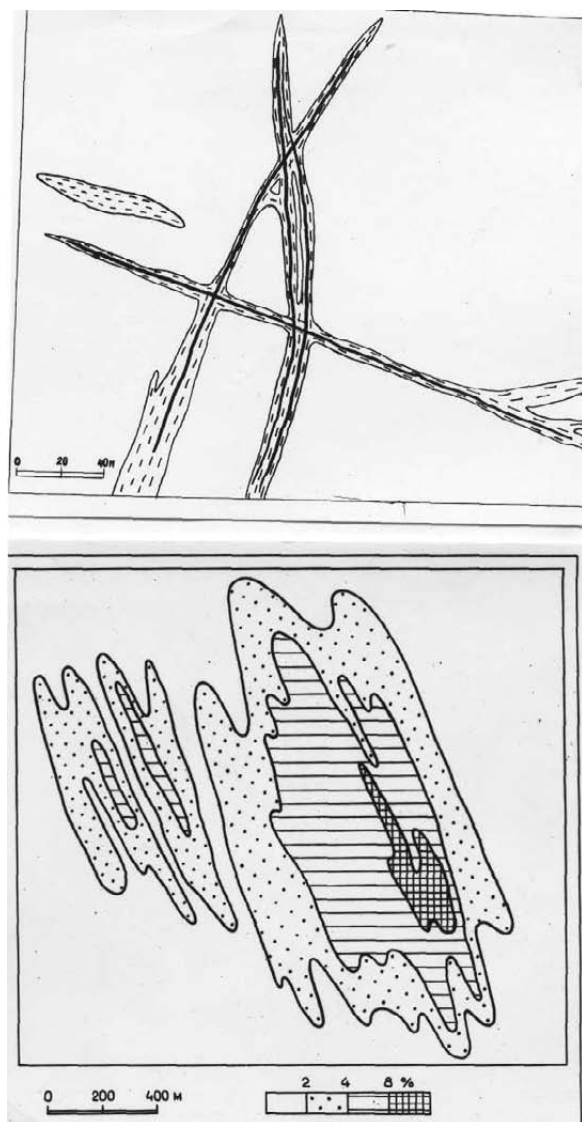


Рис.3.12. Структурные схемы штокверков.

На верхней схеме показана схема в изолиниях плотности прожилков (околожилный штокверк); нижняя схема иллюстрирует строение штокверка в изолиниях прожилковой массы.

на обнажениях ведутся по произвольным направлениям, не перпендикулярным плоскостям трещин в системе. Здесь можно рассмотреть два случая. В первом линии замеров проходят примерно перпендикулярно видимому в обнажении простираанию трещин, а во втором – в произвольном направлении. Для первого варианта необходимо установить угол α между плоскостью системы трещин и линией замеров. Если замеры производятся по стенке, то этот угол соответствует разности между азимутами простираания системы трещин и стенки. Когда замеры ведутся на горизонтальной площадке, то угол α соответствует разности: 90° - угол падения системы. Тогда при известном линейном интервале замера ($L\alpha$) можно определить соответствующее ему расстояние (L) по направлению перпендикуляра к системе трещин:

$$L = L\alpha * \sin \alpha, P = N/L = P / (L\alpha * \sin \alpha) = P_1 / \sin \alpha, \text{ где } P_1 = N / l - \text{видимая плотность трещин, полученная на замеренном интервале } L\alpha.$$

Во втором более общем случае можно с помощью геометрических построений (с построением смежных прямоугольных треугольников) приближенно установить истин-

химическими и петрофизическими схемами. Максимумы структурных параметров штокверка обычно совпадают с повышенно рудоносными участками полей и месторождений. Они контролируются ареалами распространения повышенно хрупких и низкопрочных пород, зонами пересечения различных систем трещин, апикальными выступами кровли рудоносных интрузий. Вдоль жил обычно выделяются узкие штокверковые зоны. Это связано с тем, что жилы выполняют отдельные участки разрывных нарушений, которые сопровождаются опережающими зонами трещиноватости.

На схемах строения штокверка невозможно отобразить строение штокверка в объеме, особенно при наличии пологих систем. В гранитах, например, где часто наблюдается выполнение рудными прожилками и жилами и пологих контракционных трещин, строение таких участков можно адекватно отразить на разрезах по данным замеров на крутопадающих стенках обнажений, по керну скважин и подземным горным выработкам.

При детальном картировании штокверковых месторождений могут составляться серии схем (разрезов) по стадиям минерализации, на каждой из которых показываются параметры штокверка для одной стадии. Аналогично можно составлять структурные схемы в изолиниях плотности трещин различных типов.

Расчет плотности линейного штокверка или односистемной зоны трещиноватости обычно усложняется тем, что замеры

ное (кратчайшее) расстояние между трещинами (рис. 3.13). В этом случае можно также вычислить его по следующей формуле:

$$L \approx L_{\alpha} * \cos \alpha * \cos \gamma / \sin \beta, \text{ где}$$

α – угол наклона линии замеров;

β – угол падения трещин;

γ – разность между азимутами – наклона линии замеров и падения системы трещин

Рис. 3.13. ????

Более точный и простой способ определения L основан на применении стереографических сеток. Сначала строятся проекции двух линий (см. главу «Стереографические и зенитальные проекции») и определяется угол между ними. Это угол (ϕ) между линией замеров L_{α} (ориентировка которой замерена компасом) и полюсом системы трещин (перпендикуляром к плоскости системы трещин), который соответствует максимуму на круговой диаграмме трещиноватости (построение этих диаграмм рассматривается ниже). Тогда истинное расстояние между трещинами и плотность трещин можно определить из соотношений:

$$L = L_{\alpha} * \cos \phi, P = N/L = P / (L_{\alpha} * \cos \phi) = P_{\text{изм}} / \cos \phi, \text{ где}$$

P и $P_{\text{изм}}$ – истинная и измеренная по интервалу L_{α} плотность трещин (прожилков).

Картирование трещин и прожилков обычно сопровождается статистическим изучением их ориентировки. Выявление систем трещин (прожилков) производится на основе построения статистических диаграмм трещиноватости. Это позволяет уточнять положение изолиний на структурных схемах с учетом преимущественных ориентировок прожилков, а также строить разрезы с учетом ориентировки систем штокверка, уточнять направление задания скважин и профилей при поисково-разведочных работах.

Статистическое изучение ориентировки трещин и прожилков заключается в построении и анализе различных видов статистических диаграмм. Это гистограммы, розы-диаграммы, диаграммы-матрицы и круговые диаграммы.

Построение гистограмм и роз-диаграмм производится с целью выделения систем трещин обычно только по преобладающему их простиранию. Гистограммы строятся в координатах «количество трещин – азимут простирания». Розы-диаграмма представляет собой обычно полукруг, который делится на сектора по 10^0 , соответствующие азимутам –

от 270^0 до 90^0 (рис.3.14). Построение можно представить в двух вариантах. Первый наиболее простой, когда в каждом секторе, равным цене деления диаграммы устанавливается количество трещин данного простирания. В соответствии с этим определяется радиальная длина сектора (рис.3.14 В). Радиус сектора в выбранном масштабе соответствует числу трещин данного простирания. Если, например, радиус диаграммы равен 10 см, масштаб одного замера равен 1см и замерено 5 трещин одного простирания, то радиус этого сектора составит 5см. Часто радиус диаграммы принимается равным длине наибольшего сектора.

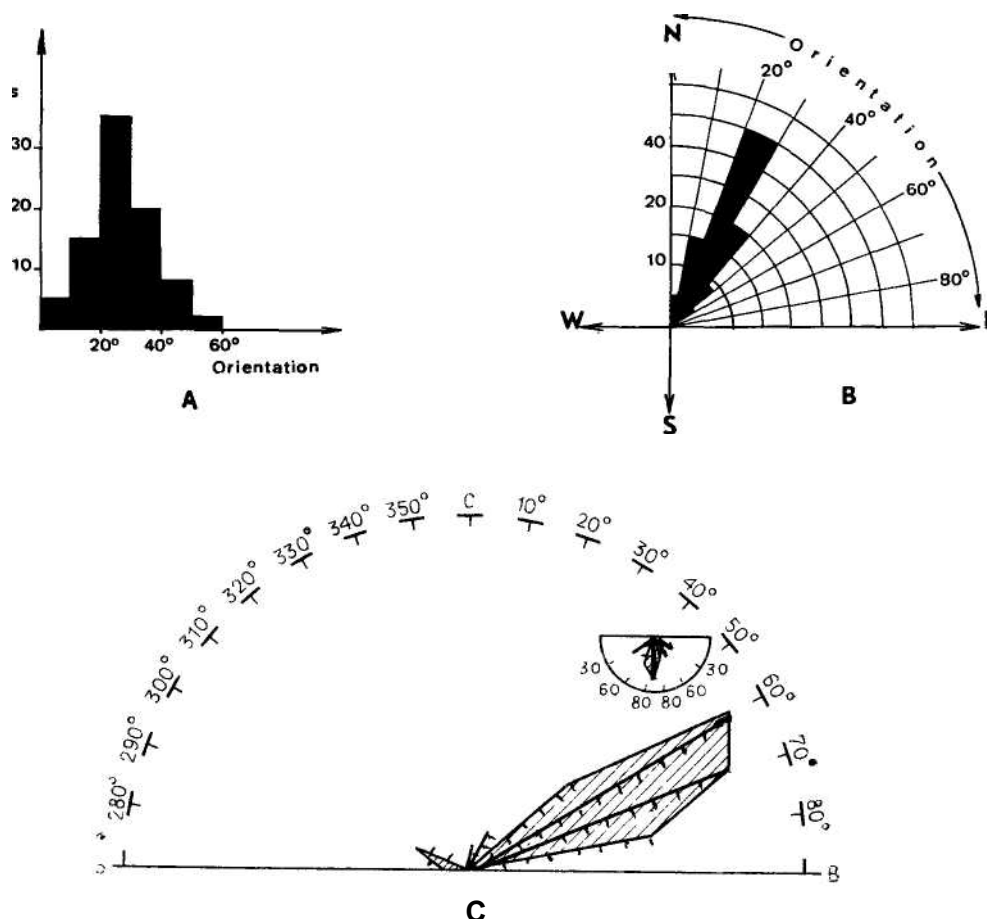


Рис.3.14. Гистограмма (А) и розы-диаграммы (В, С) простираний трещин.

На рис. 3.14 С - с дополнительной розой диаграммой их углов падения (для основного максимума). Расстояние между соседними штрихами, нанесенными на лучах, соответствуют одному замеру (в масштабе диаграммы).

Во втором варианте вместо секторов строятся лучи (лепестки), длина которых равна количеству трещин с азимутами простирания, лежащих в пределах половины цены деления в обе стороны от радиуса диаграммы, по которому проводится этот луч. Так, например, если луч проводится по радиусу с азимутом 40^0 , то длина луча будет равна количеству трещин, азимуты простирания которых лежат в пределах $35-45^0$ (при цене деления диаграммы 10^0). Концы каждого луча обычно соединяются прямыми линиями с концами соседних лучей, которые отстоят от него на 10^0 (рис.3.14 С). Если соседние лучи отсутствуют (нет трещин такой ориентировки), то построенный луч можно показать в виде ромбовидного «лепестка» шириной, равной цене деления диаграммы.

Обычно требуется производить сравнение результатов по серии точек наблюдения. Для этого розы-диаграммы получают в относительных единицах (%). Общее число замеренных трещин принимается за 100%. Длина радиуса диаграммы также может соответствовать 100% замеров, но обычно принимается меньшей (равной длине наибольшего луча) для получения более крупного изображения. Длина каждого луча соответствует частному

от деления числа трещин одного простирания (n) на общее число трещин (N), умноженному на 100%. Полученное число откладывается от центра диаграммы по соответствующему азимуту простирания.

Розы-диаграммы достаточно хорошо отражают ориентировку трещинных зон и штокверков, когда углы падения трещин близки к 90^0 . Когда углы падения изменяются в широких пределах, то могут быть построены дополнительные розы-диаграммы – для углов падения трещин в пределах выделенных наиболее крупных систем. Для этого около такого максимума (лепестка) розы-диаграммы строится дополнительный небольшой полукруг с разметкой на сектора по углам падения. Лучи этой розы-диаграммы строятся аналогично основной. При этом имеется возможность отразить азимуты падения трещин, если падение части из них противоположное. Соответственно на розах-диаграммах они будут образовывать лучи, находящиеся в разных ее половинах. При этом около левого и правого сектора этой розы-диаграммы обычно ставится значение азимутов падения (например, $270^0 - 90^0$) (рис.3.14).

Для сети разноориентированных трещин можно построить розу-диаграмму по азимутам падения. Тогда вместо полукруга строится полный круг, который размечается на сектора по всем направлениям - от 0 до 350. Построение такой розы-диаграммы ведется аналогично – по соответствующим радиусам откладывается количество трещин с одинаковым азимуту падения.

В предварительном анализе ориентировок трещин удобно использовать *диаграммы-матрицы*, предложенные П.Н. Николаевым. Они представляет собой таблицы, на нижней горизонтальной стороне которых наносятся отметки азимутов падения (обычно с интервалом $10-20^0$), а на вертикальных сторонах – углы падения (см. рис. 5.2). В каждую ячейку такой таблицы точками выносятся замеры, соответствующие ориентировкам отдельных трещин. По количеству точек в ячейках подсчитываются абсолютные частоты встречаемости трещин с определенной ориентировкой, в ячейке карандашом ставится полученное значение. В пустых ячейках ставится «0». После этого необходимо сделать пересчет полученных значений в относительные величины – вероятности встречаемости трещин (P_i) путем деления значений абсолютных частот (n_i) на общее число замеров (N). Обычно полученные значения переводятся в % умножением их на 100. По полученным значениям проводятся изолинии и выявляются максимумы, соответствующие отдельным системам трещин.

Диаграммы-матрицы, позволяют легко определять частоту встречаемости трещин с определенными углами или азимутами падения - как суммы вероятностей по отдельным ячейкам, одной строки (для углов падения) или одного столбца (для азимутов). Так, например, если требуется установить частоту встречаемости (относительную долю) трещин с углами падения $20-30^0$, то следует суммировать все значения по отдельным ячейкам в строке между делениями 20^0 и 30^0 на вертикальной оси.

Круговые диаграммы ориентировки трещин (прожилков) могут быть построены с использованием сеток Шмидта, Вульфа или Болдырева. При этом осуществляется построение полюсов трещин (проекций перпендикуляров к их плоскостям). Калька накладывается на сетку, отмечается центр сетки и нулевой азимут, записывается номер площадки замеров. Затем по большому кругу сетки маленькой засечкой на кальке отмечается азимут падения трещины и поворотом кальки засечка совмещается с одним из диаметров сетки. От центра сетки по диаметру в направлении засечки откладывается значение угла падения трещины и ставится точка. Калька возвращается в исходное положение и производится аналогичное построение для следующей трещины.

При использовании сетки Болдырева достаточно найти радиус (меридиан) сетки, соответствующий азимуту падения трещины и от центра сетки на угловом расстоянии, равным углу падения трещины, поставить точку. После нанесения всех замеров на кальку с помощью палетки Пронина (для сеток Вульфа и Болдырева) (рис. 3.16 А) или палетки Дмитриевича (для сетки Шмидта) (рис. 3.16 Б) производится подсчет числа точек, попадающих в каждый отдельный круг (или эллипс) палетки. Эти ячейки палеток имеют пло-

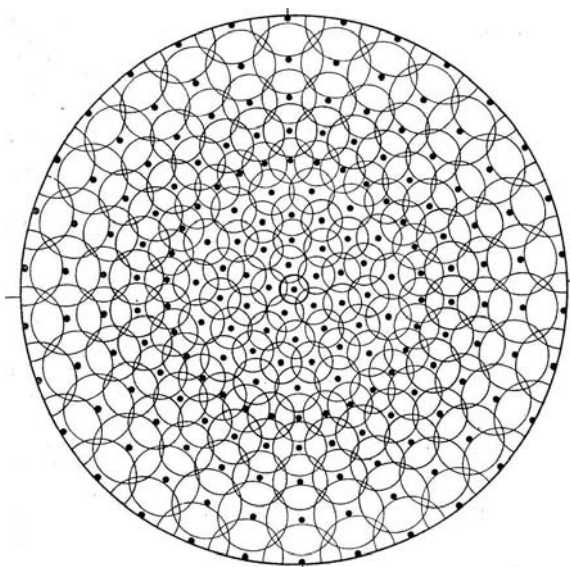


Рис. 3.16 (А). Палетка Пронина.

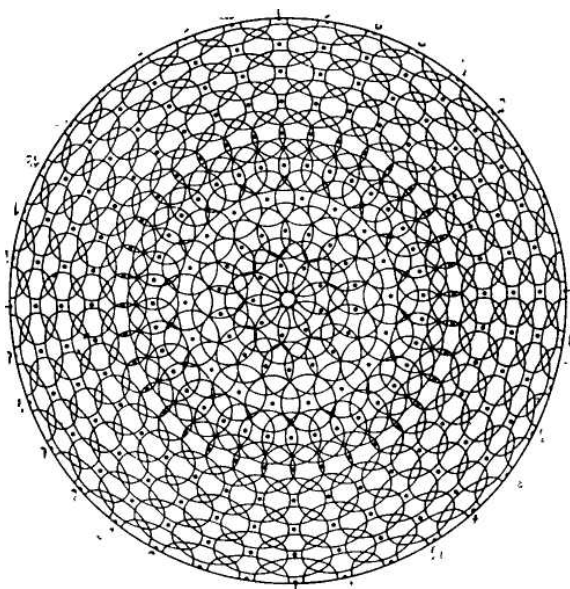


Рис. 3.16 (Б). Палетка Дмитриевича

щади, равные 1% от общей площади палеток. Они взаимно перекрываются с целью сглаживания данных «методом скользящего окна». При отсутствии палетки Дмитриевича можно использовать клеточную сетку с размерами квадратных ячеек равных примерно 1% площади диаграммы. В центры ячеек карандашом выставляются полученные количества замеров. Важно при этом правильно подсчитать их значения для краевых ячеек, половины которых находятся на одной стороне большого круга палетки, а вторые половины – на противоположной его стороне (через диаметр). В центрах обоих таких половинок проставляется одно и то же суммарное количество замеров. Во все пустые ячейки проставляются нули. Затем производится пересчет полученных абсолютных значений в относительные величины в %. Для этого каждое значение делится на общее число замеренных трещин и умножается на 100. Это позволяет производить сравнение различных диаграмм, построенных по разному числу замеров. По полученным значениям проводятся изолинии. Под диаграммой показывается строка с прямоугольными ячейками, границы между которыми соответствуют значениям изолиний. Каждый прямоугольник заполняется определенной штриховкой, интенсивность которой увеличивается с ростом значений (рис.3.17). Центры максимумов построенной диаграммы соответствуют статистически преобладающим ориентировкам трещин, т.е. системам трещин. По значению изолиний можно также установить относительную долю трещин, которые попадают в ту или

другую систему. Обычно проводятся изолинии 1-3-5-10%. Контуры максимумов позволяют определить разброс ориентировок трещин в системах как по азимутам, так и по углам падения. Невысокий разброс обычно характерен для сопряженных систем и однотипных оперяющих трещин в зонах разрывных нарушений.

Количество замеров на площадке для построения круговой диаграммы трещиноватости обычно составляет 100-150. В случае односистемных сетей трещин с невысоким разбросом ориентировок можно ограничиться и меньшим числом измерений. В более сложных сетях это число может быть увеличено до 200. Следует также учитывать однородность строения площадки замеров. Если в ее пределах находятся различные типы пород или геологические структуры, то лучше построить несколько отдельных диаграмм. В отдельных случаях также строятся сводные диаграммы - по нескольким площадкам сразу, чтобы выявить общую картину ориентировки трещин (например, в пределах интрузива или его экзоконтакта).

На диаграммах можно условными знаками отмечать тип трещин, состав прожилков, возрастные взаимоотношения трещин (ранние, одновременные и поздние).

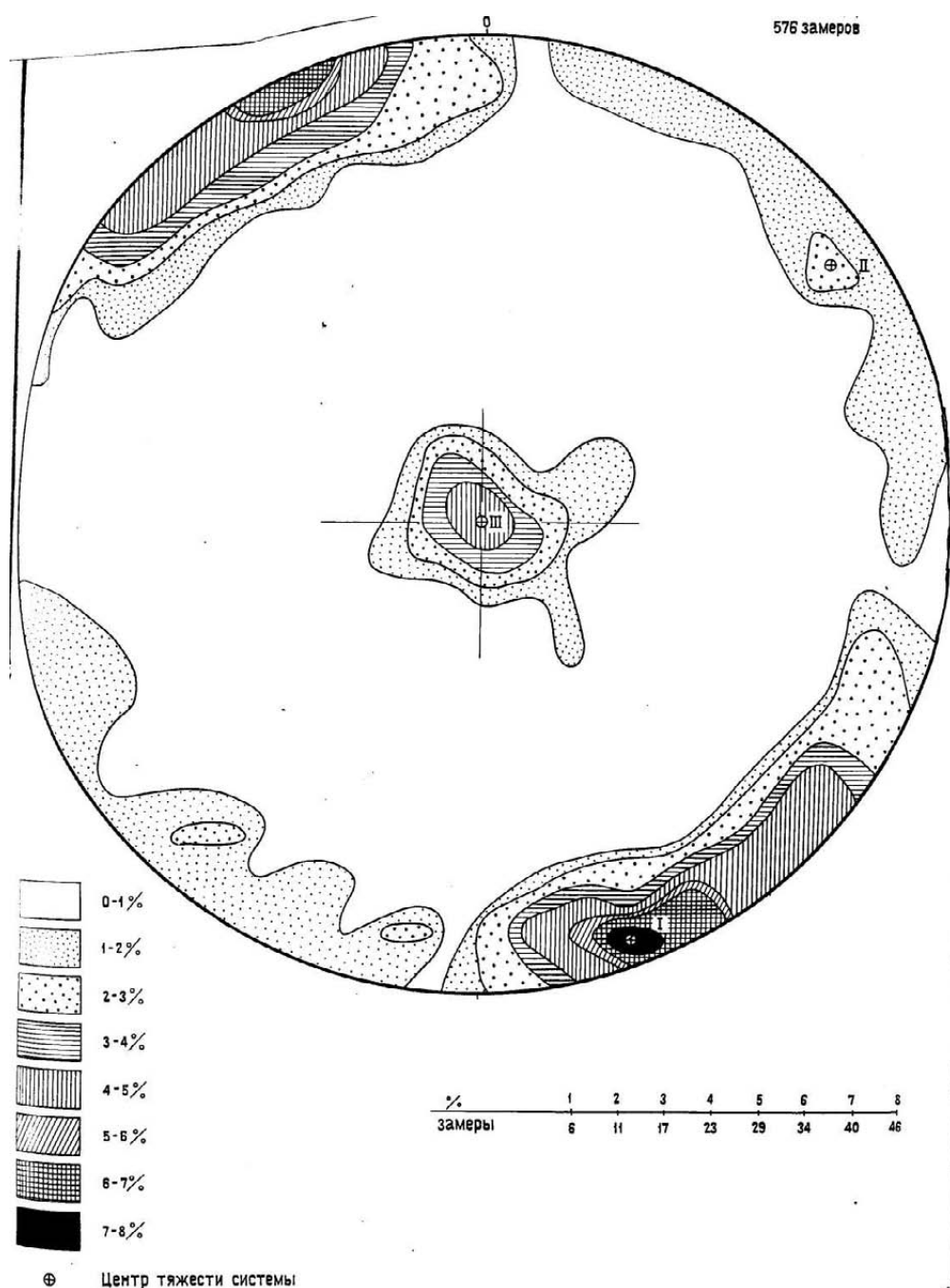


Рис. 3.17. Сводная круговая диаграмма трещиноватости гранитов участка Карельский (576 замеров).

I, II, III – номера основных систем трещин.

При картировании штокверков могут также быть построены *круговые диаграммы в изолиниях мощностей прожилков или жильно-прожилковой массы*. Для этого на круговую диаграмму выносятся значения мощностей прожилков, которые проставляются в соответствии с их ориентировкой. При осреднении данных по палетке Пронина или Дмитриевича (аналогично построению диаграмм трещиноватости) в центры ячеек ставится среднее значение мощности и затем проводятся изолинии. Построение подобных диаграмм с помощью компьютерных программ может осуществляться с помощью пакета Georient32.

Если мощности прожилков просто суммировать по каждой ячейке палетки, то получаются величины суммарной мощности, что соответствует значениям прожилковой массы (амплитуд раскрытия систем) по соответствующим направлениям. Нередко макси-

мумы на диаграммах плотности и мощности прожилков не совпадают. Это объясняется тем, что каждая система может включать определенное число мелких прожилков при различном количестве мощных, включая мелкие жилы. Амплитуда раскрытия сколовых трещин под давлением гидротермальных растворов в одних и тех же породах и на одинаковой глубине определяется их длиной. Трещины отрыва обычно имеют большие амплитуды раскрытия при малой длине.

Рудоносность штокверка обычно возрастает на участках увеличения его прожилковой массы или плотности. Большое влияние имеет разнообразие состава прожилков (проявление стадийности минерализации). Нередко отмечаются дорудные мощные прожилки и жилы, которые могут исказить общую связь оруденения со структурными параметрами. В то же время на участках пересечения с рудными они являются благоприятной средой для локализации рудной минерализации за счет наложения более поздних рудных стадий. Особенно это относится к хрупким кварцевым прожилкам и жилам, дорудным грейзеновым телам.

Точечное опробование вдоль отдельных систем и типов прожилков проводится с целью статистического определения среднего содержания рудных компонентов в самих прожилках. Посредством пересчета их значений на прожилковую массу штокверка достаточно надежно определяется их содержание в блоках пород (в руде) для разных участков месторождения. В итоге построение структурных (с рудной нагрузкой) блок-диаграмм на основе данных по картированию, опробованию и статистической пространственной ориентировке систем прожилков и жил позволяет получить общую картину распределения рудных компонентов на месторождении. В комплексе с петрофизическим анализом и тектонофизическими исследованиями можно восстановить общее структурное положение рудных зон на глубоких горизонтах и учесть эти результаты при задании разведочных профилей.