

**ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА
И ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЗОЛОТОРУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Н. А. РОЗАНОВА (ЦНИГРИ)

Микроструктурный анализ и изучение физико-механических свойств горных пород могут производиться только в общем комплексе геологоструктурных исследований. Оба метода представляют собой часть исследований, направленных на выяснение условий локализации оруденения, а также помогают однозначно решать сложные вопросы структуры месторождений и рудных полей.

Оба вида исследований в большей мере, чем какие-либо другие, зависят от тщательности и правильности отбора образцов, от знаний конкретной геологической обстановки места взятия образцов и заранее продуманного направления исследований. Оба метода базируются на использовании знаний основ других наук, главным образом различных разделов физики.

I. Микроструктурный анализ

При изучении структуры месторождения микроструктурный анализ оказал нам существенную помощь при расшифровке движений по рудовмещающим трещинам и нарушениям, при определении относительного возраста двух пересекающихся геологических тел и при изучении элементов прототектоники интрузивных массивов.

1. Расшифровка природы рудовмещающей трещины и движений по ней. При изучении структуры Центрального золоторудного месторождения, залегающего в гранодиоритах, необходимы были убедительные доказательства сколовой природы рудовмещающих трещин. Используя ориентированные образцы гранодиоритов с контакта рудовмещающей трещины и удаленные от нее, был произведен анализ ориентировки оптических осей кварца, который показал ее резкое отличие. Диаграмма, составленная по замерам кварца из гранодиоритов, взятых в удалении от рудных жил, показывает отсутствие какой-либо ориентировки в расположении оптических осей кварца. На диаграмме, составленной по гранодиоритам с контакта рудовмещающей трещины, расположение максимумов оптических осей кварца характеризует породы как S-тектонит. Из этого следует, что рудовмещающая трещина является трещиной скола. Кроме того, ориентировка оптических осей кварца в гранодиоритах с контакта рудовмещающей трещины (азимут скатывания ЮВ $165^\circ \angle 48^\circ$) близка к ориентировке борозд скольжения (азимут скатывания ЮВ $160^\circ \angle 50^\circ$) на плоскости рудовмещающей трещины.

Данные микроструктурного анализа были также использованы при решении вопроса о направлении перемещений в процессе формирования рудных жил. На диаграмме ориентировки оптических осей кварца в гранодиоритах с контактов рудных жил были нанесены плоскости рудовмещающих трещин и даек диабазовых порфиритов (по два основных положения). На рис. 1 видно, что максимум I ориентировки оптических осей кварца располагается вблизи плоскостей, отражающих залегание даек, и совпадает с линией сопряжения рудной жилы и дайки диабазовых порфиритов. Такое расположение оптических осей кварца говорит о движении блоков пород, вмещающих рудные жилы, параллельно линии сопряжения дайки диабазовых порфиритов и рудной жилы. Таким образом, дайки диабазовых порфиритов существовали в момент формирования рудных жил, т. е. дайки являются дорудными.

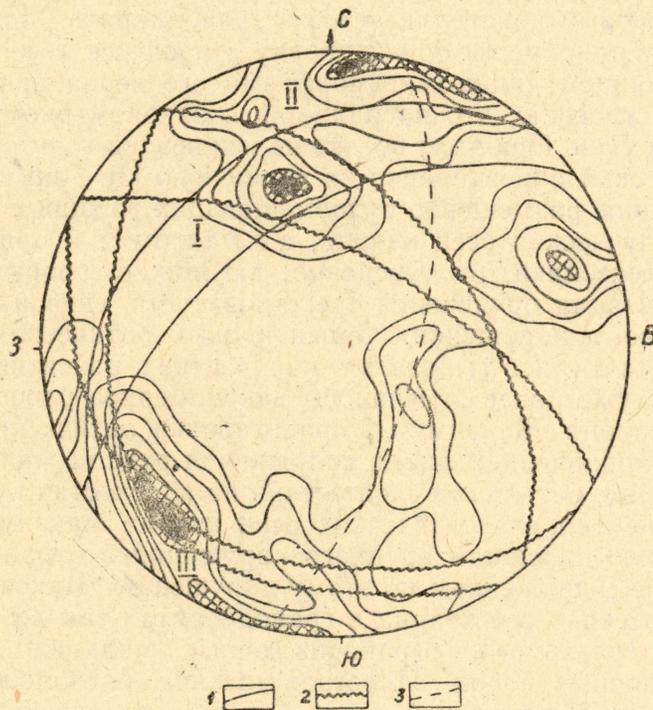


Рис. 1. Диаграмма ориентировки оптических осей кварца в гранодиоритах, взятых в контакте рудной жилы. Замеров 211; $<0,5-1-2-3-4-5<$ %. Ориентировка оптических осей кварца: максимум I (аз. скатывания ЮВ $165^\circ/48^\circ$) совпадает с линией сопряжения рудной жилы с дайками слессартитов, микродиоритов и диабазовых порфиритов; максимум II (азимут скатывания ЮВ $65^\circ/78^\circ$) по расположению близок к плоскости крупного нарушения; максимум III (аз. скатывания ЮЗ $182^\circ/88^\circ$) совпадает с системой даек микродиоритов, слессартитов, диабазовых порфиритов. 1 — рудная жила; 2 — дайки диабазовых порфиритов, слессартитов, микродиоритов; 3 — разлом.

2. Изучение элементов прототектоники. Для гранодиоритов Центрального массива, в которых залегает золотое оруденение, наблюдается, как и для других интрузивных массивов, ориентированное расположение темноцветных шлиров, пластинок слюды и линей-

ная вытянутость вкрапленников роговой обманки. Часто такую ориентировку [3] без всяких доказательств относят к элементам прототектоники, считают определяющей в локализации оруденения. Однако ориентировка указанных элементов не всегда связана с первичным сложением интрузивов и может быть вызвана явлениями динамометаморфизма. Для Центрального месторождения многие исследователи [8] считали, что определяющим в локализации оруденения является трещиноватость, обусловленная первичной ориентировкой гранодиоритов. Автором при структурных исследованиях на этом месторождении были получены данные о приуроченности оруденения к трещинам, связанным с формированием крупного нарушения. Для правильного решения вопросов локализации золотого оруденения следовало проверить генезис трещиноватости. Было произведено сопоставление ориентировки оптических осей кварца в гранодиоритах и залегания рудных жил. Следует напомнить, что кварц, который кристаллизуется в гранодиоритах одним из последних, не может приобрести ориентировку в процессе течения магмы. Однако под влиянием динамометаморфизма его зерна ориентируются по внутреннему строению, что проявляется в закономерном расположении их оптических осей. При этом все же не исключена возможность наложения тектонической ориентировки на первичную [3]. Таким образом, если пространственное размещение рудовмещающих трещин совпадает с ориентировкой оптических осей кварца, а не тяготеет к ориентировке элементов прототектоники, то с уверенностью можно говорить о решающей роли в локализации оруденения трещиноватости, связанной с формированием крупного нарушения. Ориентировка оптических осей кварца в гранодиоритах (рис. 1), взятых на участках развития рудных жил, показала, как уже ранее отмечалось, закономерное расположение оптических осей кварца. Максимум I ориентировки оптических осей кварца совпадает с направлением линии сопряжения рудной жилы с дайкой основных пород и с бороздами скольжения на плоскостях рудовмещающей трещины. Ориентировка оптических осей кварца максимума II близка к расположению плоскости крупного нарушения и отражает перемещение, связанные с движением по этому нарушению. Максимум III ориентировки оптических осей кварца в гранодиоритах так же характеризует перемещение, связанное с ограничивающим влиянием дорудных даек средних и основных пород. Пространственное расположение рудовмещающих трещин Центральной жилы близко к положению максимума I ориентировки оптических осей кварца и не совпадает с ориентировкой шлиров темноцветных минералов в гранодиоритах. Полученные данные подтверждают приуроченность рудовмещающих трещин к направлениям, определяющимся проявлениями динамометаморфизма.

II. Физико-механические свойства горных пород

Физико-механические свойства горных пород (в данном случае эффективная пористость и упругие свойства), как это уже давно доказано [1, 2, 4], оказывают существенное влияние на формирование типов структур рудных полей и месторождений, на ход физико-химических процессов, протекающих до и во время рудообразования.

А. Эффективная пористость

Данные исследований эффективной пористости пород, вмещающих золоторудные месторождения, были использованы при выяснении наиболее благоприятных условий локализации золотого оруденения, а также как дополнительный признак при определении относительного возраста пересекающихся геологических тел и признак, однозначно показывающий

наличие изменения структуры породы под влиянием различных факторов (динамометаморфизма, гидротермального метаморфизма и др.).

1. Изменение величины эффективной пористости, отражающее изменения структуры породы под влиянием гидротермального метаморфизма и динамометаморфизма, было изучено нами на Центральном и Натальевском золоторудных месторождениях.

На Центральном месторождении эффективная пористость неизменных гранодиоритов колеблется от 0,59 до 0,91%, неизменных пород, слагающих дайки (диабазовых порфиритов, спессартитов и микродиоритов), — от 0,35 до 0,5%. Эффективная пористость тех же пород, но гидротермально измененных, составляет соответственно уже до 3,2% и до 1,52%. Эффективная пористость милонитизированных тех же пород еще выше и достигает 3,47—6,7% (рис. 2). Изучение Натальевского месторождения (рис. 3) так же показало различие в величине эффективной пористости неизменных и измененных различными процессами пород.

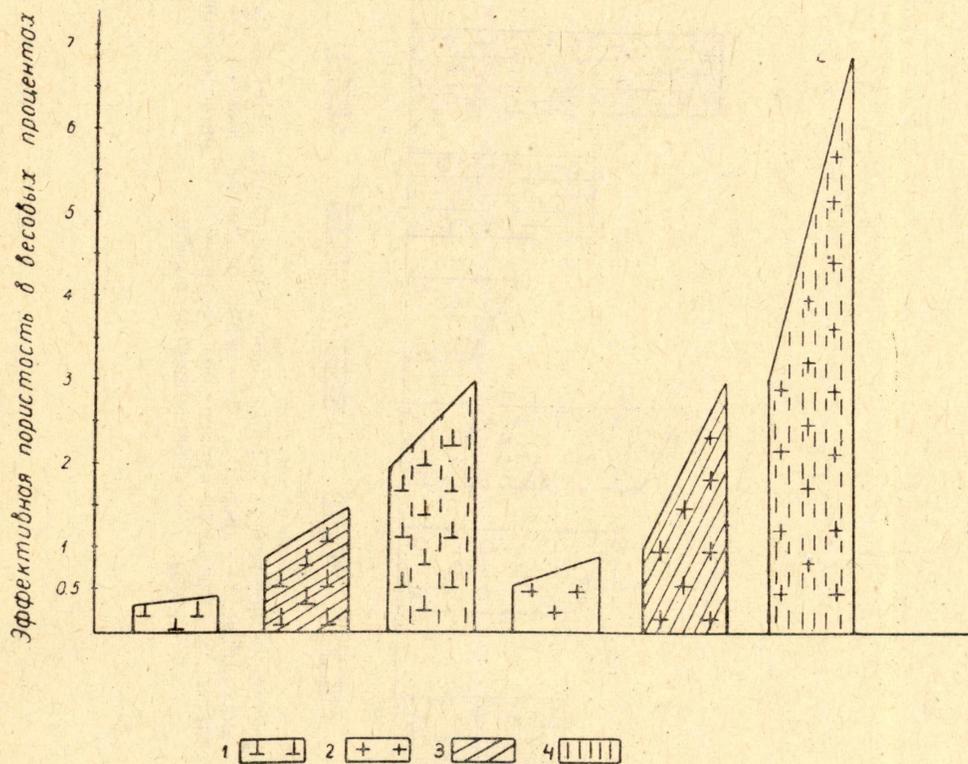


Рис. 2. Эффективная пористость горных пород, вмещающих Центральное месторождение. 1 — диабазовые порфириты, спессартиты, микродиориты; 2 — гранодиориты; 3 — гидротермально измененные породы, 4 — милонитизированные породы.

Эффективная пористость неизменных известняков и диоритов равна 0,08—0,09%; для скарнированных диоритов она несколько выше — 0,12—0,26%; эффективная пористость гранато-пироксеновых скарнов еще выше и составляет 0,42—0,51%. Повышение величины эффективной пористости при скарнировании вызывается разрыхлением скарнируемых пород, что определяется существом процесса скарнообразования. Повышение эффективной пористости вызывается и при эпидотизации пород: эффективная пористость эпидотизированных гранато-пироксеновых скарнов достигает 0,59—0,69%. В то же время эффективная пористость окварцованных гранато-пироксеновых скарнов снижается до 0,27%. При окварцевании скарнов происходило залечивание и закупорка пор ново-

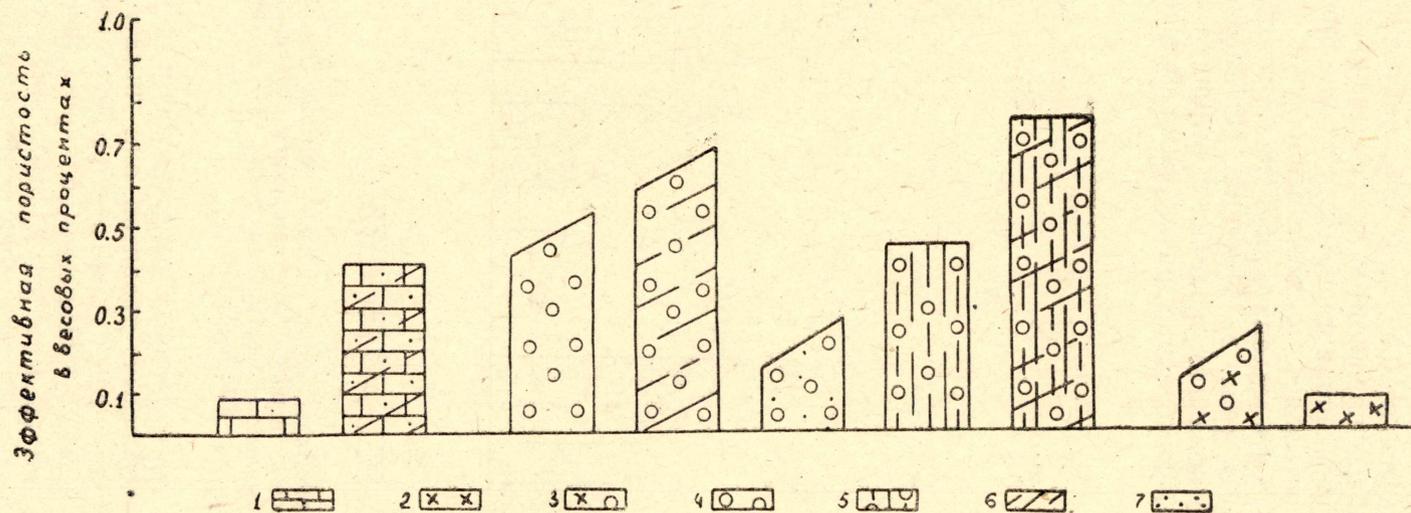


Рис. 3. Эффективная пористость горных пород, вмещающих Натальевское месторождение. 1 — известняки; 2 — диориты; 3 — скарнированные диориты; 4 — гранато-пироксеновые скарны; 5 — тремолит-диопсидовые скарны; 6 — эпидотизированные породы; 7 — окварцованные породы.

образованиями кварца, что естественно привело к понижению пористости. Уменьшение величины эффективной пористости при окварцевании [5] может происходить только в условиях низкотемпературных растворов, когда отлагается SiO_2 без выноса других компонентов (например, CaCO_3) в прилегающие породы. При высокотемпературных растворах наряду с отложением кремнезема неминуемо имело бы место выщелачивание других компонентов и соответственно рыхление структуры измененной породы и увеличение пористости. Наибольшая величина эффективной пористости установлена для эпидотизированных тремолит-диопсидовых скарнов — 0,75% (у неизменных пород она всего — 0,46%).

Приведенные данные отчетливо показали прямую зависимость величины эффективной пористости от характера изменения пород, что широко известно и на месторождениях других полезных ископаемых различных регионов СССР [4, 5].

2. Использование данных по эффективной пористости как дополнительного признака выяснения условий наиболее оптимальных для локализации оруденения, в нашем случае — для установления горизонта благоприятных пород, может производиться только в совокупности с анализом всех геолого-структурных особенностей месторождения и упругих свойств вмещающих оруденение пород. При изучении условий локализации оруденения Натальевского месторождения исследования эффективной пористости по разрезу, богатого золотом и содержащего также пустые породы (снизу вверх), показали следующее:

- 1) гранато-пироксеновые скарны, пятнистые, с участками известняков, граната и гнездами сульфидов, эпидотизированные, эффективная пористость — 2,04%;
- 2) известняки, крупнозернистые, эпидотизированные, с прожилками граната, эпидота и рудных минералов, эффективная пористость — 0,66%;
- 3) известняки с прожилками и гнездами граната, содержащие кристаллики пирита, эффективная пористость — 0,42%;
- 4) гранато-пироксеновые скарны, среднезернистые, с пиритом по трещинкам, эффективная пористость — 0,59%;
- 5) гранато-пироксеновые скарны, среднезернистые, окварцованные, со скоплениями граната, эффективная пористость — 0,27%;
- 6) скарнированные диориты с гранатом, среднезернистые, эффективная пористость — 0,51%;
- 7) диориты, неизменные, плотные, эффективная пористость — 0,09%.

Наиболее высокое содержание золота наблюдается в скарнированных диоритах, эффективная пористость которых не является максимальной в пределах рассмотренного разреза. Отличительной чертой участка локализации золота является резкая смена величины эффективной пористости, которая вызвана залеганием над скарнированными диоритами менее пористых пород, неизменных диоритов, т. е. наличием своеобразного экрана, контролирующего размещение оруденения. Такие примеры известны и на других золоторудных месторождениях [7].

3. Использование данных исследований эффективной пористости пород как дополнительного признака при определении относительного возраста пересекающихся геологических тел основано на наблюдениях над увеличением эффективной пористости в относительно более древних телах и расширением ореола повышенной пористости при подходе к дорудным телам или структурам. Так, на Андреевском месторождении эффективная пористость диабазов у контакта рудной жилы составляет 2,4 и даже до 4,5%. В то же время эффективная пористость диабазов из тех же даек, но взятых в удалении от рудной жилы на 3—5 м, равна всего 0,8—1,3%. Изучение диабазов с повышенными

значениями эффективной пористости показало, что они значительно гидротермально изменены и существенное значение в их составе играют серицит, эпидот и карбонаты. По мере удаления от рудной жилы степень гидротермальных изменений в породе падает, и на расстоянии 3,5 м они приобретают нормальный неизменный облик. Приведенный выше материал однозначно говорит о дорудном возрасте даек диабазов.

Расширение ореола повышенной пористости пород, вмещающих оруденение, при подходе к дорудным структурам или телам широко наблюдалось нами на золоторудных месторождениях Мариинской тайги в местах подхода золоторудных жил к дайкам среднего и основного состава. При этом контуры ореолов повышенной пористости строго совпадают с гидротермальным изменением пород.

В заключение необходимо заметить о существенной роли при локализации оруденения соотношения величин эффективной и общей пористости вмещающих оруденение пород. Это соотношение целиком зависит от наличия в породах закрытых и открытых пор и обуславливает проницаемость пород. В том случае, когда эффективная пористость равна общей, все поры открыты и проницаемость наилучшая [4]. Когда же имеются и открытые и закрытые поры, проницаемость определяется в основном величиной эффективной пористости.

Б. Упругие свойства горных пород

Исследования упругих свойств (модуля упругости и коэффициента Пуассона) горных пород, вмещающих оруденение, позволяют выявить типы пород различной хрупкости, т. е. обнаружить породы, наиболее благоприятные для развития трещиноватости, а следовательно, и для локализации оруденения. Чем больше величина модуля упругости пород, тем породы более хрупкие и в них сильнее проявляется трещиноватость и тем больше возможностей для локализации оруденения.

1. На Натальевском месторождении, залегающем среди известняков, скарнов, скарнированных диоритов и диоритов, промышленное оруденение тяготеет преимущественно к скарнированным породам и скарнам. Такое размещение золота, наряду с геолого-структурными особенностями месторождения и высокой пористостью пород, определяется также и упругими свойствами их. Собственных исследований упругих свойств горных пород у нас не было, все данные заимствованы из работ Лаборатории исследований физико-механических свойств горных пород ИГЕМ АН СССР [1, 5]. Упругие свойства пород, близких вмещающим породам Натальевского месторождения, характеризуются следующими значениями:

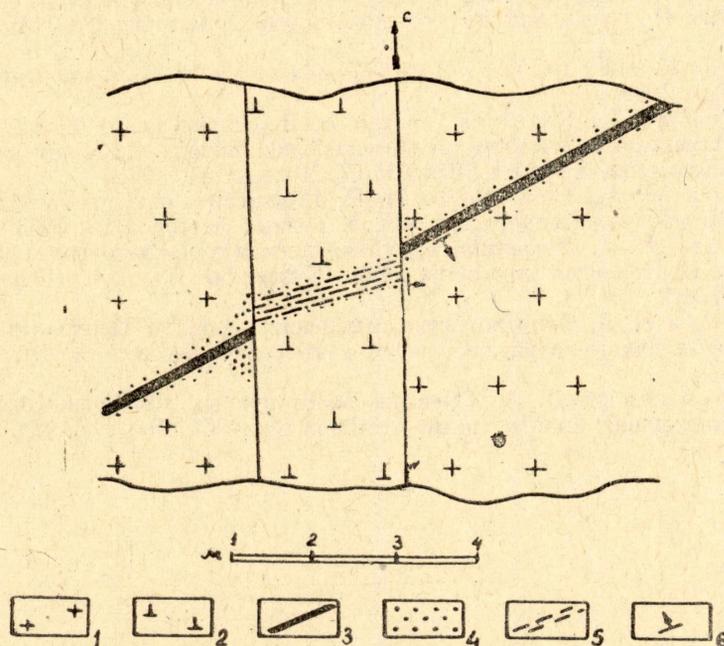
	Модуль упругости	Коэффициент Пуассона
Известняки	$5,4-7,6 \times 10^5$ кг/см ²	
Гранодиорит-порфиры	$8,0-8,6 \times 10^5$ кг/см ²	0,32
Гранодиориты	$7,55-8,44 \times 10^5$ кг/см ²	0,29
Скарны (гранато-пироксеновые)	$11,4-15,8 \times 10^5$ кг/см ²	0,20—0,16

Как установлено [1, 5], высокие значения модуля упругости при низких показателях коэффициента Пуассона (соотношение продольной и поперечной деформаций) для скарнов характеризуют эти породы как хрупкие, более хрупкие, чем гранодиориты, гранодиорит-порфиры и известняки. При проявлении скалывающих напряжений в обстановке всестороннего сжатия скарны будут вести себя более хрупко, чем любые из указанных пород, известняки же будут деформироваться пластически. Как указывалось выше, при скарнировании пород на Натальевском ме-

сторожении произошло увеличение эффективной пористости и разрыхление их структуры, что характеризует процесс скарнирования и на других месторождениях. Однако при этом наблюдается увеличение модуля упругости и понижение коэффициента Пуассона. Такое соотношение физико-механических свойств пород при скарнировании объясняют [5] образованием минералов с большим удельным весом (с большей плотностью кристаллической структуры). Кроме того, такое повышение упругих свойств скарнов значительно перекрывает снижение модуля упругости, вызванное рыхлением структуры породы вследствие увеличения пористости.

Следует несколько остановиться и на отсутствии золотого оруденения в окварцованных гранато-пироксеновых скарнах этого разреза Натальевского месторождения. Окварцованные гранато-пироксеновые скарны отличаются плотным сложением, монолитностью и в них почти не развита трещиноватость. Это частично объясняется некоторым повышением модуля упругости и коэффициента Пуассона при окварцевании скарнов в связи с уменьшением величины пористости (при закупорке и заполнении пор в скарнах кварцем) и развитием самого кварца.

Исходя из приведенного, основываясь на данных об упругих свойствах пород, преимущественная локализация золотого оруденения на Натальевском месторождении в скарнах и скарнированных диоритах совершенно понятна.



Фиг. 4. Схема расположения рудовмещающих трещин в гранодиоритах и дайке, сложенной микродиоритами. 1 — гранодиориты; 2 — микродиориты; 3 — рудная жила; 4 — гидротермальное изменение пород; 5 — тонкие сколовые трещины; 6 — элементы залегания.

2. На южном фланге Центрального месторождения наблюдается приуроченность оруденения к трещинам в гранодиоритах (рис. 4), которые при подходе к дорудной дайке микродиоритов обрываются и прослеживаются снова после дайки. При тщательном изучении дайки в ней на продолжении рудной жилы наблюдаются многочисленные тонкие сколовые трещинки, ориентированные под острым углом к рудной жиле в гранодиоритах. Трещинки имеют очень ограниченную протяженность, раз-

мещаются только в пределах тела дайки и выполнены кварцем, сульфидами и даже золотом. При формировании рудной жилы в гранодиоритах не произошло разрыва сплошности дайки микродиоритов. Напряжения, приведшие к образованию рудовмещающей трещины в гранодиоритах, были недостаточными для образования такой же трещины в дайке микродиоритов, что определяется различиями физико-механических свойств этих двух типов пород. Главенствующую роль в данном случае играла величина модуля упругости, который в диоритовых породах примерно в два раза выше модуля упругости гранодиоритов, соответственно $8,7-13,0 \times 10^5$ и $5,15 \times 10^5$ кг/см² [1].

В заключение следует отметить, что приведенные выше примеры применения микроструктурного анализа и изучения физико-механических свойств горных пород, вмещающих оруденение, на наш взгляд, убедительно доказывают эффективность этих методов при решении особенностей структуры месторождений и локализации оруденения. Нам представляется, что указанные методы дополнительных исследований должны стать такими же обязательными, как изучение минерального состава руд, трещиноватости и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беликов Б. П. Упругие и прочностные свойства горных пород. Труды ИГЕМ, вып. 43, 1961.
2. Залесский Б. В., Розанов Ю. А. Физико-механический эксперимент в петрографии. Труды IV совещания по эксперим. минер. и петрографии. Изд. АН СССР, вып. 2, 1953.
3. Лукин Л. И., Чернышев В. Ф., Кушнарев И. П. Микроструктурный анализ. Изд. «Наука», 1965.
4. Розанов Ю. А., Кристальный Б. В., Некрасов Е. М., Пашковская М. Д. Изменение пористости рудовмещающих пород некоторых месторождений северного Таджикистана. Труды ИГЕМ АН СССР, вып. 41, 1961.
5. Розанов Ю. А., Тимченко И. П. Изменения упругих свойств пород под влиянием постмагматических процессов. «Геол. рудных месторожд.», 1965. № 6.
6. Розанова Н. А. О взаимоотношениях даек меланократовых пород с золотым оруденением на Центральном месторождении (Кузнецкий Алатау). «Геол. рудных месторожд.», 1959, № 2.
7. Розанова Н. А. Околожильные изменения пород на Центральном месторождении и некоторые данные о распределении в этих породах золота. Труды ЦНИГРИ, вып. 63, 1965.
8. Тимофеевский Д. А. Геология золоторудных месторождений Кузнецкого Алатау. Сб. «Главнейшие золоторудные месторождения СССР», т. 5, изд. НИГРИзолото, 1952.