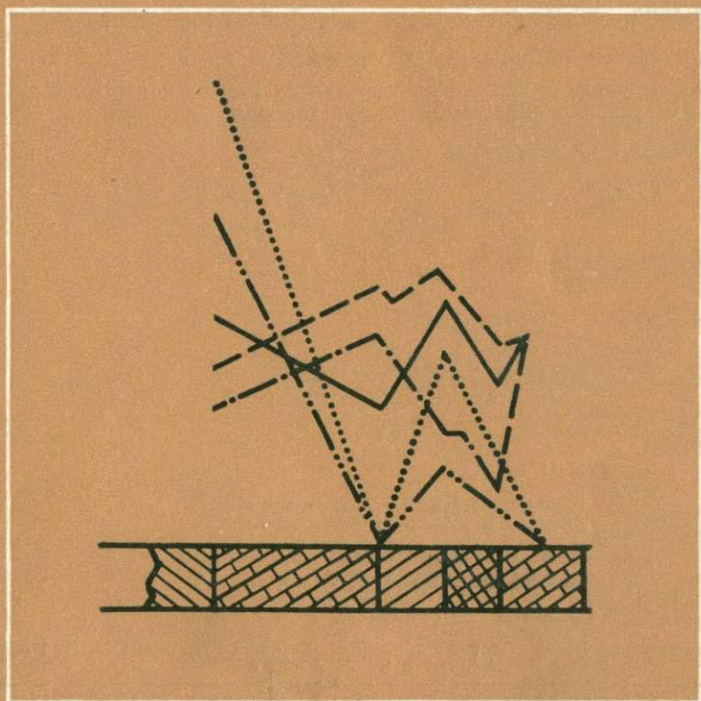


Н.И.ЛЮБИМОВ, В.И.МОРОЗОВ

**ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА
РУДОВМЕЩАЮЩИХ
ГОРНЫХ ПОРОД**



СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
Введение	3
Основные направления в использовании физико-механических свойств горных пород при изучении рудных месторождений (краткий литературный обзор)	6
Методы исследования физико-механических свойств горных пород	21
Результаты экспериментальных исследований	29
Физико-механические свойства рудовмещающих горных пород и их роль в оценке условий формирования рудных месторождений	43
Заключение	115
Список литературы	120

Ч О В,
О В

СВОЙСТВА
ГОРНЫХ ПОРОД

З а р о я н ц

Иллюстрация художника К. В. Голикова
Л. С. С е в а

Москва, изд. 24/Х 1973 г. Т-17428.
Уч.-изд. л. 8,64. Тираж 1600 экз.
86 коп.

Издательство «Недра», Ленинградский проезд, д. 1/19.
Секция «А» при Государственном комитете
по картографии и книжной торговле.
Ленинградский пр., 91.

Н. И. ЛЮБИМОВ, В. И. МОРОЗОВ

553.1.53

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА
РУДОВМЕЩАЮЩИХ
ГОРНЫХ ПОРОД

963



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
МОСКВА 1973



Любимов Н. И., Морозов В. И. Физико-механические свойства рудовмещающих горных пород. М., «Недра», 1973, 120 с.

Необходимость открытия новых месторождений полезных ископаемых, в том числе в районах горнорудных предприятий, ставит задачу всестороннего изучения условий размещения оруденения и выработки поисковых критериев.

В книге приведены экспериментальные данные и характеристика измененных (околорудных) пород по физико-механическим свойствам на примере некоторых месторождений молибдена, полиметаллов, редких и рассеянных элементов и рекомендован метод приближенной оценки степени изменения пород.

Таблиц 32, иллюстраций 36, список литературы — 42 назв.

ВВЕДЕНИЕ

В девятой пятилетке наибольшие объемы геологоразведочных работ будут сосредоточены в районах действующих горнорудных предприятий. В связи с этим установление физико-механических параметров рудовмещающих пород в сочетании с геологическими предпосылками является задачей сегодняшнего дня. Это понятно, если учесть современное представление о формировании благоприятных для рудоотложения структур, где физико-механическим свойствам пород отводится значительная роль. Например, механическая прочность и упругие свойства пород фактически определяют характер структур и положение в рудовмещающих породах, а повышенная пустотность их создает благоприятные условия для локализации оруденения.

Исследование физических и механических свойств горных пород в настоящее время уже вышло из стадии накопления данных об изменении тех или иных параметров для пород различного петрографического состава. Во многих случаях установлены определенные закономерности изменения этих свойств в зависимости от состава, структуры, генезиса, гидротермально-метасоматических процессов и др. Для последних лет характерно появление работ по исследованию физических свойств естественных и искусственных минералов, что позволяет углублять геологические исследования и повышать эффективность их проведения.

Исследование физических свойств горных пород в СССР привело к развитию нескольких направлений или школ с различной тематикой. Так, в ИФЗ АН СССР (М. П. Воларович, Г. Н. Петрова и др.) исследование физических свойств приобрело экспериментальное направление и состоит в изучении упругих, электрических, магнитных и других характеристик различных горных пород в естественном их состоянии и при различного рода воздействиях (давление, температура, магнитное поле и т. д.).

Во ВНИИГеофизике (руководитель Г. М. Авчян) в последние годы проводится экспериментальное исследование физических свойств осадочных пород с использованием последних при решении различных геологических вопросов.

В ИГЕМ (Ю. А. Розанов, Б. П. Беликов и др.) исследования сосредоточены главным образом на изучении изменений физических параметров горных пород и минералов в связи с гидротермально-метасоматическими процессами и решением вопросов условий формирования месторождений. При этом необходимо отметить также, что

решение практических задач сопровождалось и проводилось параллельно с разработкой методических вопросов как по методам изучения, так и интерпретации полученных материалов.

Работы ВСЕГЕИ, проводимые под руководством Н. Б. Дортман, направлены на выяснение общих закономерностей изменения ряда физических свойств в связи с изучением тектоно-магматических формаций. Петро-физические карты мелких масштабов безусловно способствуют пониманию геологического строения различных регионов.

В ВИМС исследование физических и механических свойств горных пород проводилось в зависимости от тематики работ института. Однако основное внимание уделялось разработке методик и аппаратуры для определения удельного и объемного весов¹, пористости, твердости, механической прочности и абразивности горных пород, в связи с изучением:

- а) абразивного сырья;
- б) разработки новых типов породоразрушающих инструментов и классификации горных пород;
- в) физико-механических свойств рудовмещающих горных пород.

В настоящее время успешно ведутся исследования физических свойств минералов.

В ЦНИГРИ исследования проводятся в направлении:

- а) разработки некоторых методов и аппаратуры для определения физико-механических свойств горных пород в геологоразведочных партиях и экспедициях и их классификации по механическим свойствам для целей геологоразведочных работ и техники разведки месторождений полезных ископаемых;
- б) изучения физических свойств рудовмещающих горных пород для решения различных геологических вопросов.

Для исследования горных пород большое значение имеет изучение физических параметров многими лабораториями академических институтов и геологических управлений МГ СССР. Ими получен и накоплен большой фактический материал, который позволяет получить объективную информацию по вопросам корреляции магматических образований, расчленению их на фазы, выделению гидротермальных областей, что способствует более углубленной разработке геологических вопросов.

В настоящей книге излагаются результаты исследований физико-механических свойств горных пород, полученные авторами в течение последних 10—15 лет. В ряде случаев привлекаются результаты других исследователей. Поскольку работы проводились на различных этапах развития исследований этих свойств горных пород, то, безусловно, представленный в книге материал неоднороден и неравнозначен по значению. В связи с этим работа имеет в основном методическое значение для дальнейшей, более детальной разработки иссле-

¹ В связи с тем, что при подготовке работы были использованы результаты исследований последних 10—15 лет, некоторые термины и единицы измерения физических величин не могли быть приведены в системе СИ.

дованных вопросов. Однако имеющиеся данные по физико-механическим свойствам околорудных пород в ряде случаев могут быть использованы при разработке поисковых критериев и постановке разведочных работ.

В начале работы даны основные направления в использовании физико-механических свойств горных пород при решении различных геологических вопросов (краткий литературный обзор). Сравнительно подробно освещены вопросы методики работ, особенно по методам, освещающимся впервые. Далее изложены результаты экспериментальных работ (сжимаемость горных пород в раздробленном состоянии и влияние температуры на образование трещин в горных породах) в связи с изучением условий образования благоприятных геологических структур для рудоотложения.

Основной материал о физико-механических свойствах горных пород приведен по данным разведки и поисков некоторых месторождений цветных, редких и других металлов. Проведенные исследования заключались в выяснении роли физико-механических свойств среды при:

а) формировании геологических структур, благоприятных для локализации оруденения;

б) гидротермально-метасоматических изменениях околорудных пород для установления поисковых признаков оруденения.

Изучение физико-механических свойств горных пород, включая измененные (околорудные) их разности, заключалось в определении удельного и объемного весов, эффективной пористости, водонасыщения, магнитных свойств, динамического модуля упругости, акустических параметров, твердости и механической прочности, пустотности, усадки при сжатии, коэффициента разрыхления и др.

Исследования показали, что большинство указанных физико-механических свойств исследованных пород помогает объяснить степень изменения рудовмещающих пород и выработать метод оценки благоприятных (для рудоотложений) геологических структур.

Исследования физико-механических свойств пород выполнялись как по материалам авторов, так и по образцам горных пород, представленным геологами ВИМС (Я. Д. Готманом, Н. А. Хрущовым, В. Т. Пакаловым, Б. С. Черновым, А. Г. Евдохиным, В. С. Кудриным, А. Я. Архипенковой) и ЦНИГРИ (М. М. Константиновым).

Книга написана в основном Н. И. Любимовым, В. И. Морозов принимал участие в разработке методики исследований и в проведении экспериментов.

Большая помощь была оказана работниками Читинского ТГУ и некоторых геологоразведочных партий этого управления в отборе образцов горных пород Северо-Акатувского и Козулинского месторождений полиметаллов, а также сотрудниками лаборатории физико-механических свойств горных пород ВИМС (Н. Г. Жилкиным, М. В. Родиным, Л. Н. Масленниковой) и ЦНИГРИ (Е. В. Варфоломеевой, А. С. Осиповым, И. Б. Богдановым), которым авторы приносят свою сердечную благодарность.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗУЧЕНИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

(краткий литературный обзор)

Использование физических свойств при изучении условий образования магматических пород

Это направление, выдвигаемое ЦНИГРИ, касается вопросов изучения магматизма, т. е. включает решение таких задач, как расчленение интрузивных и эффузивных образований по фазам, потокам, выделение среди них субвулканических, а также гибридных и метасоматических разновидностей, определение термодинамических условий формирования пород и т. д.

Наибольший эффект при решении этих вопросов, по-видимому, имеют магнитные характеристики, хотя и другие параметры (например, объемный вес) также дополняют информацию. Известно, что исследования магнитных свойств позволяют получить данные о составе, структурных особенностях зерен и температурах образования ферромагнитных минералов. В основу этого направления (по данным Е. В. Кузьмичевой) положены следующие геологические и физические предпосылки.

Первая предпосылка основана на общеизвестном факте, что количество железа и титана изменяется в зависимости от состава пород: оно выше в основных породах по сравнению с кислыми. Отклонение от этой зависимости рассматривается как признак изменения состава магматических расплавов. Это позволяет разделять породы по основности и выделять гибридные разновидности.

Вторая предпосылка основана на данных экспериментальной петрологии и заключается в том, что составы твердых растворов окислов железа и титана определяются условиями кислородного давления. Экспериментальными исследованиями [26] установлено, что повышение кислородного давления способствует выделению титаномагнетитов, близких к магнетиту, понижение давления приводит к образованию титаномагнетитов, богатых титаном. Исследования терромагнитных характеристик различных генетических типов базальтов [1] подтвердили зависимость состава титаномагнетитов от физико-химических условий становления магматических образований. На повышение кислородного давления указывает также увеличение содержания гематита и его магнитной модификации — маггемита.

И, наконец, третья предпосылка использует тот факт, что ферромагнитные минералы обладают способностью сохранять информацию о температурах намагничивания. Это позволило Е. Телье, И. Телье

и Г. Н. Петровой разработать методы, позволяющие получить данные о температурах образования ферромагнитных минералов в породах.

При выполнении этих работ обычно проводятся следующие исследования: определение в породах минеральных ассоциаций, включающих ферромагнитные минералы; уточнение составов твердых растворов титаномагнетитовой, ильменит-гематитовой и других серий; выяснение природы естественной остаточной намагниченности горных пород, необходимой для определения температур ферромагнитных минералов.

Использование физико-механических свойств горных пород при изучении условий образования геологических структур, благоприятных для локализации оруденения

Использование физико-механических свойств горных пород в данном случае касается разработки гипотез формирования структур различного характера и, в частности, выделения среди них структур, благоприятных для оруденения. При решении этих вопросов наибольшее значение имеют упругие характеристики. Имеющиеся данные о характере упругих параметров в пределах рудных полей [30] позволяют понять причины различной интенсивности тектонических процессов. Например, по значениям модуля упругости (модуля Юнга), коэффициента Пуассона и других механических свойств можно судить о благоприятных и неблагоприятных условиях для развития в них тех или иных деформаций.

Примером практического использования указанных механических свойств для объяснения деформационных свойств горных пород являются исследования В. Н. Титова о влиянии физико-механических свойств пород на локализацию апатитовых руд в Хибинском массиве [32]. На основании геологических предпосылок становление апатитовых месторождений представляется весьма сложным последовательно развивающимся метасоматическим процессом. Полученные данные по физико-механическим свойствам пород и руд апатитовых месторождений согласуются с таким представлением о генезисе месторождений.

Коническая взбросо-сдвиговая зона, контролирующая размещение апатитовых руд, закономерно образовалась в трахитоидных ийолитах, которые по значению коэффициента Пуассона являются более хрупкими ($\nu = 0,22 - 0,29$) по сравнению с вмещающими их нефелиновыми сиенитами ($\nu = 0,27 - 0,32$). Нефелиновые сиениты также отличаются более высоким модулем упругости ($E \cdot 10^5 = 6,11 - 7,21$), в связи с чем они на определенном этапе формирования месторождения могли экранизовать апатитообразующие флюиды, что отчетливо наблюдается на месторождениях.

Исследованиями доказано также, что из всех пород, развитых в конической зоне — мелкозернистые ийолиты являются наиболее хрупкими ($\nu = 0,06 - 0,22$) и более всего склонными к деформациям.

Не менее показательные примеры использования коэффициента Пуассона и модуля упругости для объяснения деформационной способности горных пород получены В. И. Рехарским [32].

Исследованиями, выполненными совместно с Ю. А. Розановым, доказано, что преимущественное развитие тектонических нарушений и оруденения на одном из объектов разведки приурочено к монцонитам, отличающимся от других пород (гранодиориты, гранодиорит-порфиры) меньшим модулем упругости (5,83 против 5,92—7,12) и меньшим коэффициентом Пуассона (0,16 против 0,21).

Характерно отметить, что к монцонитам приурочены метасоматиты разных гидротермально-метасоматических формаций с медно-молибденовым оруденением. Эти образования обладают меньшими значениями модуля упругости (3,60—4,45 против 5,83) и более высокой эффективной пористостью (1,80—3,86% против 0,99%) по сравнению с неизмененными монцонитами.

К. А. Карамян и С. П. Саркисян [32], изучая роль физико-механических свойств горных пород в размещении медно-молибденового оруденения Дастакерского месторождения, доказали, что относительно низкие значения коэффициента Пуассона в роговиках и гранодиоритах (0,16—0,19) явились причиной их интенсивного дробления и концентрации в них рудоносных трещинных структур. Другие породы (диорит-порфириты, диабазы), лишенные благоприятных структур и оруденения, характеризуются большими значениями коэффициента Пуассона (0,18—0,29), т. е. являются менее хрупкими по сравнению с гранодиоритами и роговиками.

Изучение геологических структур эндогенных рудных месторождений обычно включает в себя два вопроса (по В. М. Крейтеру): 1) происхождение деформационных структур и 2) использование рудоносными растворами этих структур в качестве рудоподводящих, рудораспределяющих и рудовмещающих полостей.

Эти положения ориентируют на детальные структурные исследования и установление практически ценных данных для объяснения механизма образования некоторых геологических структур и их роли в рудообразовании.

Примером таких исследований, проведенных на ртутно-сурьмяных месторождениях Средней Азии, является работа В. П. Федорчука и др.

Исследованиями доказывается наличие оптимальных условий для рудообразования, которые складываются из благоприятной мощности рудовмещающих пород, радиуса изгиба антиклинальных структур, к которым приурочено оруденение, определенной пористости, соответствующей средним ее значениям, определенного угла наклона (не пологий и не крутой) рудолокализирующих структур нарушений, размера и характера рудоподводящих разрывов, интенсив-

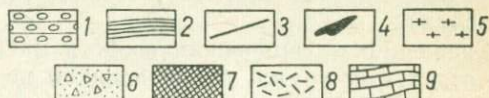
ности гидротермальной переработки руд, характера ореолов рассеяния.

Перечисленные факторы в оптимальном их выражении приведены на рис. 1 (на примере ртутно-сурьмяных месторождений Южной Ферганы).

Факторы рудолокализации	I	II	III
Мощность основного рудовмещающего горизонта			
Радиус изгиба рудовмещающих антиклинальных структур			
Пористость пород			
Угол наклона рудолокализирующих нарулений			
Масштаб рудоподводящих разрывов			
Интенсивность гидротермальной переработки руд			
Насыщенность рудными индикаторами			

Рис. 1. Условия оценки роли и значения различных рудолокализирующих факторов (на примере ртутно-сурьмяных месторождений)

1 — конгломераты; 2 — перекрывающие сланцы; 3 — нарушения; 4 — рудные тела; 5 — рудовмещающие горизонты; 6 — брекчирование; 7 — зоны массового изменения пород; 8 — прожилки и вкрашенность рудных и жильных минералов; 9 — рудовмещающие известняки



Нет сомнения в том, что выделенные оптимальные условия локализации рудных скоплений объясняются различными физико-механическими свойствами рудовмещающих пород.

Имеются примеры моделирования складчатости в условиях продольного изгиба [5]. Хотя полученные результаты дают некоторые представления о явлении складкообразования, они не отражают всего многообразия природных процессов и могут лишь учитываться при анализе складчатых структур, которые наблюдаются в природе.

При изучении механических свойств горных пород обычно принято производить испытания на сжатие и изгиб и в меньшей мере на растяжение, кручение и срез.

Выяснилось, что горные породы в большинстве случаев не подчиняются закону Гука. Для случая одноосного сжатия модуль обычно увеличивается с увеличением нагрузки, что объясняется уменьшением расстояния между поверхностными атомами или ионами двух соседних кристалликов, и, следовательно, увеличиваются силы притяжения, что приводит к увеличению модуля Юнга.

Как показали опыты с растяжением, модуль Юнга горных пород с увеличением нагрузки немного падает по сравнению с опытами на сжатие, так как при растяжении расстояние между атомами и ионами кристаллов увеличивается и силы притяжения уменьшаются.

Прочность горных пород при растяжении значительно меньше, чем при сжатии. Количественное выражение этой зависимости, установленное нами [22], показывает, что предел прочности пород при скальвании в 6—12 раз меньше прочности при сжатии. В свою очередь предел прочности пород при растяжении в 1,5—2 раза меньше сопротивления на скальвание.

Непосредственное отношение к рассматриваемому вопросу имеют результаты определений динамической прочности (крепости) горных пород [23] по методу толчения. Учитывая, что значения динамической прочности пород (Fg) в первом приближении отвечают $1/100$ временного сопротивления породы сжатию, то по данным значений Fg можно определить параметры временного сопротивления породы сжатию.

Из опубликованных данных можно судить о деформационной способности различных пород по составу и структуре. Например, сопоставление параметров динамической прочности магматических, осадочных и метаморфических горных пород дает следующие результаты.

Динамическая прочность осадочных и магматических пород является относительно более постоянной и выдержанной; при этом она обычно ниже у осадочных пород (8,2—12,1) и выше у магматических пород (9,4—17,5). Для метаморфических пород она колеблется в пределах от 7,5 (кристаллические сланцы) до 33,1 (биотитовые роговики).

Сравнение механических свойств магматических пород в пределах отдельных групп, отличающихся по условиям залегания, указывает на относительно более низкую и изменчивую динамическую прочность глубинных пород по сравнению с прочностью гипабиссальных и излившихся пород. Это, по-видимому, объясняется тем, что первые являются крупнокристаллическими породами, преимущественно гипидиоморфнозернистой структуры, и легче разбиваются как вдоль контактов зерен, так и по трещинам спайности внутри них. Вторые обладают порфировой и порфиroidной структурами и благодаря мелкозернистой или криптокристаллической основной массе, часто сцементированной вулканическим стеклом, отличаются большей прочностью и труднее поддаются расколу.

Анализ изменения механических свойств горных пород в зависимости от их кислотности устанавливает, что по мере увеличения кислотности пород динамическая прочность уменьшается. Это наблюдается почти во всех магматических комплексах, кристаллизовавшихся в разных условиях. Объясняется это, по-видимому, главным образом содержанием кварца и других модификаций окиси кремнезема, снижающих динамическую прочность и увеличивающих их деформационные свойства.

Щелочные магматические породы, а также породы с повышенной щелочностью по своим механическим свойствам близки к породам среднего и кислого состава нормального ряда. В их составе решающее влияние на механические свойства оказывает, по-видимому, нефелин — хрупкий, но достаточно твердый минерал с несовершенной спайностью.

Петрографические особенности магматических пород сказались и при определении твердости и механической прочности, установленной различными методами [23]. Ультраосновные и основные породы характеризуются меньшей твердостью и более высокой механической прочностью по сравнению с кислыми и средними (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Глубинные изверженные породы	Твердость по методам			Механическая прочность, кгс/см ² по методам	
	вдавливания штампа, кгс/см ²	истирания, 1/см	Шора	раздавливания	скалывания
Ультраосновные	295	320	57	—	—
Основные	440	480	75	3400	375
Средние	500	550	76	2365	231
Кислые	575	730	78	2130	209

Среди осадочных пород наиболее низкими значениями динамической прочности обладают тонкозернистые и слабометаморфизованные (серцитизированные, хлоритизированные, карбонатизированные) сланцеватые породы (аргиллиты, алевролиты, глинистые сланцы), а также карбонатные породы.

Это объясняется тем, что перечисленные породы состоят из минералов малой твердости и легко раскалываются по плоскостям слоистости.

Механические свойства песчаников и крупнообломочных пород аналогичны соответствующим свойствам магматических пород кислого и среднего состава.

Процесс окремнения в карбонатных породах значительно увеличивает их механические свойства.

Механические свойства метаморфических пород обнаруживают резкие колебания независимо от условий их образования как в группе

контактово-метаморфизованных пород, так и среди пород, измененных региональным метаморфизмом.

На величину динамической прочности прежде всего, по-видимому, влияют минералогический состав и структура последних. Наименее прочными являются породы со сланцеватой структурой, в составе которых преобладают слюдястые минералы и карбонаты (филлиты, мраморы, кристаллические сланцы). Наиболее прочными являются породы массивные, кристаллобластовой структуры, состоящие из амфиболов, пироксенов, граната, магнетита, полевых шпатов (скарны, амфиболиты, железистые кварциты).

Механические свойства при испытании на скалывание и растяжение имеют существенное значение для объяснения деформаций пород, так как установлено, что в земной коре отдельные слои под действием вертикальных сил находятся в условиях поперечного изгиба.

Большое значение имеет изучение механических свойств горных пород при высоких всесторонних давлениях.

Д. Т. Григгсом были проведены опыты по деформации сжатия при давлении 10 тыс. атм, при этом следов разлома не обнаружено, а были лишь плоскости скольжения, соответствующие сдвигам. Такое давление соответствует примерно 30 км глубины земли, где, по-видимому, раскалывание уже невозможно и имеют место только сдвиговые явления; модуль сдвига играет здесь главную роль.

П. В. Бриджмен [2] сжимал вещество с силой 50 000 кгс/мм² и подвергал сдвиговой деформации. При этом наблюдалось изменение фазового состояния вещества. Так, фосфор из одной фазы переходил в другую. Некоторые «спокойные» вещества так меняли свое фазовое состояние, что происходил взрыв. Возможно, фазовые переходы при высоких давлениях приводят к выделению чрезвычайно большой энергии. Объем при таких сдвиговых деформациях изменялся иногда на 20%. Прочность увеличивалась для металлов в десятки раз.

Как показывают опыты П. В. Бриджмена и Д. Т. Григгса, при давлениях на глубинах 20—30 км невозможно существование настоящих разломов, они мгновенно затягиваются и вовсе не ведут к падению прочности, что видно из опытов с хрупким известняком, который при сжатии становится ковким, как железо.

В свете известных экспериментальных работ М. П. Воляровича, Б. В. Залесского, Ю. А. Розанова и других, изучение роли концентрации напряжений в деформации горных пород и рудообразовании приобретают все большее значение. Исследования показывают, что из всех явлений, связанных с деформациями, наиболее значительными являются: возможность высвобождения определенных объемов под нагрузкой, последовательность явлений при деформации, концентрация напряжений, появление новообразований.

Простейшая схема соотношения нагрузки и высвобождения дается в работах В. М. Крейтера [17], В. В. Белоусова [4], П. В. Бриджмена [2], из которых следует, что характер высвобождения зависит от способа нагрузки.

Например, при одностороннем сжатии типичной формой высвобождения является образование полостей от центра приложенных сил к периферии твердого тела, трещин диагонального направления и др. Всестороннее сжатие вызывает образование трещин и полостей в образце от периферии к центру.

Наиболее сложная деформация возникает в анизотропной среде вследствие неодинакового распределения напряжений и различной способности вещества к высвобождению.

Последовательность явлений при деформациях, описанных в работе [28], проливает свет на характер деформации в породе и образование трещин. Ю. А. Розанов исследовал деформацию карбонатных пород в условиях всестороннего сжатия. Последняя выражалась в пластическом течении образца.

В деформированных образцах ($P = 6000 - 6500$ кгс/см²) наблюдаются изменения внутренней структуры, увеличивающейся по мере возрастания приложенного усилия. Структура становится неравномерной зернистой.

В шлифах обнаруживаются системы трещин, причем развиты только трещины, расположенные диагонально к оси образца; они короткие, прерывающиеся, неровные, частично рассекающие, частично огибающие зерна кальцита. Намечается сланцеватость.

Исследователи приходят к выводу, что процесс деформации мрамора при возрастающих ориентированных напряжениях в условиях высокого всестороннего сжатия соответствует природным геологическим условиям — деформации карбонатных пород на значительной глубине.

Деформация внешне выражалась в укорочении образца вдоль его оси и значительном боковом расширении деформируемого цилиндра. Она была в целом пластической, поскольку образец плавно, без видимых разрывов, и необратимо менял свою форму. В процессе деформации происходит течение мрамора, поворот кристаллов, удлинение зерен и постепенное исчезновение двойников.

Одновременно с пластическим течением происходят микроскопические разрывные дислокации, выражающиеся в развитии диагональных трещин скалывания и зон раздробления кальцита.

Сам факт появления трещин при деформации свидетельствует о неравномерном распределении напряжений в породе, отсюда появилось понятие о явлениях концентрации напряжений (за счет увеличения нагрузки или уменьшения площади ее приложения), играющих, вероятно, немаловажную роль в образовании трещин отдельности горных пород, зон повышенной трещиноватости и новообразований в виде милонита, гнейса и др.

Любая деформация в земной коре зависит от всестороннего давления. Совокупность всестороннего и ориентированного давления обуславливает деформации того или иного характера. Упругая деформация происходит с изменением объема, пластическая деформация идет без изменений объема.

В пределах верхних зон земной коры, если принять во внимание трещины и иные деформации, обычно приходится иметь дело с объемным расширением пород при деформации.

Изменение объема, естественно, происходит практически за счет видимых хрупких деформаций, параллельно с изменением объемного веса пород. Любые трещины, брекчии, тертые материалы, милониты и т. д. создают в целом как бы уменьшение объемного веса всей массы пород, вовлеченных в деформацию. В общем объемное увеличение пород прямо пропорционально уменьшению объемного веса этих пород.

С глубиной уменьшаются и исчезают тектонические глины, трещины, кливаж. На значительных глубинах часто объемное «увеличение» имеет знак минус, так как происходит процесс перекристаллизации. Характерная особенность интрузивных пород — уменьшение объема при застывании на 6—10%.

Изучение проблемы объемного расширения пород в связи с проявлением деформационных структур важно для понимания многих процессов. При рассмотрении этого вопроса необходимо учитывать глубинность формирования структуры, характер боковых пород, амплитуду и направление движения при перемещениях, характер самих поверхностей трещин и т. д. Например, в серицитизированных, хлоритизированных, каолинизированных породах даже незначительное перемещение по плоскости трещин создает непроницаемую тектоническую глинку. Наоборот, если вмещающие породы сильно окварцованы, то незначительное движение в плоскости трещин образует зону брекчий.

Относительная «пустотность» к моменту рудоотложения является функцией суммарного действия всестороннего и ориентированного давлений. Учет «пустотности», соответствующей моменту рудоотложения, представляет большие трудности, особенно учет дорудных свободных пространств.

Опыты Фейоля [42] показывают, что полуразрушенный прокаленный сланец, будучи еще более разрушен искусственно, увеличивает свой объем после дробления в среднем на 118%. Производя опыты со сжатием этого разрушенного материала, Фейоль получил сокращение объема, занимаемого породой, находящегося в закономерной зависимости от давления.

Этот метод анализа нами воспроизведен и развит в применении к решению конкретных задач наших исследований.

Первое представление о сжимаемости пород в раздробленном состоянии было опубликовано в трудах ВИМС [20].

Исследования проводились с использованием пород в прокаленном и в непрокаленном состоянии, при этом установлено, что при давлении 1580 кгс/см² объем прокаленной породы становится равным объему исходного образца, а пористость для некоторых пород (гранит, мрамор) возрастает в 3,8—5,7 раза соответственно. В этой работе указывается, что изменение объемных весов, процента усадки, пористости и т. д. в зависимости от давления и температуры позво-

ляет установить связь их с возможными процессами деформаций в земной коре.

Анализируя имеющиеся данные о роли физико-механических свойств горных пород при изучении условий образования геологических структур, благоприятных для локализации оруденения, можно согласиться с мнением многих исследователей [32] о том, что формирование этих структур зависит в значительной степени от физико-механических свойств пород и, в частности, от их хрупкости и упругих характеристик.

В этой связи высокие деформационные способности можно ожидать от кварцсодержащих пород типа гранитоидов, излившихся аналогов кислой магмы, метаморфических пород типа скарнов и роговиков, обладающих невысокими значениями коэффициента Пуассона и модуля упругости. В этом смысле глубинные горные породы основной и ультраосновной магмы и их излившиеся аналоги имеют более высокие значения коэффициента Пуассона, модуля упругости и динамической прочности по методу толчения и, следовательно, обладают меньшей деформационной способностью.

Пустотность горных пород, играющих большую роль при локализации оруденения, может быть изучена как в монолите, так и в раздробленном состоянии при сжатии. В этой связи воспроизводство опытов Фейоля и дальнейшее развитие этих работ при изучении околорудных пород представляют большой интерес.

Использование физико-механических свойств горных пород для количественной характеристики их гидротермально-метасоматических изменений и локализации оруденения

В данном случае использование физико-механических свойств пород касается главным образом решения вопросов рудогенеза, в частности выделение среди пород рудных полей, благоприятных для оруденения, и другие задачи. При решении этих вопросов наибольшее значение имеют такие параметры, как пористость и проницаемость рудовмещающих пород, механические и упругие свойства.

Многочисленными исследованиями на целом ряде месторождений установлены характер изменения пористости в связи с гидротермальными и гидротермально-метасоматическими процессами, а также величины оптимальных значений эффективной пористости горных пород, наиболее благоприятные для рудоотложения.

Этому вопросу была посвящена серия докладов на симпозиуме, состоявшемся в 1964 г. [38]. Особенно интересными были доклады Ю. А. Розанова, Л. И. Звягинцева, В. А. Королева и др.

Ю. А. Розанов в докладе «Роль физико-механических свойств горных пород в формировании структур месторождений и локализации оруденения» фактически обобщил свои работы, в том числе работы, опубликованные им в соавторстве с другими специалистами

в 1961, 1963, 1964, 1965 гг. Из этих обобщений, например, следует вывод о том, что пористость характеризует способность пород к рудовмещению. Повышенная пористость обеспечивает участие в процессах большого количества раствора, что в свою очередь обуславливает масштабы происходящих гидротермальных изменений. Кроме того, исследование физико-механических свойств рудовмещающих пород позволяет получить дополнительные данные для обоснования генетических построений по отдельным месторождениям и использования их при разработке общих положений теории рудообразования.

При характеристике роли физико-механических свойств в изменении окolorудных пород большое значение имеют геологические предпосылки.

Горные породы, измененные в результате проявления магматогенных рудоотлагающих процессов, не только сопровождают руды, но нередко и сами являются рудами, поэтому важно уяснить критерии отличия измененных пород от первичного их состояния. Рудообразующие растворы при продвижении и отложении жильных и рудных минералов уравниваются силы, стремившиеся сократить свободные пространства в породах. В. М. Крейтер [17] подчеркивает, что учет «пустотности», соответствующей моменту рудоотложения, представляет большие трудности, так как магматические процессы затушевывают действительную картину явлений. Справедлива и ссылка на В. С. Линдгрена, показавшего, что в твердых породах метасоматоз происходит без изменения объема породы и что пространство для выделения нового минерала создается растворением замещаемого минерала.

Среда, в которой возникает оруденение, не остается постоянной. Она изменяется под действием температуры и давления в земной коре, а также возникновения складчатых структур под влиянием тангенциальных усилий в данном участке земной коры. Условия раскалывания, перемещение отдельных глыб также накладывают определенный отпечаток на рудовмещающие породы. Это изменение внутренних условий среды влияет на основные черты рудного поля в смысле образования рудных полостей и проявления интрузивной деятельности.

Есть предположение, что рудообразующие растворы, попав в данную трещину, как бы раздвигают ее и таким образом образуют полость, в которой и образуется рудное тело. Однако это явление более сложное по своему действию, связанному с растворением, выносом и приносом вещества. Этот процесс охватывает различные области окolorудных изменений пород, начиная от узких зальбандов возле жилы до больших участков рудовмещающих пород.

Здесь следует сослаться на доклад В. А. Королева, Ш. А. Оратхулаева, В. В. Овечкина «Изменение некоторых физических свойств пород Актюзского района в зависимости от геологоструктурных факторов» [38].

Рассматривая амфиболовые сланцы в зависимости от гидротермального изменения, авторы выделяют наименее измененные амфи-

боловые сланцы, сланцы карбонатизированные, окварцованные, эпидотизированные, хлоритизированные и альбитизированные.

По отношению к малоизмененным амфиболовым сланцам, имеющим эффективную пористость 1,46%, карбонатизированные имели наименьшую пористость ($\sim 1,0\%$), окварцованные — близкую к малоизмененным сланцам ($\sim 1,5\%$), эпидотизированные, хлоритизированные и альбитизированные — более 1,5%. Авторы полагают, что процессы карбонатизации протекали с преобладающим привносом извести, которая могла заполнить часть открытых пор. Наоборот, при эпидотизации, хлоритизации и особенно альбитизации эффективная пористость возрастала. Это в свою очередь указывает на выщелачивание и частичный вынос вещества. Окварцевание, по мнению авторов, не влияло на изменение эффективной пористости, так как оно протекало без существенного привноса и выноса и в значительной мере происходило за счет перераспределения кремнезема и изменения формы его выделения.

963
Проблемы изучения закономерностей образования рудных полей широко затрагивались Ф. И. Вольфсоном [9]. Из его работы следует, что до сих пор все еще проведено мало исследований и в должной мере даже не обобщен собранный материал по вопросу о том, каковы геологические, структурные, литологические и геохимические закономерности образования рудных полей месторождений различных генетических типов в различной геологической обстановке. Неполностью выяснены также закономерности пространственного размещения отдельных рудных месторождений внутри рудных полей. Недостаточно обобщены и фактические данные для суждения о глубине распространения оруденения в отдельных рудных телах и месторождениях.

До последнего времени остаются недостаточно выясненными вопросы взаимоотношений глубины распространения оруденения с изменчивостью состава гидротермально измененных пород, вещественного состава руд и с особенностями структур гидротермальных месторождений. Не ясны пока причины, приводящие к движению рудоносных растворов в верхние части литосферы, и механизм этого движения. Подавляющее большинство гидротермальных месторождений приурочено не к трещинам, образовавшимся в результате прорыва паров и газов, а к тектоническим нарушениям, возникающим значительно позже остывания апикальной части интрузивов. Многие здесь зависят от физико-механических свойств среды (горных пород), в которой протекают физико-химические и геохимические процессы. Именно они во многих случаях являются причиной различного характера оруденения и его пространственного размещения.

Имеющиеся данные по исследованию физико-механических свойств горных пород при изучении генетических вопросов рудогенеза указывают на их контролирующее значение.

В докладе В. И. Старостина [38], посвященного изучению роли физико-механических свойств пород в локализации Еман-Каспийского колчеданного месторождения, указывается, что непосредственно на



рудоотложение существенно влияют пористость и проницаемость пород. Оптимальная величина эффективной пористости составляет 4—8%. Более пористые породы обычно легко проницаемы и при отсутствии экранирующих поверхностей неблагоприятны для рудоотложения. Характерно отметить, что рудовмещающие кварц-серицит-хлоритовые породы, вмещающие вкрапленное оруденение, имеют низкую твердость по Шору (53), высокий коэффициент уплотнения (46%), а также сравнительно невысокий коэффициент Пуассона для всего комплекса рудовмещающих пород (0,12—0,24).

И. П. Тимченко в своем сообщении на симпозиуме в 1964 г. [38] отметил влияние пористости и трещиноватости рудовмещающих пород на степень и характер оруденения. По его данным в породах с высоким временным сопротивлением (более 3000 кгс/см²) трещины почти не образуются. Количество трещин на 1 м керна не превышает 10—12. Поступление рудоносных растворов в такие породы (воластенит-пироксеновые скарны) затруднено. Их поровое пространство не может быть использовано для локализации полиметаллического оруденения. Пироксен-гранатовые скарны, образовавшиеся при менее высоких температурах, обладают меньшей механической прочностью при сжатии (2100 кгс/см²). Эти породы легче дробятся, имеют более высокую эффективную пористость (в среднем 4%), что облегчает поступление в их поровое пространство рудоносных растворов.

По Л. Грейтону [10] химизм измененных окolorудных пород, возникающих под воздействием гидротермальных растворов, лучше всего вскрывает прирودу их изменений.

Однако имеются многочисленные примеры, когда горные породы, слагающие месторождение, близки по составу, и в этом случае распределение оруденения обуславливается именно физико-механическими свойствами.

Особое значение изменению пород как поисковому признаку придает Т. С. Ловеринг [21]. Он, в частности, указывает, что контуры измененных пород могут повторять контуры проводников рудных растворов и самих рудных тел. В этом смысле количественная характеристика окolorудных пород по плотности, пористости, магнитной восприимчивости и т. д. может явиться поисковым признаком.

В этой связи можно сослаться на доклад Н. А. Никифорова [38] «Пористость некоторых типов горных пород в разных геологоструктурных условиях и ее влияние на размещение ртутного оруденения». Анализ условий размещения оруденения в слоистых породах позволил установить оптимальное значение эффективной пористости, особенно благоприятной для локализации сурьмяно-ртутного оруденения. На разных месторождениях оно колеблется от 1,8 до 3,5%. Установленные значения оптимальной пористости учитываются при разработке поисковых критериев и составлении детальных прогнозных карт, являющихся основой для глубинных поисков сурьмяно-ртутного оруденения.

Вопросам окolorудных изменений посвящены труды ВСЕГЕИ [16], в которых рассматриваются причины локализации оруденения

в скарнах и карбонатных породах. Из этой работы следует, что отложение руд происходит путем замещения силикатов скарна, а также контактируемого со скарном известняка или реликтов известняка в скарне и заполнения открытых трещин или брекчированных участков скарна. Это объясняется прежде всего тем, что пористость скарнов более высокая, чем исходных карбонатных и силикатных пород.

Количественное выражение благоприятных условий локализации оруденения в скарнах, благодаря их повышенной пористости, мы находим в докладе Ю. А. Розанова [38] и других исследователей.

Интересна работа А. С. Павленко [27] по исследованию особенностей метасоматоза в одном из районов Северного Криворожья. Автором отмечается, что, как правило, интенсивные проявления метасоматоза наблюдаются в благоприятных структурных узлах, связанных с резкими перегибами и поворотами основной синклинальной структуры.

Последующими исследованиями в Кривом Роге доказано большое влияние физико-механических свойств пород на формирование рудоуправляющих структур и локализацию железных руд Большого Кривого Рога.

В докладе Г. В. Тохтуева на симпозиуме в 1971 г. [32] отмечалось, что железисто-кремнистые формации слагаются неоднородно слоистыми породами с резко различной пластичностью и жесткостью слоев. Тектонические нарушения характеризуются развитием хрупких деформаций в жестких слоях и пластическим течением в относительно пластичных слоях. Это в свою очередь приводит к межбудинажным пережигам и относительно большим обогащениям рудным веществом.

Геологические предпосылки и примеры околорудных изменений горных пород используются геологами при поисках новых рудопроявлений и участков, благоприятных для локализации оруденения. Однако имеются многочисленные примеры, когда геологические предпосылки бывают выражены далеко не достаточно, и для их количественной характеристики необходимо пользоваться физико-механическими свойствами.

Так, например, по данным Х. К. Куддусова [38], физико-механические свойства вмещающих пород месторождения Акташского рудного поля колеблются в широких пределах. Однако для пород из рудоносных зон характерна высокая пористость (2,49—7,99%), низкие значения модуля упругости ($1,9—4,8 \cdot 10^5$ кгс/см²) и относительно низкие скорости упругих волн (2660—4500 м/с).

Не менее показательны результаты исследований В. И. Кусевича, Н. А. Никифорова и Х. К. Рахимова [38]. По их данным избирательная локализация низкотемпературного ртутного оруденения вблизи по своим химическим свойствам известняках и доломитах, особенно на участках с близкими структурными позициями, обуславливается главным образом различиями физико-механических свойств пород.

Как показали исследования, ртутное оруденение приурочено к горизонтам пород с наиболее высокими значениями модуля упругости ($6,95 \cdot 10^5$ — $7,95 \cdot 10^5$ кгс/см²).

Тектонические напряжения в таких породах реализовались преимущественно в виде разрывных деформаций, а также повышения пустотности и эффективной пористости.

В рудную стадию минерализации происходили уменьшения эффективной пористости пород в 1,4—1,5 раза в результате заполнения пустот рудными минералами.

Изучение эффективной пористости в пределах потенциально рудоносных комплексов позволяет целенаправленно вести поиски на выявление конкретных месторождений и рудных тел.

Из сказанного видно, что для рудных полей изучение физических свойств было направлено прежде всего на выяснение роли различных физико-механических свойств в формировании месторождений на целом ряде объектов разведки. Было установлено, что такие свойства, как упругость, прочность, хрупкость и пластичность пород, играют важную роль при образовании разрывных и складчатых структур, а проницаемость, пористость пород — при локализации оруденения.

Было показано также большое значение количественных характеристик изменений физико-механических свойств горных пород в процессе гидротермального метаморфизма и их контролирующее значение при рудогенезисе.

Многие вопросы использования физико-механических свойств горных пород при разведке и поисках месторождений горючих полезных ископаемых (уголь, нефть, газ) отражены в монографии [39]. Анализ огромного количества материала позволил авторам выявить основные закономерности изменения физических свойств осадочных пород в зависимости от условий их залегания и других геологических факторов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

В настоящей главе описаны те методы, которые были использованы нами при выполнении исследований горных пород. Поскольку большинство методик изучения физико-механических свойств пород описано в литературе, мы ограничимся лишь кратким указанием на метод определения того или иного физико-механического параметра. В тех случаях, когда метод разработан в процессе наших исследований, его характеристика будет дана более подробно.

Определение объемного веса и эффективной пористости

Эти параметры определялись в основном методом гидростатического взвешивания.

Метод определения объемного веса и пористости в образцах, предварительно обработанных. Этот метод, разработанный в ИГЕМ АН СССР, является наиболее точным. Каменный материал при этих определениях не должен быть изменен поверхностными процессами, которые могут исказить данные о пористости пород, обусловленной первичным составом и характером их изменений.

Применение этого способа определения объемного веса и эффективной пористости требует предварительной обработки образцов горных пород. Каждый образец распиливается на три параллельные плиточки размером $5 \times 5 \times 0,7$ см. Края и поверхность плиточек слегка шлифуются. Необходимым условием является отсутствие трещинок и каверн, в которых может задерживаться вода. Обработанные плиточки высушивают в сушильном шкафу при температуре $105-110^\circ \text{C}$ для получения постоянного веса, после чего образцы взвешивают и помещают в ванночки для водонасыщения.

Объемный вес определялся после водонасыщения на пятые сутки, при этом за окончательный результат принималось среднеарифметическое значение измерений трех плиточек. Эффективная пористость определяется методом свободного 45-суточного водонасыщения. При этом измерения производятся на первые, третьи, пятые, десятые, пятнадцатые, тридцатые и сорок пятые сутки. Установлено, что по истечении 45 суток образцы получают максимальное насыщение.

Метод определения удельного и объемного весов и эффективной пористости гидростатическим взвешиванием в образцах без предварительной их обработки.

Форма образца может быть неправильная. Образцы размером около 5 см^3 в количестве 25—30 и более помещают в сушильный шкаф для высушивания до постоянного веса при температуре 105°C в течение 15 часов. Высушенные образцы охлаждают в эксикаторе в течение 50 мин. После выдержки образцы взвешивают на аналитических (технических) весах для определения веса породы в сухом состоянии (p_1), а затем партию образцов помещают в плоский сосуд (стеклянная или жестяная ванночка) для насыщения дистиллированной водой в течение 48 часов. Вода поступает в виде капель со скоростью 30—40 капель в минуту. Этим достигается постепенное вытеснение воздуха водой. Поступление воды в сосуд с образцами прекращается после того, как все образцы будут покрыты водой.

По истечении срока насыщения образцов породы водой последние взвешиваются в воздухе (p_2). Перед взвешиванием каждый образец обтирается влажной фильтровальной бумагой. Насыщенные водой образцы также взвешиваются в воде для определения значения p_3 .

Удельный (γ), объемный (σ) вес и эффективную пористость ($P_{\text{эф}}$) образцов вычисляют по следующим формулам:

$$\gamma = \frac{p_1}{p_1 - p_3}, \text{ г/см}^3;$$

$$\sigma = \frac{p_1}{p_2 - p_3}, \text{ г/см}^3;$$

$$P_{\text{эф}} = \frac{\gamma - \sigma}{\gamma} \cdot 100\%.$$

Сопоставление результатов определения эффективной пористости по тому и другому методу дает вполне удовлетворительные результаты. Однако преимуществом метода определения указанных свойств на образцах без предварительной их обработки является то, что он может с успехом применяться в геологоразведочных партиях и экспедициях. Оборудование для применения этого метода малогабаритное и вполне размещается в двух-трех выючных ящиках. Основная часть определений указанных свойств горных пород выполнена по этому методу.

Определение коэффициента водопоглощения

Высушенные и взвешенные образцы пород размером около 5 см^3 помещают в металлический или стеклянный сосуд и насыщают водой капельным способом. Подача воды производится с такой скоростью, чтобы все образцы покрылись водой за 8 часов. Далее образцы оставляют в воде еще на четверо суток, затем вынимают, обтирают влажной фильтровальной бумагой и взвешивают.

Коэффициент водопоглощения определяется по формуле

$$W = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \cdot 100\%,$$

где P_1 — вес породы, высушенной до постоянного веса; P_2 — вес породы после водонасыщения.

Определение газопроницаемости

Измерение газопроницаемости пород производилось на приборе конструкции Е. Л. Зака. Прибор усовершенствован Н. И. Любимовым, предложившим использовать прокладку из вакуумной резины взамен заливки пространства между образцом и обоймой стального стакана сплавом Вуда, что ускоряет определения и делает их более безопасными. Кроме того, экономится дефицитный материал. Точность измерения не снижается.

Образцами для измерения служат цилиндры, диаметр и высота которых равны 30 мм. О газопроницаемости пород судят по количеству газа, который прошел через образец и вытеснил из газометра тот или другой объем жидкости (воды). Коэффициент газопроницаемости определяется по формуле

$$K = \frac{2\mu v l P_{\text{бар}}}{S(P_1^2 - P_2^2)t} \cdot 1000 \text{ мд},$$

где μ — вязкость азота, спз (0,017); v — объем газа (количество вытесненной воды), см³; l — высота образца, см; $P_{\text{бар}}$ — барометрическое давление, атм; t — время опыта, с; S — площадь поперечного сечения образца, см²; P_1 — давление газа перед образцом, атм (+1 с учетом атмосферного давления); P_2 — давление газа после образца, атм (+1).

Определение магнитной восприимчивости

Первоначально определение магнитной восприимчивости производилось на капнометре КИ-2 Барнаульского завода. Это индукционный прибор и предназначен он для измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных образцов горных пород и руд.

В дальнейшем для измерения магнитной восприимчивости использовались капнометр Степанова и капнометр марки ИМВ-2. Эти приборы позволяют измерять магнитную восприимчивость в поле Земли ($\kappa = 0,5 \text{ э}$) простым и высокопроизводительным способом. Относительная среднеквадратичная ошибка составляла 10—12%. Для небольшой части образцов определение магнитной восприимчивости произведено на проницмере. Естественно, данные, полученные на проницмере, нельзя сопоставлять с результатами, полученными на капнометре. В тех случаях, когда измерения выполнены на проницмере, в работе сделана специальная сноска.

Определение упругих характеристик

Упругие параметры горных пород определяли на установке ИПА-59* с использованием методик продольного профилирования и прозвучивания. В последнем случае определялась только одна продольная волна v_p .

При продольном профилировании все точки изучения и приема располагаются на одной прямой — профиля наблюдения. Излучатель устанавливается неподвижно, а приемник постоянно передвигается. Применение принципа фазовой корреляции позволяет выделить индивидуальные волны, определить их скорости, а по ним, применяя известные формулы, рассчитать динамический модуль упругости ($E \cdot 10^5$ кгс/см²), ν — коэффициент Пуассона (безразмерная величина) и G — модуль сдвига ($6 \cdot 10^5$ кгс/см²).

Использование ультразвука позволяет также определить акустическое сопротивление R по формуле

$$R = v_p \cdot \sigma, \text{ г/см}^2 \cdot \text{с},$$

где v_p — скорость распространения продольных волн, м/с; σ — объемный вес породы, г/см³. Этот параметр является весьма показательным при характеристике измененных рудовмещающих пород.

Для характеристики рудовмещающих пород нами разработан и применен показатель относительной напряженности пород в монолите λ , который определяется по формуле

$$\lambda = \frac{E}{P_{эф}}, \text{ кгс/см}^2,$$

где E — динамический модуль упругости, 10^5 кгс/см²; $P_{эф}$ — эффективная пористость породы.

В работе использованы параметры некоторых механических свойств горных пород — твердость по методам истирания, царапания и затухающих колебаний Шора; динамическая прочность по методу толчения; удельная ударная вязкость; временное сопротивление горных пород сжатию, скалыванию и растяжению. Описание методов определения указанных свойств приведено в работе [22].

Определение сжимаемости раздробленных горных пород

При постановке этих исследований преследовалась цель определения сжимаемости горных пород в зависимости от вещественного состава для выявления возможной «пустотности» в породах. Дело в том, что учет «пустотности» в породах, соответствующей моменту рудоотложения, представляет большие трудности, особенно учет

* Для этой цели также применялся сейсмокоп ИКЛ-5, приспособленный для измерения акустических свойств горных пород.

дородных свободных пространств. С этой точки зрения метод исследований, основанный на сжимаемости раздробленных горных пород в зависимости от их вещественного состава, может объяснить образование геологических структур, благоприятных для рудоотложения. Эти предположения основываются на результатах известных опытов Фейоля [42], показавших закономерное изменение объема раздробленной горной породы при сжатии.

В нашей литературе [6] результаты исследований Фейоля освещены в связи с изучением условий управления кровлей. Нас же интересуют результаты этих работ в связи с изучением степени сжимаемости различных горных пород в раздробленном состоянии и возможного высвобождения объемов, благоприятных для рудоотложения.

Метод испытания пород в раздробленном состоянии сводился к определению зернистости M_3 , коэффициента разрыхления K_p , процента усадки при всестороннем сжатии C_f , пустотности после сжатия l_p , модуля упругости сжатого порошка E_2 .

Испытание заключалось в следующем.

1. После взвешивания образца на аналитических весах с точностью до 1 мг и определения объема (методом разностей уровней жидкости) с точностью до 0,2 см³ образцы горной породы вновь высушивали до первоначального (постоянного) веса и подвергали дроблению на валках с зазором между ними в 3,36 мм (6 меш).

2. После дробления производили ситовой анализ с набором сит: 6, 10, 20, 50 и 100 меш.

Время просеивания через каждое сито вначале составляло 3 мин, затем 1 мин.

После взвешивания каждой фракции подсчитывали среднюю зернистость по формуле

$$M = \sum \frac{(y_1 + y_2) \Delta x}{200}, \quad (1)$$

где y_1, y_2 — две соседние величины процентного содержания фракций; Δx — разница в размере сит между двумя соседними размерами; 200 — постоянный коэффициент.

3. После определения средней зернистости раздробленную массу тщательно перемешивали на листе кальки методом кольца и конуса (трехкратное составление конуса и площадки), затем порциями засыпали в градуированную мензурку, одновременно уплотняя массу в ней постукиванием по мензурке деревянной палочкой. Точность фиксируемого объема равна приблизительно 0,2 см³.

4. При дроблении горных пород объем их, как известно, увеличивается.

Отношение объема породы в разрыхленном состоянии к первоначальному объему в монолите — коэффициент разрыхления K_p — выражается формулой

$$K_p = \frac{v_2}{v_0}, \quad (2)$$

где v_0 — объем породы до дробления, см^3 ; v_2 — объем породы после дробления, см^3 . При определении коэффициента разрыхления в формулу (2) вводится поправка на потери при дроблении, тогда

$$K_p = \frac{v_2}{v_0 \frac{q_2}{q_0}} = \frac{v_2}{v_0 q_2}, \quad (3)$$

где q_0 — вес породы до дробления, г; q_2 — вес породы после дробления, г.

5. После определения объема раздробленную породу засыпают порциями в прессформу, постукивая по ней металлическим предметом для уплотнения и равномерной укладки зерен.

На уровне уложенной массы в прессформу подводят площадку, в которую упирается стержень индикатора, и закрепляют винтом. Нулевое значение индикатора соответствует линейной величине занимаемого объема раздробленной массы.

При всестороннем сжатии и высоком давлении (1580 и 3000 $\text{кгс}/\text{см}^2$) раздробленная порода почти достигает своего первоначального объема.

Нагрузка ведется плавно при помощи гидравлического насоса с приводом от электромотора. Отсчет нагрузки производят по манометру с точностью до 1 $\text{кгс}/\text{см}^2$. Конечное значение линейной величины при 3000 $\text{кгс}/\text{см}^2$ служит основанием для определения объема сжатой раздробленной породы v_3 .

$$v_3 = F \cdot h, \quad \text{см}^3 \quad (4)$$

и объемной усадки C_f

$$C_f = \frac{v_2 - v_3}{v_2} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где v_3 — объем сжатой раздробленной породы, см^3 ; v_2 — объем до сжатия, см^3 ; C_f — объемная усадка, %; h — высота столба сжатой породы, см; F — площадь рабочего пространства прессформы.

Объемный вес раздробленной породы в сжатом состоянии (под нагрузкой) равен

$$r_1 = \frac{q_2}{v_3}, \quad \text{г}/\text{см}^3, \quad (6)$$

а объемный вес раздробленной породы после сжатия (при снятой нагрузке)

$$r_2 = \frac{q_2}{v_3^1}, \quad (7)$$

где q_2 — вес раздробленной массы пород; v_3^1 — объем раздробленной породы после снятия нагрузки.

Соответственно вычисляется пористость (пустотность) сжатого порошка

$$l_p = \frac{\gamma - r_1}{\gamma} \quad (8)$$

и пористость (пустотность) сжатого порошка после разгрузки

$$l_p^1 = \frac{\gamma - r_2}{\gamma}, \quad (9)$$

где γ — удельный вес, г/см³ *.

Данные, полученные при всестороннем сжатии порошка, могут быть использованы для сопоставления с аналогичными параметрами образца в монолите и для определения соотношений между ними.

Так, по отношению пористости (пустотности) породы в раздробленном состоянии после сжатия l_p к пористости породы в образце $P_{эф}$ можно получить новую величину, указывающую на ее относительную пустотность ($\eta = l_p/P_{эф}$).

По такому же принципу можно определить относительный модуль упругости ε , представляющий отношение модуля упругости образца E к модулю упругости сжатого порошка породы после раздробления E_2 .

Показатель относительной напряженности породы в раздробленном состоянии определяется по формуле $\lambda' = E_2/l_p$.

Определение числовых значений указанных отношений является составной частью нового метода анализа рудовмещающих пород в монолите и в раздробленном его состоянии после сжатия.

Методика работы по установлению влияния температуры на образование трещин в горных породах

Изучение трещиноватости (пустотности) горных пород имеет большое значение для объяснения геологоструктурных факторов локализации рудного вещества.

Пустотность пород, складывающаяся из пористости, трещиноватости и других факторов, может изменяться в широких пределах, в зависимости от давления и температуры.

Влияние давления на изменение пустотности достаточно хорошо изучено в Институте физики Земли (М. П. Воларовичем и Д. Б. Балашовым [8]), а образование пустотности в зависимости от температуры — в ВИМС.

Очень важно решить вопрос о методе, при помощи которого можно было бы определять это изменение. В Институте физики Земли о результатах опытов при всестороннем сжатии пород судили по скорости прохождения продольных волн в образце. Этот метод исследования

* Удельный вес определяется обычным пикнометрическим методом.

оказался вполне надежным и при изучении образования пустотности в зависимости от температуры.

Соблюдался следующий порядок проведения работ:

1. При комнатной температуре производили замер физических свойств образца (объемного веса, пористости, механической прочности, магнитной восприимчивости, скорости распространения продольных волн).

2. Определяли вес образца и точные геометрические размеры.

3. Нагревали образец в электрической трубчатой печи с терморегулятором типа Т-50/600. Образец находился в герметически закрытой печи до получения заданной температуры (от 100 до 1000° С).

4. После нагревания образец охлаждали до комнатной температуры, после чего определяли каждый раз потери веса и скорость распространения упругих волн.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опыты по сжимаемости горных пород в непрокаленном и прокаленном состоянии

Эти исследования проведены в ВИМС с целью:

- 1) определения зависимости объема раздробленных горных пород от действия нагрузки (давления);
- 2) установления коэффициента разрыхления пород в зависимости от степени раздробления (от гранулометрического состава), т. е. увеличения объема после раздробления;
- 3) выявления зависимости изменения пористости и объемного веса раздробленных пород от нагрузки (давления) как при нормальной температуре (комнатной), так и при нагреве до 1000°C .

Как следует из методики, исследования по сжимаемости пород производились в основном при удельной нагрузке 1580 кгс/см^2 . Эта нагрузка соответствует примерно давлению на глубине около 5 км, где предположительно образуется большинство эндогенных месторождений полезных ископаемых.

Опыты производились на образцах гранита, андезита, мрамора и песчаника. Породы были типичные по составу и хорошей сохранности. В каждом из опытов испытания проводились на пяти образцах от каждой породы.

Физико-механические свойства пород в нераздробленном виде до прокаливания и после него. Определенный интерес представляют физико-механические свойства пород с ненарушенной структурой до прокаливания и после него.

Как видно из табл. 2, прокаливание образцов до температуры 1000°C в значительной мере изменяет свойства горных пород. Вес образцов уменьшился: гранита на 0,6%, андезита на 0,8%, мрамора на 31% и песчаника на 1,3%. Произошли изменения удельного и объемного весов, что нашло свое отражение в показателях пористости, которая возросла по граниту в 2,12, а по мрамору в 2,7 раза. Пористость же андезита и песчаника уменьшилась на 12 и 15% соответ-

Таблица 2

Показатели	Гранит	Андезит	Мрамор	Песчаник
Вес образца, г	29,494	24,816	26,097	23,526
	29,341	24,615	17,999	23,266
Удельный вес образца, г/см ³	2,69	2,77	2,88	2,68
	2,74	2,71	2,92	2,66
Объемный вес, г/см ³	2,60	2,26	2,79	2,30
	2,58	2,26	2,39	2,34
Пористость эффективная, %	3,4	18,4	4,9	14,2
	7,5	16,2	18,1	12,0
Коэффициент упругости (по Шору)	0,818	0,824	0,632	0,600
	0,692	0,663	0,402	0,529
Скорость распространения продольных волн, м/с	3200	2880	4262	2550
	976	2464	1539	523
Прочность на скалывание, кгс/см ²	206	161	62	59
	—	—	—	—
Твердость на истирание, 1/см	669	226	30	10
	—	—	—	—
Магнитная восприимчивость $\times 10^{-6}$, ед. CGSM	50	1181	0	0
	812	1181	0	0
Коэффициент разрыхления K_p	1,86	1,80	1,70	1,68
	1,68	1,66	1,61	1,94

Примечание. В числителе приведены данные до прокаливания, в знаменателе — после прокаливания.

ственно. Прокалывание образцов особенно сказалось на показателях упругих свойств пород. Коэффициент упругости по Шору снизился: для гранита на 15%, андезита 19%, мрамора 34% и песчаника 12%. Скорость продольных волн в прокаленных породах оказалась ниже: в граните на 69,5%; в андезите на 14,5%; в мраморе на 64%; в песчанике на 79,5%. Испытание образцов на магнитную восприимчивость производилось на проницмере ПРМ-2 Калашникова. Оказалось, что осадочные породы (мрамор, песчаник) невосприимчивы как до, так и после прокаливания. Вместе с тем магнитная восприимчивость гранита после прокаливания возросла в 16 раз, а андезита — осталась без изменения.

Результаты исследований по сжимаемости раздробленных пород в непрокаленном состоянии. Эти опыты также были проведены на примере гранита, андезита, мрамора и песчаников.

Результаты опытов приведены в табл. 3, из которой видно, что раздробленная порода более крупной фракции (—6 + 10 меш) имеет

Таблица 3

Порода	Номера образцов	Гранулометрический состав, г					Вес дробленной породы, г	Объем		Увеличение объема, %	
		— 6+10	— 10+20	— 20+50	— 50+100	— 100		первоначальный, см ³	дробленной породы, см ³		
Гранит	1	7,210	5,834	5,484	2,242	3,335	24,105	9,247	15,0	159,20	
	2	—	6,871	7,090	4,830	5,827	24,618	9,581	15,5	161,78	
	4	—	—	7,025	6,156	12,015	25,196	9,449	18,0	190,60	
	6	—	—	—	6,101	18,572	24,673	9,331	20,0	215,00	
	7	—	—	—	—	25,898	25,898	9,771	20,0	204,70	
	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Андезит	2	5,086	8,394	6,396	1,393	3,454	24,723	10,026	18,0	179,60	
	3	—	8,968	7,837	2,820	3,840	23,465	9,550	16,5	172,80	
	4	—	—	12,114	4,278	8,179	24,571	9,873	17,5	117,30	
	6	—	—	—	6,008	18,031	24,034	10,027	17,5	175,00	
	8	—	—	—	—	23,889	23,889	9,846	19,0	193,20	
	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Мрамор	4	11,460	7,029	3,381	0,441	3,973	26,284	9,620	17,0	176,80	
	5	—	10,583	6,666	1,958	8,043	27,250	9,847	15,5	157,72	
	6	—	—	9,751	3,442	14,193	27,386	9,716	16,0	164,70	
	7	—	—	—	4,861	22,052	26,913	9,665	17,0	175,90	
	8	—	—	—	—	26,583	26,583	9,776	17,0	173,90	
	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Песчаник	1	5,505	4,168	5,197	6,740	3,093	24,703	10,374	17,0	163,9	
	7	—	5,251	4,844	7,793	5,926	23,864	10,811	17,0	164,9	
	8	—	—	5,713	10,928	7,440	24,081	10,036	17,0	169,4	
	10	—	—	—	13,755	9,929	23,684	9,786	17,0	173,9	
	3	—	—	—	—	—	24,611	24,611	9,949	17,0	170,9
	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

меньший объем по сравнению с объемом более мелких фракций.

Средние данные увеличения объема породы после раздробления составили (в %): для гранита 186,2; андезита 179,5; мрамора 169,8; песчаников 168,0.

Отсюда коэффициент разрыхления составил: для гранита 1,86; андезита 1,79; мрамора 1,70; песчаника 1,68.

Наибольшие отклонения от средней величины объемов в зависимости от крупности зерен дает гранит. В остальных породах измельчение на более или менее крупные зерна не дает значительных колебаний в увеличении объема.

Эта зависимость была получена также Фейодем [42], производившим опыты по разрыхлению пород. Однако абсолютные величины коэффициента разрыхления в наших опытах отличаются от результатов опытов Фейоля примерно на 25% в сторону снижения.

Показатели объемной сжимаемости до и после прокаливании приведены в табл. 4.

Таблица 4

Показатели	Гранит	Андезит	Мрамор	Песчаник
Объем пород после сжатия, см ³	12,64	12,09	9,71	10,81
	11,95	10,46	8,51	12,73
Процент усадки	28,5	31,6	41,1	36,5
	40,1	41,8	46,8	33,0
Объем пород к первоначальному состоянию в монолите, %	132,9	122,6	100,26	107,3
	100,6	96,3	85,4	130,3
Объемный вес, г/см ³	2,01	2,01	2,78	2,24
	2,43	2,32	2,10	1,78
Пористость (общая), %	24,6	17,1	7,3	10,7
	12,9	14,4	28,1	33,1
Пористость эффективная, %	3,4	18,4	4,9	14,2

Примечание. В этой и следующей таблицах в числителе приведены данные до прокаливании, в знаменателе — после прокаливании. При определении эффективной пористости исходный образец взят в нераздробленном виде.

Опыты проводились при давлении до 1580 кгс/см². Общий характер изменения объема породы, объемного веса и пористости показан на примере исследования гранита (рис. 2).

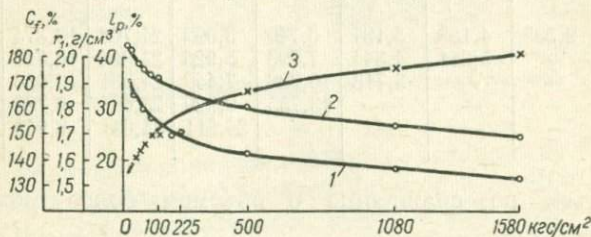


Рис. 2. Зависимость свойств раздробленного гранита от давления
1 — объемная усадка (C_p); 2 — пористость (I_p); 3 — объемный вес (r_1)

Для других пород (мрамор, песчаник, андезит) получены аналогичные зависимости. Следует отметить, что наибольшая усадка наблюдается при давлении 100—200 кгс/см². При дальнейшем увеличении давления кривые усадки имеют более пологий вид.

Исследования также показали, что объемная сжимаемость пород в раздробленном состоянии до прокаливании составила: для мрамора 100,26%; песчаника 107,3%; андезита 122,6%; гранита 130,8%. Отсюда следует, что мрамор и песчаник имеют большую сжимаемость, а изверженные породы (андезит и гранит), состоящие из более твер-

дых минералов, меньшую. Это сказалось и на усадке, которая оказалась: для мрамора 41,1%; песчаника 36,5%; андезита 31,6%; гранита 28,5%, что вполне объясняется вещественным составом указанных пород.

Из этих данных следует, что при достаточно высоких удельных нагрузках (1500 кгс/см^2 и выше) возможно получение объемов исходного состояния пород, т. е. занимаемых ими до раздробления. Мрамор, например, при нагрузках 1580 кгс/см^2 достигает полностью своего первоначального объема, песчаник близок к этому.

Результаты исследования сжимаемости раздробленных пород в прокаленном состоянии. Рассмотренные материалы по сжимаемости пород

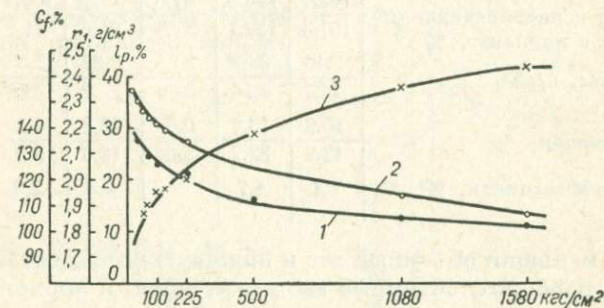


Рис. 3. Зависимость свойств раздробленного гранита от давления (условные обозначения см. на рис. 2)

в непрокаленном состоянии будут не полными, если не учесть физические свойства пород в прокаленном состоянии. Кроме того, постановка опытов по сжимаемости пород с учетом влияния температуры преследовала цель приближения условий опытов к природным явлениям, где помимо давления большую роль играет температура.

Общий характер изменения объема породы, объемного веса и пористости раздробленных пород после прокаливания показан на примере исследования гранита (рис. 3). Нетрудно заметить, что кривые изменения указанных свойств гранита в непрокаленном и прокаленном состоянии имеют одинаковый характер и отличаются лишь абсолютными значениями. Результаты исследований по сжимаемости пород до и после прокаливания также приведены в табл. 4.

Кроме того, проведены опыты по сжимаемости известняков, сланцев, скарнов и доломитов из нескольких месторождений свинца и цинка. Результаты этих исследований приведены в табл. 5. Данные опытов по сжимаемости пород до и после прокаливания (при давлении 1580 кгс/см^2) отличаются по всем показателям.

Полученные данные применительно к каждой породе находятся в соответствии с их вещественным составом. Известняки и доломиты, состоящие из нетвердых минералов в виде пелитоморфной массы карбоната, после сжатия в прокаленном состоянии занимают несколько больший объем по сравнению со сланцами и скарнами. Отсюда

Физические свойства	Известняк	Известняк	Известняк	Известняк	Сланец	Скарн	Скарн
	12/166	18/166	7/1430	14/2403	14/166	7/127	27/256
Объем пород после сжатия, см ³	11,93	11,17	9,94	11,37	11,73	9,27	13,81
	12,54	12,61	10,59	10,50	10,35	9,19	12,78
Процент усадки	33,7	33,9	42,4	34,3	37,4	38,2	33,4
	34,0	29,9	36,6	32,3	42,5	39,5	30,9
Объем пород к первоначальному состоянию в монолите, %	105,7	113,3	89,6	100,9	105,7	113,7	98,5
	107,3	129,1	97,8	95,8	94,9	86,7	107,7
Объемный вес, г/см ³	2,46	2,39	2,84	2,27	2,58	2,90	2,37
	2,37	2,14	2,56	2,42	2,88	3,07	2,42
Пористость общая, %	10,9	13,7	0,5	18,3	7,2	7,1	15,9
	12,2	22,2	5,9	12,0	2,3	3,2	14,8
Пористость эффективная, %	5,1	4,7	—	4,3	3,6	2,5	—

они имеют меньший объемный вес и большую пористость. В сланцах и скарнах, наоборот, объемный вес увеличился, а пористость уменьшилась.

Обращает внимание значительное увеличение пористости пород в раздробленном состоянии после сжатия в прокаленном состоянии по сравнению с пористостью их в исходных образцах в нераздробленном виде. Наибольшие расхождения (в 2,8—5,0 раза) относятся к известнякам, наименьшие — к сланцам и скарнам.

Проведенные исследования по сжимаемости раздробленных пород в прокаленном и непрокаленном состоянии показали, что породы разного вещественного состава имеют различную степень усадки. Это в свою очередь указывает на возможность использования этого метода для объяснения геологических структур конкретных месторождений, в частности, структур отслоения на границе двух различных сред, благоприятных для локализации оруденения.

Сопоставление закономерностей изменения физических свойств пород: объемного веса, процента усадки, пористости (пустотности) и т. д. позволяет до некоторой степени судить о возможных процессах изменения пород в природных условиях на глубине под влиянием давления и температуры.

Исследование влияния температуры на образование трещин в горных породах

В соответствии с поставленной задачей и методикой работ исследования заключались в установлении изменения пористости, структуры породы, процента водонасыщения пород и скорости продольных волн от изменения температуры прокаливания.

Сводные данные скоростей распространения упругих волн, их изменение и потери веса в зависимости от изменения температуры нагрева пород приведены в табл. 6.

Из указанных данных видно, что для большинства пород (кварцит, мергель, известняк, гнейс, скарн, роговик, диорит, сиенит, альбитофир, кератофир, порфирит, лабрадорит, диабаз, горнблендит, апатит) после прокаливания при температуре 500—600° С характерно возрастание скоростей распространения продольных волн. При дальнейшем повышении температуры наблюдается резкое уменьшение скоростей до их минимального значения (рис. 4). Это явление, вероятно, связано с тем, что в начальный момент при нагревании образца происходит закрытие

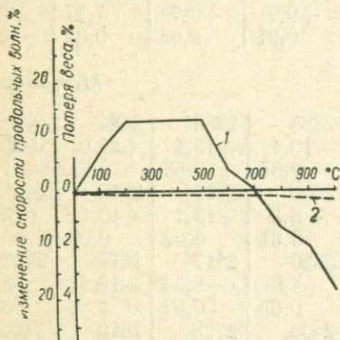


Рис. 4. Изменение скорости распространения продольных волн и потери веса от температуры прокаливания кварцита
1 — скорость распространения продольных волн; 2 — потеря веса

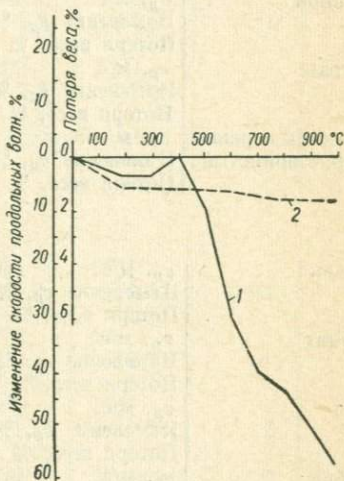


Рис. 5. Изменение скорости распространения продольных волн и потери веса от температуры прокаливания песчаника (условные обозначения см. на рис. 4)

пор, что можно связать с некоторым расширением зерен минералов и напряженным состоянием закрытых пор, в которых могут содержаться жидкие или газообразные включения. Этому состоянию горной породы соответствует возрастание скоростей распространения упругих волн.

Вслед за максимумом приращения скорости продольных волн наступает резкое ее уменьшение. Этот факт можно объяснить изменением структуры и нарушением сплошности породы.

Интенсивность закрытия пор и последующее изменение структуры, а также образование трещин в породе зависят от многих факторов, в том числе от состава, плотности, пористости, коэффициента линейного расширения минералов, состава и количества цемента.

Доказательством этому служит различный диапазон температур, при которых получены максимум приращения скорости продольных волн и их минимальные значения.

Следует обратить внимание на результаты исследования песчаников. Для этих пород изменение скорости продольных волн изменяется в пределах ниже исходных значений (рис. 5). Это можно

Таблица 6

Породы	Показатели	При исходной температуре 20 °С	При темпе			
			100	200	300	400
<i>Осадочные</i>						
Песчаник	v_p , м/с	2000	1938	1938	1938	2000
	Изменение v_p , %	100	-3,1	-3,1	-3,1	0
	Потеря веса, %		1,0	1,01	1,08	1,15
Мергель	v_p , м/с	1780	2000	2000	1070	2070
	Изменение v_p , %	100	+12,4	+12,4	+16,3	+16,3
	Потеря веса, %		0,66	0,93	0,93	1,14
Известняк неравномернозернистый	v_p , м/с	2770	2772	2772	2985	2772
	Изменение v_p , %	100	+0,7	+0,7	+7,77	+0,7
	Потеря веса, %		0,01	0,03	0,04	0,06
<i>Метаморфич</i>						
Змеевик	v_p , м/с	2067	2385	2385	2584	2584
	Изменение v_p , %	100	+15,4	+15,4	+25,0	+25,0
	Потеря веса, %		0,34	0,63	0,74	1,03
Кварцит	v_p , м/с	2308	2500	2610	2610	2610
	Изменение v_p , %	100	+8,3	+13,1	+13,1	+13,1
	Потеря веса, %		0,01	0,02	0,03	0,04
Гнейс	v_p , м/с	2231	2320	2417	1871	2417
	Изменение v_p , %	100	+4,0	+8,34	-16,14	+8,34
	Потеря веса, %		0,05	0,07	0,06	0,04
Роговик	v_p , м/с	2143	2400	2728	2610	2730
	Изменение v_p , %	100	+12,0	+27,3	+21,8	+27,4
	Потеря веса, %		0,07	0,16	0,30	0,35
Карбонат-хлорит-магнетитовая порода	v_p , м/с	2027	2252	2339	2339	2339
	Изменение v_p , %	100	+11,4	+15,4	+15,4	+15,4
	Потеря веса, %		0,46	0,63	0,74	0,77
Гранат-пироксеновый скарн	v_p , м/с	2432	2432	2432	2534	2769
	Изменение v_p , %	100	0	0	+4,19	+14,0
	Потеря веса, %		0,19	0,19	0,22	0,25
<i>Изверженные</i>						
Гранит	v_p , м/с	2231	2326	2065	2067	2027
	Изменение v_p , %	100	+4,3	-7,45	-7,2	-9,1
	Потеря веса, %		0,09	0,20	0,15	0,16
Спелит-порфир	v_p , м/с	2215	2480	2480	2480	2480
	Изменение v_p , %	100	+12,0	+12,0	+12,0	+12,0
	Потеря веса, %		0,10	0,15	0,34	0,77
Диорит скарнированный	v_p , м/с	2400	2500	2610	2610	2610
	Изменение v_p , %	100	+4,2	+8,8	+8,8	+8,8
	Потеря веса, %		0,06	0,15	0,37	0,48
Кварцевый кератофир	v_p , м/с	2326	2617	2617	2617	2617
	Изменение v_p , %	100	+12,51	+12,51	+12,51	+12,51
	Потеря веса, %		0,03	0,06	0,08	0,12
Альбитофир	v_p , м/с	2230	2400	2600	2600	2714
	Изменение v_p , %	100	+7,6	+16,6	+16,6	+21,7
	Потеря веса, %		0,09	0,15	0,23	0,26

Породы	температура нагрева, °С						Магнитная восприимчивость	
	500	600	700	800	900	1000	$\chi_{нач}$	$\chi_{конечн}$
<i>породы</i>								
1824	1409	1216	1127	984	849			
	-8,8	-29,6	-39,2	-43,7	-50,8	-57,55	0	81
	1,19	1,23	1,41	1,51	1,55	1,57		
2070	2000	1730	1940	2000	2000			
	+16,3	+12,4	-2,8	+9,0	+12,4	+12,4	0	137
	1,32	2,17	4,59	5,41	6,88	7,34		
2587	2425	2425	2283	Разрушился				
	-6,61	-12,46	-12,46	-17,6	»	»	0	0
	0,09	0,13	0,25	1,37	»	»		
<i>еские породы</i>								
2584	2584	2480	2480	2584	2584			
	+25,0	+25,0	+20,0	+20,0	+25,0	+25,0	5 642	396
	1,20	1,67	7,48	12,0	12,64	13,05		
2610	2400	2310	2150	2070	1880			
	+13,1	+4,0	0	-6,8	-10,3	-18,6	0	0
	0,06	0,13	0,24	0,29	0,34	0,36		
2320	1934	1813	1813	1611	1568			
	+3,99	-13,31	-18,74	-18,8	-17,74	-29,72	0	710
	0,21	0,43	0,78	1,0	1,60	1,95		
2728	2500	2223	1880	1670	Разрушился			
	+27,3	+16,7	+3,7	-12,3	-22,1	То же	0	223
	0,40	0,45	0,64	1,10	1,35	»		
2339	2252	2172	1900	1789	»			
	+15,4	+11,10	+7,2	-6,3	-11,7	»	63 391	45 560
	0,89	0,98	3,08	5,42	8,37	»		
2644	2339	2097	1962	1900	1689			
	+8,72	-3,8	-13,8	-19,3	-19,9	-30,6	243	3 456
	0,28	0,32	0,42	0,50	0,78	0,81		
<i>породы</i>								
1800	1658	1250	1285	1074	1031			
	-19,2	-25,5	-44,0	-42,4	-51,8	-53,8	0	162
	0,52	0,39	0,44	0,53	0,81	0,81		
2480	2138	1824	1550	1292	1292			
	+12,0	-3,5	-17,7	-30,0	-41,7	-41,7	4 852	1 648
	1,11	1,20	1,35	1,48	1,74	1,81		
2610	2610	2500	2310	2143	1500			
	+8,8	+8,8	+4,2	-3,8	-10,7	-37,5	0	324
	0,59	0,72	0,88	0,95	1,00	1,07		
2617	2512	2243	2416	2243	1570			
	+12,51	+8,0	-3,57	+3,87	-3,57	-32,50	0	710
	0,25	0,34	0,44	0,37	0,39	0,44		
2600	2600	2496	2496	2496	1950			
	+16,6	+16,6	+12,0	+12,0	+12,0	-12,6	652	2 809
	0,40	0,53	0,72	0,72	0,72	0,76		

Порода	Показатели	При исходной температуре, 20 °С	При темпе			
			100	200	300	400
Габбро	v_p , м/с	2517	2416	2416	2416	2517
	Изменение v_p , %	100	-4,1	-4,1	-4,1	0
	Потеря веса, %		0,08	0,11	0,14	0,21
Плаггиогранит	v_p , м/с	2385	2584	2584	2385	2297
	Изменение v_p , %	100	+8,3	+8,3	0	-3,7
	Потеря веса, %		0,01	0,03	0,04	0,05
Порфирит диабазовый	v_p , м/с	2172	2432	2644	2534	2764
	Изменение v_p , %	100	+12,0	+21,73	+11,7	+27,26
	Потеря веса, %		0,05	0,10	0,25	0,31
Горнблендит	v_p , м/с	2058	2216	2216	2400	2505
	Изменение v_p , %	100	+7,7	+7,7	+17,0	+21,7
	Потеря веса, %		0,08	0,11	0,15	0,17
Диабаз	v_p , м/с	2339	2621	2621	2644	2644
	Изменение v_p , %	100	+12,1	+12,1	+13,0	+13,0
	Потеря веса, %		0,01	0,05	0,09	0,22
Туф	v_p , м/с	1816	1982	2109	2109	2109
	Изменение v_p , %	100	+9,2	+16,1	+16,1	+16,1
	Потеря веса, %		1,12	1,33	1,66	1,71
Апатит	v_p , м/с	2150	2400	2310	2143	2143
	Изменение v_p , %	100	+11,6	+11,6	+7,5	-0,3
	Потеря веса, %		0,03	1,10	0,15	0,17

объяснить большей первоначальной пористостью (9%). Изменение структуры и объема породы под влиянием температуры происходило в пределах свобод, обусловленных высокой пористостью. В этих условиях, учитывая расширение зерен и уплотнение породы, трудно достигнуть закрытия пор, хотя некоторые признаки этого имеются. Об этом свидетельствует наличие максимума приращения скорости при температуре 400° С.

Подтверждением такого представления о характере изменения сплошности породы под влиянием температуры являются данные

Таблица 7

Порода	Эффективная пористость пород, %, прокаленных при температурах, °С					
	100	200	400	600	800	1000
Габбро	0,66	0,45	1,09	0,73	1,36	2,19
Сиенит	9,56	0,61	1,16	2,30	3,82	9,57
Руда	1,32	0,97	2,67	2,83	2,19	3,18
Гранит	1,46	1,08	1,66	3,65	—	—
Известняк	0,79	0,51	1,15	2,03	4,88	—
Песчаник	4,1	6,6	4,3	4,02	3,59	5,30
Доломит	8,9	6,31	3,13	11,27	14,04	—

температура нагрева, °С						Магнитная восприимчивость		
500	600	700	800	900	1000	%нач	%конечн	
2324	2083	1831	1678	1373	1007			
-7,7	-17,2	-27,3	-33,3	-45,5	-60,0	89	779	
0,29	0,35	0,35	0,31	0,34	0,38			
1938	1193	484	Разрушился				824	223
-18,7	-50,0	-79,7	»					
0,08	0,16	0,62	»					
2644	2644	2172	2097	1962	1900			
+21,73	+21,73	0	-3,5	-9,67	-12,52	223	2 996	
0,37	0,54	3,40	4,44	4,70	5,28			
2400	2400	2134	1859	1600	1440			
+16,6	+16,6	+3,7	-9,7	-22,3	-30,0	27 291	28 988	
0,21	0,45	0,82	1,06	1,12	1,14			
2644	2534	2339	2339	2172	1962			
+13,0	+8,6	0	0	-7,1	-16,1	2 079	3 452	
0,29	0,62	2,0	2,47	2,79	2,79			
2034	2034	2034	1923	1923	1816			
+12,0	+12,0	+12,0	+5,9	+5,9	0	0	0	
1,87	1,92	2,09	2,12	2,12	2,2			
1940	1875	1667	1200	1250	1225			
-9,8	-12,8	-22,5	-44,2	-41,9	-43,0	0	89	
0,19	0,20	0,25	0,19	0,20	0,21			

об эффективной пористости, установленной на образцах после прокаливания (табл. 7). Наибольшее увеличение пористости большинства пород наблюдается при температуре более 400° С. Данные об изменении пористости песчаников и доломитов также подтверждают высказанные выше соображения, касающиеся значения первоначальной пористости.

Увеличение пористости пород при нагревании объясняется прежде всего развитием в них структурных дефектов и образованием трещин в зернах минералов.

Структурные дефекты в виде плоскостей спайности, ослабленных контактов между минералами находят свое дальнейшее развитие. Это приводит к увеличению эффективной пористости и уменьшению статической прочности породы.

Например, сиенит после прокаливания при 1000° С показал временное сопротивление раздавливанию почти в 2 раза меньшее, чем до прокаливания (477 вместо 782 кгс/см²).

Из табл. 7 видно, что степень увеличения эффективной пористости (за счет образования трещин) различна. Для сиенита повышение температуры прокаливания в 10 раз вызывает увеличение пористости в 15 раз. Для песчаника и доломита пористость увеличивается очень незначительно. Объясняется это, как указано выше, вероятно, первоначальной пористостью, составом и структурой породы.

Исследование прокаленных пород под микроскопом показывает, что количество трещин в породе возрастает с увеличением температуры прокаливания образца. Это видно на примере сиенита и гранита.

В сиените при температуре 300—400° С образуются малозаметные трещины (рис. 6), а при дальнейшем увеличении температуры прокаливания породы до 1000° С они развивались как в контакте между

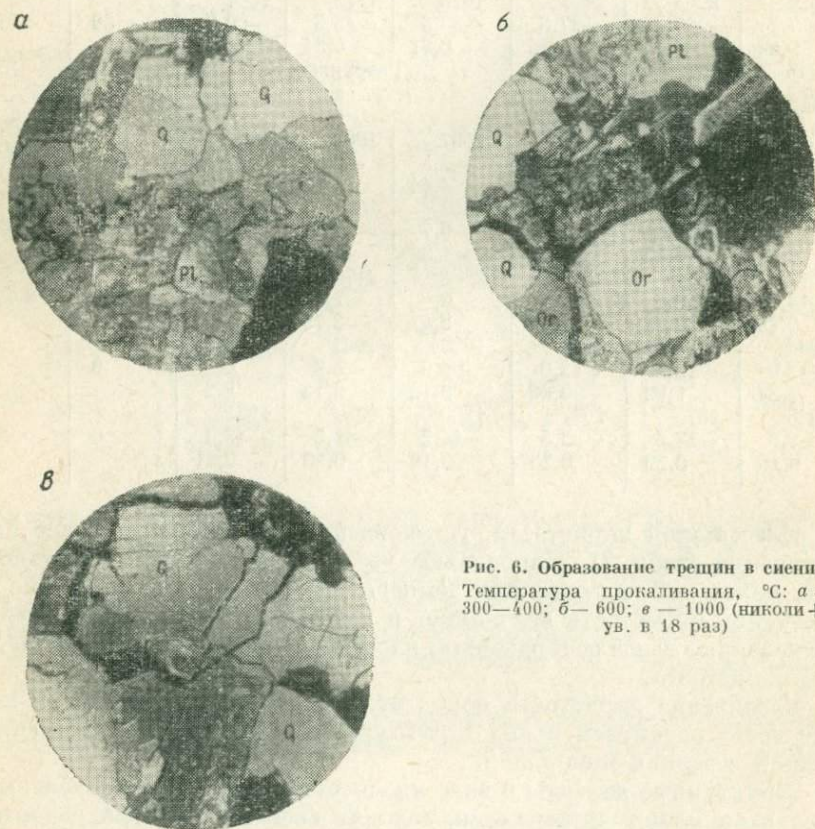


Рис. 6. Образование трещин в сиените
Температура прокаливания, °С: а —
300—400; б — 600; в — 1000 (николи +,
ув. в 18 раз)

минералами, так и на участках, занятых отдельными минералами полевых шпатов.

В граните первые трещины появились при температуре 200° С (рис. 7). При 600° С их количество возросло, а при 800° С образец полностью разрушился.

В песчанике заметная трещиноватость появляется при температуре 800° С (рис. 8). При 1000° С количество трещин и пустот резко возрастает, и порода становится рыхлой.

Появление существенно заметных трещин в песчанике только при сравнительно высокой температуре можно объяснить повышенной первоначальной пористостью (5,2%), которая позволяла расши-

ряться зернам минералов при нагревании без разрыва сплошности породы.

В магнетитовой руде первые существенные трещины образовались при 600°C , в известняке при 200°C , в доломите при $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$.

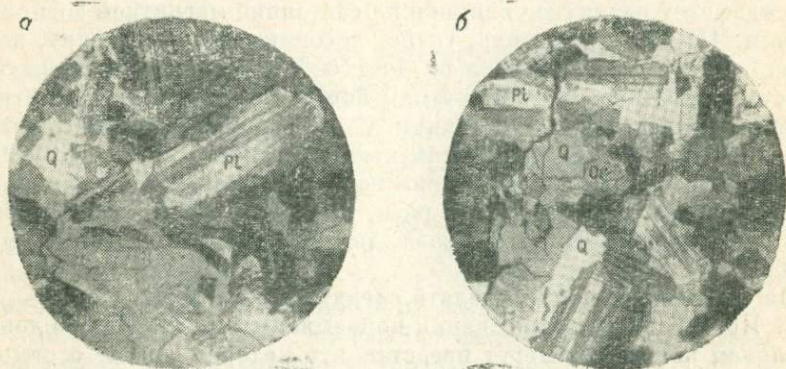


Рис. 7. Образование трещин в граните
Температура прокаливания, $^{\circ}\text{C}$: а — 200; б — 600 (николи +, ув. в 18 раз)

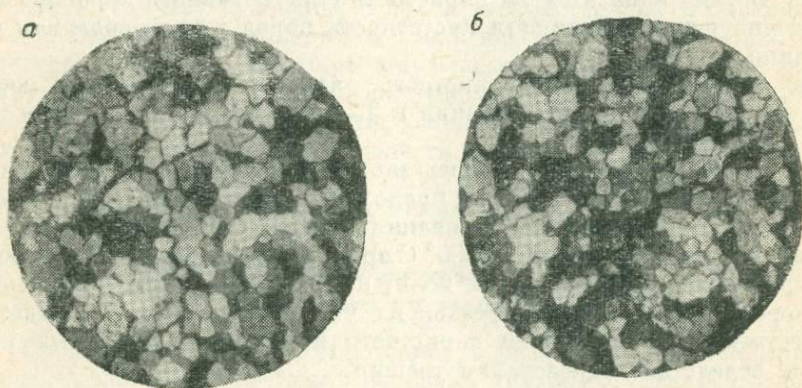


Рис. 8. Образование трещин в песчанике
Температура прокаливания, $^{\circ}\text{C}$: а — 800; б — 1000 (николи +, ув. в 18 раз)

Характерно отметить, что известняк и доломит полностью разрушились при водонасыщении (в самый первый момент водонасыщения) после прокаливания до 1000°C *.

Этими исследованиями при использовании ультразвука установлено, например, что существенное нарушение сплошности структуры сиенита наступает при $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$, гранита при $200\text{--}400^{\circ}\text{C}$, песчаника при $600\text{--}800^{\circ}\text{C}$, доломита при $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$. Исследования также показали, что на температуру образования микротрещин

* Водонасыщение образцов проводилось в холодном виде по истечении 16—18-часового выдерживания их в эксикаторе после извлечения из электропечи.

оказывает влияние первоначальная пористость. В породах (песчаник, доломит) с высокой пористостью (5,2—9,1%) трещины образуются при более высокой температуре прокаливания (600—800° С).

Влияние температуры нагрева образцов горных пород может также характеризовать изменение их магнитных свойств. Нагрев образцов оказывает различное влияние на состояние магнитной восприимчивости. Песчаник, мергель, гнейс, роговик, гранит, диорит, кератофир, апатит после нагрева их до 1000° С обнаружили магнитные свойства. Кварцит, туф, известняк остались совершенно немагнитными, как и в исходном состоянии. Скарн рудный, сиенит, лабрадорит, змеевик снизили свои магнитные свойства на 28, 66, 73 и 93% соответственно. Наоборот, резко повысили магнитную восприимчивость породы: скарн в 14,2 раза, порфирит в 13,5 раза, габбро в 8,7 раза, альбитофир в 4,3 раза, диабаз в 1,6 раза и горнблендит в 1,06 раза.

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные исследования показывают, что в качестве дополнительной константы могут представлять интерес данные о степени сжимаемости раздробленных пород различного состава, обладающих различной усадкой.

2. Весьма показательна пористость спрессованного порошка, характеризующая в сущности пустотность пород в раздробленном состоянии.

3. Установлено, что пористость раздробленной породы после сжатия в прокаленном состоянии в 3—5 раз больше пористости пород в монолите.

4. Несомненный интерес представляют также данные по изменению скорости распространения продольных волн в породах в зависимости от температуры прокаливания образцов. В частности, после прокаливания пород до 400—500° С происходит возрастание скорости распространения продольных волн, а при дальнейшем повышении температуры наблюдается резкое их уменьшение. Это объясняется существенным повышением пористости и процента водонасыщения пород вследствие образования трещин.

5. Установлен диапазон температур, при которых происходит нарушение сплошности породы. В частности, в сиенитах появляются трещины при температуре 200—300° С, в граните при 200—400° С, в песчанике при 800° С, в магнетитовой руде при 400° С, в мраморе при 200° С и в доломите при 400—600° С.

Характерно отметить, что гранит полностью разрушился при 800° С, а мрамор и доломит — при водонасыщении после прокаливания до 1000° С.

Установлена характеристика магнитной восприимчивости исследованных пород в зависимости от изменения температуры их прокаливания. Такие породы, как известняки, кварциты, туфы, сохраняют немагнитные свойства. Появилась магнитная восприимчивость у песчаника, мергеля, гнейса и др. Снизили первоначальные значения магнитной восприимчивости змеевик, скарн и др.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РУДОВМЕЩАЮЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ РОЛЬ В ОЦЕНКЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В этой главе приводятся результаты изучения физико-механических свойств образцов горных пород, вмещающих рудные тела некоторых месторождений редких металлов, олова, молибдена, свинца и цинка, меди, киновари, железа.

Приведенные данные по физико-механическим свойствам рудовмещающих пород позволяют судить о их влиянии на условия формирования рудных тел, об оценке и влиянии гидротермально измененных пород на условия локализации оруденения. Характерно отметить, что эти суждения в значительной степени подтверждают сложившиеся представления о геологическом строении некоторых месторождений и характере оруденения. Сравнительный анализ полученных данных безусловно будет способствовать более углубленному изучению структурных условий формирования руд, а параметры физико-механических свойств рудовмещающих горных пород при благоприятных геологических предпосылках могут служить косвенными поисковыми признаками.

Месторождение прожилково-вкрапленного уранового оруденения

По данным геологов [11], площадь развития урановой минерализации сложена осадочными породами нижнего и среднего палеозоя (рис. 9). Отложения среднего палеозоя залегают с угловым несогласием на размытой поверхности различных толщ нижнего палеозоя.

Породы среднего палеозоя выполняют замкнутую мульду, в которой углы падения слоев постепенно уменьшаются от периферии к центру. В пределах рудоносной площади обнаружен интрузивный массив, сложенный преимущественно сиенит-диоритами, кварцевыми сиенитами и габбро-сиенитами.

В строении рудоносной площади и локализации уранового оруденения большую роль играют дайки (дайковый пояс), имеющие в основном северо-восточное простирание от 10—15 до 30—40° при юго-восточном падении под углом 50—80°. В меньшем количестве встречаются крутопадающие дайки широтного простирания. Дайковый пояс пространственно связывается с указанным интрузивным массивом.

В пределах рудной площади широко распространены также пологие тела интрузивных пород (габбро, спессартиты), залегающих согласно со слоистостью осадочных толщ. Дайки состоят в основном из порфиридных диоритов, микродиоритов, диоритовых порфиритов, лампрофиров.

Специфической чертой интрузивных образований рудоносной площади является отсутствие разновидностей пород кислого состава.

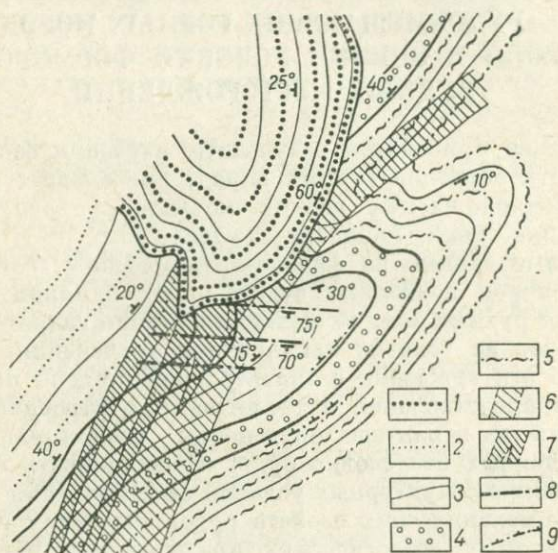


Рис. 9. Схема геологического строения рудоносной площади (из работы А. А. Горшкова и др., 1964 г.)

1 — красноцветные песчаники с прослоями конгломератов (PZ_2); 2 — песчанниковая толща (PZ_1); 3 — аргиллит-алевролитовая толща (PZ_1); 4 — конгломерат-песчанниковая толща (PZ_1); 5 — песчаниково-алевролитовая толща (PZ_1); 6 — контур дайкового пояса; 7 — контуры пучков сближенных даек; 8 — секущие разрывные нарушения; 9 — послонные разрывные нарушения

Интрузивная деятельность практически завершилась до среднего палеозоя. Вместе с тем, урановое оруденение отмечается в среднепалеозойских отложениях, что говорит о существенном разрыве во времени между магматической деятельностью и гидротермальным процессом. Основные черты структуры рудоносной площади характеризуются моноклиальным залеганием пород северо-восточного простирания, падающего на северо-запад под углом $20-45^\circ$.

В центральной части рудоносной площади эта моноклиальность осложняется флексурным перегибом, с которым связаны поперечные синклиальная и антиклиальная складки второго порядка.

Породы, залегающие в ядрах этих складок, характеризуются пологими углами падения, обычно не превышающими $10-15^\circ$.

На рудоносной площади развиты секущие дизъюнктивные нарушения широтного, северо-восточного и северо-западного простирания.

Нарушения широтного простирания, круто падающие на юг, представляют собой взбросы, сопровождающиеся зонами раздробления, в которых залегают дайки, в свою очередь раздробленные и минерализованные. На рудоносной площади известно несколько таких крупных нарушений, расположенных в месте флексурного перегиба моноклинали. Этим нарушениям принадлежит важная роль в размещении и локализации оруденения. Рудоносные участки располагаются в блоках пород между этими нарушениями или прилегают к ним с одной стороны.

Разрывные нарушения северо-восточного простирания с крутыми углами падения на юго-восток имеют древнее заложение, так как вмещают разновозрастные дайки.

Нарушения северо-западного простирания с крутыми углами падения на юго-восток представлены отдельными относительно протяженными зонами дробления и мелкой трещиноватости, развитых в конгломератах и песчаниках среднего палеозоя.

Помимо секущих, в пределах рудоносной площади широко развиты послонные нарушения, падающие согласно с напластованием пород. Наибольшее число послонных нарушений приурочено к толще переслаивания песчаников и алевролитов, причем наиболее четко они проявлены в ядре синклинальной складки второго порядка. Послонные нарушения отмечаются также вблизи контактов толщ различного литологического состава.

Важным элементом структуры рудоносной площади является дайковый пояс. Многочисленные дайки, пронизывающие толщу нижнепалеозойских пород, дали ей достаточную жесткость, обусловившую преимущественное развитие разрывных предрудных деформаций. Кроме того, они явились вмещающими породами для основных масс уранового оруденения, так как последнее располагается в местах пересечения пучков сближенных даек зонами послонных срывов (рис. 10).

В указанной работе [11] приводятся данные определения модуля упругости пород, залегающих выше и ниже послонных нарушений. Приведенные данные показывают, что различие значений модуля упругости покрывающих ($5,4 \cdot 10^5$ кгс/см²) и подстилающих ($6,72 \times 10^5$ кгс/см²) пород составляет около 25%. Следовательно, причиной послонных нарушений являются как различия в литологическом составе пород, так и в механических свойствах последних. С послонными зонами срывов пространственно связано рудоносное секущее нарушение, получившее название слепого. Оно располагается в блоке пород между III и IV зонами послонных срывов, ориентировано перпендикулярно к слоистости пород, имеет широтное простирание и полого ($10-15^\circ$) падает на юг. По простиранию, на западе и востоке оно ограничивается III и IV зонами послонных срывов меридионального простирания.

Урановое оруденение в послонных нарушениях концентрируется в местах пересечения ими пучков сближенных крутопадающих даек, где можно выделить обобщенные пологопадающие рудоносные

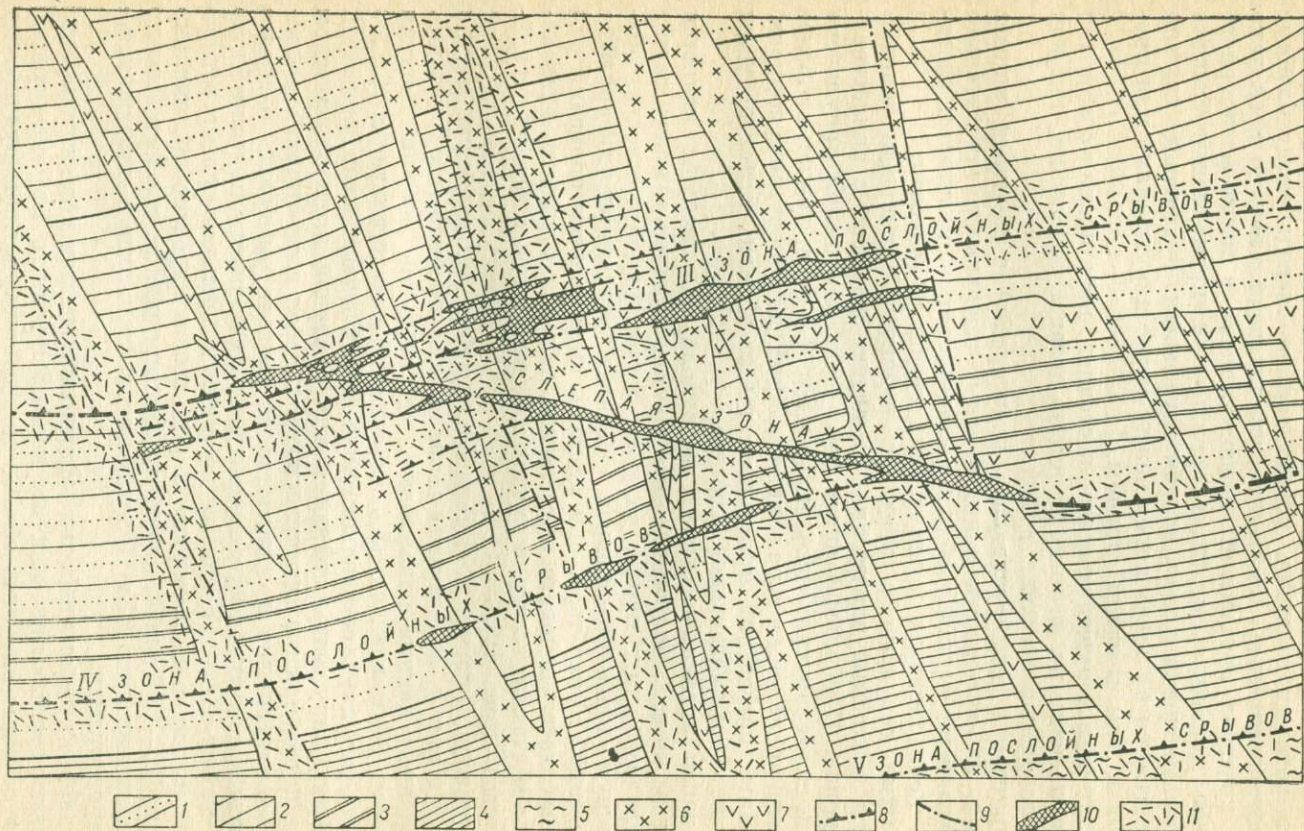


Рис. 10. Положение рудоносных залежей в зонах пологопадающих нарушений (из работы А. А. Горикова и др., 1964 г.)

1 — среднезернистые толстослоистые песчаники; 2 — переслаивание разнозернистых песчаников и алевролитов; 3 — среднезернистые песчаники с прослоями алевролитов; 4 — тонкое переслаивание мелкозернистых песчаников и алевролитов; 5 — аргиллиты; 6 — дайки диоритового состава; 7 — шпессартиты; 8 — послойные разрывные нарушения; 9 — секундные разрывные нарушения; 10 — рудные залежи; 11 — березитизированные породы

залежи. Такая обобщенная рудоносная залежь, отмеченная на рис. 10, характеризуется сложным строением. Она состоит из нескольких плоских рудных тел, иногда располагающихся в два-три яруса, разделенных безрудными интервалами по вертикали и ширине. Рудные тела имеют изменчивую мощность и включают блоки пустых пород.

Из сказанного логично предположить, что непостоянство формы и размера рудных тел и оруденелых участков во многом определялось

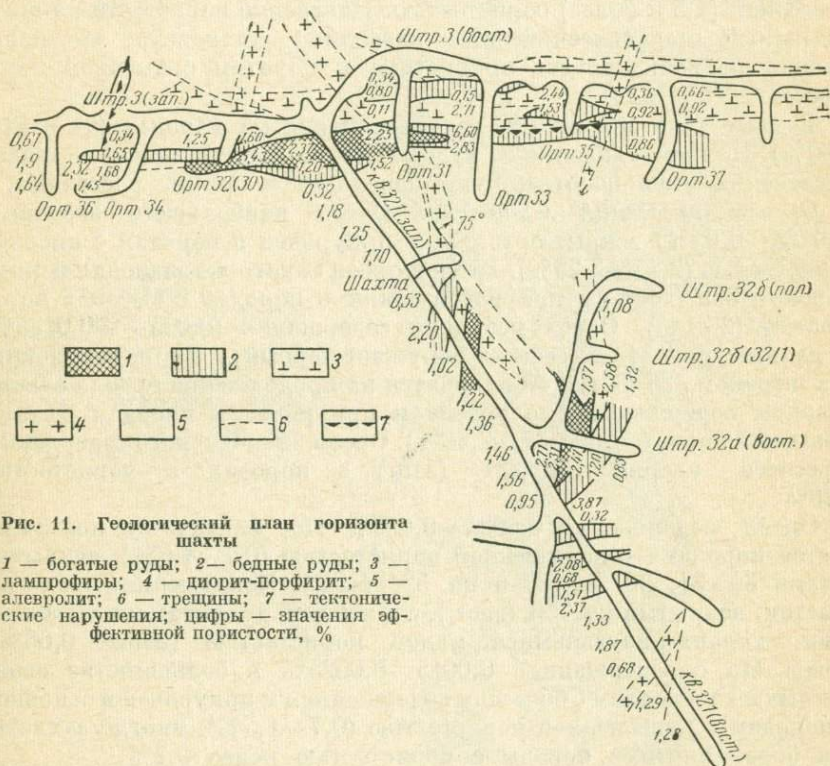


Рис. 11. Геологический план горизонта шахты

1 — богатые руды; 2 — бедные руды; 3 — лампрофиты; 4 — диорит-порфирит; 5 — алевролит; 6 — трещины; 7 — тектонические нарушения; цифры — значения эффективной пористости, %

различной пористостью и проницаемостью вмещающих оруденение горных пород. В этой связи нами были проведены многочисленные определения (700 образцов) эффективной пористости, удельного и объемного весов по методу гидростатического взвешивания. Проведенные определения непосредственно в полевых условиях позволили дать количественную характеристику измененных и неизмененных пород и областей развития первичных ореолов рассеяния урана, свинца и молибдена с целью выработки поисковых признаков уранового оруденения. В качестве примера приводим результаты определения пористости пород, вскрытых горными выработками.

Из рис. 11 видно, что рудные тела залегают в алевролитах, диоритовых порфиритах, на контактах алевролитов и лампрофитов

и контролируются разрывными структурами. Такие структуры вскрыты ортами 34, 30, 31, 33, 35, 37, кваршлагом 321, а также штреками 32а (восточный), 32б (полевой). В перечисленных выработках были отобраны образцы пород для определения пористости, а также ореолов урана, свинца и молибдена. Результаты определений пористости нанесены на рис. 11.

В порядке обобщения полученных результатов были выделены участки пород с малой (0,7% и менее), повышенной (0,7—1,5%) и высокой (1,5 и более) пористостью. Нанесение пористости на погоризонтный геологический план позволило установить, что повышенная радиоактивность приурочена к породам с высокой пористостью.

Рудные тела залегают в наиболее пористых породах (до 5,43—6,60%). По мере удаления от рудных тел пористость пород и степень оруденения уменьшаются, руды переходят в ореолы рассеяния.

Ореолы рассеяния молибдена. Ореол наибольшего значения (0,0125—0,05%) вскрыт ортом 31 и приурочен к породам с высокой пористостью (2,17—2,25%). Второй ореол такого же значения вскрыт штреком 32а (вост.) и приурочен также к породам с высокой пористостью (2,31%). Ореол меньшего содержания (0,005—0,0125%) по данным орта 31 фактически окружает первый, а в породах, вскрытых штреком 32б (32/1), он находится на продолжении ореола с более высоким содержанием молибдена и приурочен к породам средней и высокой пористости (1,37—2,58%). Ореол аналогичного содержания пересечен кваршлагом 321 (зап.) в породах с пористостью 2,20%.

Ореол, содержащий 0,0025—0,005% Мо, фактически контролируется породами с повышенной пористостью (0,7—1,5%), вскрытых ортами 30, 31, 33, 34, 37 и кв. 321 (зап.). Исключением является участок, вскрытый кв. 321 (вост.), сложенный диоритовыми порфиритами, характеризующимися малой пористостью (менее 0,68%). Ореол Мо с содержанием 0,0015—0,0025% в большинстве своем примыкает к ореолам с большим содержанием и приурочен в основном к породам с повышенной пористостью (0,7—1,5%), иногда захватывая более плотные породы с пористостью менее 0,7%.

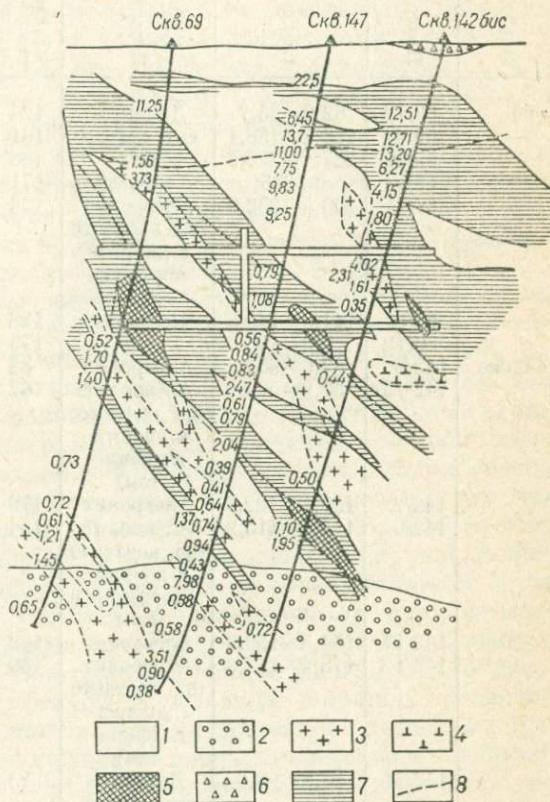
Ореолы свинца с наибольшим его содержанием (0,12—0,5%) приурочены к зоне пористых пород, вскрытых ортом 33 (пористость 2,83—6,60%) и в самом начале кв. 321 (зап.) (пористость 1,47—2,37%). Ореол с содержанием свинца от 0,05 до 0,12% фактически окружает участки пород предыдущего ореола, а также приурочен к породам высокой (более 1,5%) и средней (0,7—1,5%) пористостью, вскрытых ортами 31, 33, 35, 37 и кв. 321 (зап.). Участок пород с содержанием свинца 0,0025—0,05% характеризуется повышенной пористостью, за исключением пород, вскрытых штреками 32а, 32б, характеризующимися высокой (более 1,5%) и частично средней (0,7—1,5%) пористостью. Ореол свинца с содержанием 0,015—0,025% приурочен к породам с разной пористостью, включая более плотные их разновидности с пористостью менее 0,7%.

Характерно отметить, что плотные породы с пористостью 0,7% и менее в большинстве случаев разделяют участки пород с повышенным содержанием свинца (данные по ортам 33, 35 и 37).

Значительный интерес представляют результаты определения пористости и рудных ореолов по скважинам 69, 147 и 142бис (рис. 12) и механической прочности пород по образцам из скважин 69 и 142бис. Полученные результаты целесообразно рассмотреть вместе с данными

Рис. 12. Геологический разрез по профилю XXI

1 — алевролит; 2 — алевролит с кварцевой галькой; 3 — диоритовый порфирит; 4 — лампрофир; 5 — богатые руды; 6 — элювиальные отложения; 7 — ореолы радиоактивных пород; 8 — тектонические трещины (цифры — значения эффективной пористости пород, %)



по скорости ультразвука (продольные волны), акустическому сопротивлению, пористости и водопоглощению (табл. 8). Данные таблицы свидетельствуют о тесной связи механической прочности пород с другими физическими свойствами.

Результаты исследований диоритовых порфиров в образцах 69/12, 68/4, 69/10 показаны в зависимости от глубины их залегания. С увеличением глубины залегания механическая прочность увеличивается, скорость ультразвука и акустическое сопротивление увеличиваются, а пористость и процент водопоглощения уменьшаются. Это прежде всего объясняется различной степенью изменения (выветривания) пород. Образцы алевролитов (69/7, 69/11) показывают изменения механической прочности и других физико-механических

Таблица 8

Номер скважины	Номер образца	Глубина, м	Порода	Механическая прочность на скалывание, кгс/см ²	Скорость распространения продольных волн, м/с	Акустическое сопротивление, гс/см ² ·с	Эффективная пористость, %	Водопоглощение, %
69	69/12	62,8—65,7	Диоритовый порфирит	124	3211	8,44	3,73	1,295
	69/4	153,2—156,1	Диоритовый порфирит	161	3745	10,02	1,40	0,340
	69/10	227,4—230,5	Диоритовый порфирит	186	4007	10,78	1,21	0,240
	69/7	ок. 225	Алевролит	171	4021	10,96	0,62	0,054
	69/11	230,5—232,0	Алевролит (на контакте с диорит-порфиритом)	106	3760	10,40	3,86	0,543
142бис	69/8	141,0—146,5	Песчаник	128	4142	11,28	1,70	0,200
	69/12	190—194	»	175	4239	11,52	0,73	0,092
	142/9	87,6—90,1	Алевролит	88	4510	12,23	2,83	—
	142/15	57,9—60,5	Алевролит (на контакте с диорит-порфиритом)	67	1800	4,79	6,46	—
	142/2	120,1—122,6	Алевролит	179	3096	8,48	1,47	—
	142/6	114,0—115,9	Алевролит (на контакте с диорит-порфиритом)	154	2617	7,22	1,07 (?)	—
	142/17	154,3—156,0	Алевролит	189	4290	11,73	0,88	—
	142/12	175,4—177,8	Алевролит (на контакте с диорит-порфиритом)	159	1554	4,06	4,40	—
	142/11	65,0—68,0	Диоритовый порфирит, затронутый выветриванием	73	—	—	3,12	—

свойств в зависимости от близости их залегания к диоритовым порфиритам. Как видно из табл. 8, алевролиты, расположенные у контакта с диоритовыми порфиритами, имеют меньшую механическую прочность, меньшую скорость ультразвука и более высокие пористость и водопоглощение. Далее приведены физические свойства песчаников (образцы 69/8, 69/12) в зависимости от глубины залегания. Оказалось, что песчаники, залегающие на большей глубине, более прочные и менее пористые. Данные скв. 142бис показывают физико-

механические свойства алевролитов, залегающих вдали от диоритовых порфиров и вблизи них.

Алевролиты, залегающие вблизи диоритовых порфиров, являются менее прочными и более пористыми (см. табл. 8). Исключением является обр. 142/6, пористость алевролитов в котором меньше. Но это, вероятно, случайные данные, так как другие свойства (скорость ультразвука и акустическое сопротивление) свидетельствуют о том, что эта порода менее плотная, а следовательно, более пористая. Последний обр. 142/11 характеризует механическую прочность и пористость диоритового порфира, залегающих в зоне выветривания. Полученные результаты исследования находятся в полном соответствии с условиями их залегания.

Наряду с указанными физико-механическими свойствами нами определялась магнитная восприимчивость пород с объекта разведки.

На исследуемом участке магнитная восприимчивость весьма низкая. Только 16 образцов (из 711), измеренных на капшпире, обнаружили магнитную восприимчивость выше 2—4 ед.

Анализируя полученные данные, необходимо отметить следующее. Открытая (эффективная) пористость пород в основном зависит от степени выветривания, трещиноватости, вещественного состава, наличия прожилков и включений в породе. Просмотр шлифов под микроскопом показал, что наибольшая пористость, исключая образцы пород, взятые вблизи поверхности, где причиной высокой пористости является выветривание, обуславливается открытыми трещинами, серицитизацией, хлоритизацией. Причем замечено, что чем сильнее выражены указанные факторы, тем выше пористость этих пород. Установлено, что породы, в основном алевролиты, залегающие вблизи даек диоритовых порфиров и лампрофиров, являются более пористыми по сравнению с породами, залегающими вдали от контакта с дайками. Ослабленные места возле даек могли возникнуть в результате сокращения (контракции) объема даек при их образовании (остывании). Этот фактор в условиях широкого развития даек изверженных пород мог оказать существенное влияние на трещинообразование, особенно на участке пород, прилегающем к дайкам. В дальнейшем эти ослабленные места могли служить областью, благоприятной для тектонических подвижек, с образованием брекчированных зон и локализации рудного вещества, а также путями для проникновения гидротерм.

Богатые углекислотой растворы, с которыми связывают перенос рудных компонентов, попадая в ослабленные (трещиноватые, брекчированные) участки пород (алевролитов), вероятно, быстро теряли углекислоту. Резкое снижение концентраций ее в гидротермах, с одной стороны, по-видимому, препятствовало их проникновению в породы и, с другой — способствовало выделению минерализации с образованием брекчированных и прожилковых руд. Проникновение гидротерм в более хрупкие породы (диорит-порфиры и лампрофиры) также шло по трещинам и дробленным зонам. Этому в значительной степени способствовали серицитизация и хлоритизация этих пород,

увеличивая их пористость и проницаемость. Эти факторы способствовали проникновению гидротерм на значительное расстояние от рудопродводящих структур с образованием вкрапленного оруденения (неконтрастные руды). Таким образом, оруденение фактически контролируется близостью тектонических нарушений как рудопродводящих структур, степенью изменения вещественного состава пород и их пористостью (проницаемостью). Этим факторам подчинено и развитие ореолов рассеяния урана, свинца, молибдена и других химических элементов.

Систематизация фактических данных по физико-механическим свойствам позволила определить следующее.

1. Пористость пород (брекчированные алевролиты, лампрофиры и диоритовые порфириты), вмещающих урановую минерализацию, высокая, при этом наблюдается некоторая закономерность между радиоактивностью пород и их пористостью. Богатые и бедные руды приурочены к тектоническим структурам и залегают в зонах пород с высокой пористостью (1,5—5,0% и более). Рудные ореолы в большинстве случаев приурочены к контактам осадочных пород (алевролитов) с дайками изверженных пород (диоритовых порфиритов и лампрофиров) с повышенной пористостью (от 0,7—0,8 до 1,5% и выше).

Ореолы распространения некоторых химических элементов (свинец, молибден) пространственно тяготеют к зонам пород с повышенной радиоактивностью. В плотных породах с пористостью 0,7% и менее первичные ореолы рассеяния развиты слабо.

Малоизмененные породы (алевролиты, диоритовые порфириты, лампрофиры) характеризуются сравнительно небольшой пористостью (0,2—1,0%). Пористость песчаников (девонских) несколько больше (1,2—2,0%).

Пористость околорудных и измененных (трещиноватых, серицитизированных и хлоритизированных) пород больше (от 1,0—1,5 до 3,0—5,0% и более). Наибольшую пористость (от 5—10 до 20—50%) имеют выветрелые и затронутые выветриванием породы, залегающие на глубине до 30—50 м (иногда больше) от поверхности земли.

Установленная последовательность изменения пористости в зависимости от характера изменения пород подтвердилась и при определении их водопоглощения.

2. Водопоглощение малоизмененных алевролитов сравнительно низкое (около 0,05%). Алевролиты, находящиеся на контакте с диоритовыми порфиритами, имеют максимальное водонасыщение (около 0,5%); диоритовые порфириты, затронутые выветриванием, — 1,0—2,0%; плотные — 0,05—0,3% и околорудные диоритовые порфириты — 0,2—0,5%. Водопоглощаемость песчаников, затронутых выветриванием, составляет 1,0—2,5%; плотных песчаников — 0,1—0,2%; околорудных песчаников — 0,5—0,6%.

3. Скорость распространения ультразвуковых (продольных) волн и акустическое сопротивление колеблются в сравнительно широком

диапазоне значений, в зависимости от состава и степени изменения пород. Скорость продольных волн выветрелых пород составляет 700—1500 м/с. Неизменные породы характеризуются более высокими значениями скоростей — 3500—4000 м/с и более.

Околорудные породы и породы, залегающие в контакте одна с другой, характеризуются промежуточными значениями (около 1500 м/с). В соответствии с этими данными изменяется и акустическое сопротивление (1,0—5,0 для выветрелых пород; 9—10 и более — для плотных; 5—6 — для околорудных и измененных).

4. Временное сопротивление пород скалыванию (для алевролитов) колеблется от 50—60 и менее до 170—180 кгс/см². Наименьшие значения имеют выветрелые породы, а наибольшие значения характерны для плотных разностей алевролитов, залегающих на значительной глубине. Промежуточные значения механической прочности (100—150 кгс/см²) приурочены к околорудным алевролитам и алевролитам, залегающим вблизи контакта с дайками диоритовых порфиритов и лампрофиров.

Для диоритовых порфиритов, затронутых выветриванием, механическая прочность также невысока (70—80 кгс/см²). Более плотные породы имеют сравнительно высокую механическую прочность (около 200 кгс/см²).

Серицитизированные и хлоритизированные разности диоритовых порфиритов, преимущественно околорудных, характеризуются механической прочностью в пределах 100—150 кгс/см².

5. Повышенная магнитная восприимчивость приурочена в основном к диоритовым порфиритам. Однако в целом магнитная восприимчивость для пород изученного объекта низкая. Это можно объяснить тем, что геологи, изучавшие месторождение, из рудных минералов отметили только гематит, марказит, сфалерит, галенит, халькопирит, пирит и молибденит. Среди них нет минералов магнетита и пирротина, обладающих высокими магнитными свойствами.

6. Следует обратить внимание на то, что околорудные породы и породы, залегающие возле даек изверженных пород, отличаются меньшей скоростью ультразвука (продольные волны) и акустическим сопротивлением. В этой связи целесообразно использовать сейсмический метод поисков слепых рудных тел из подземных горных выработок.

7. Скважины 220, 310 и 311, расположенные на юго-восточном фланге XXI профиля, были остановлены выше основных структур, контролирующих оруденение. Однако наличие надежных ореолов радиоактивных пород и повышенная их пористость в сочетании с геологическими предпосылками явились основанием для расширения фронта разведочных работ с целью поисков новых рудных тел и благоприятных геологических структур. Насколько известно, эти прогнозы оправдались.

Редкометальное оруденение в карбонатитах

Массив ультраосновных-щелочных пород (по данным геологов А. А. Фролова и др.) расположен в зоне складчатого обрамления платформы и приурочен к крупному региональному разлому. Он представляет собой вертикально падающее трубчатое тело, имеющее в плане форму эллипса. Вмещающими породами являются верхнепротерозойские песчано-сланцевые образования.

Массив характеризуется общим кольцевым строением. Карбонатиты слагают ядро массива и систему жильных тел вокруг него. Ультраосновные-щелочные породы (мельтейгиты, ийолиты, уртиты, нефелиновые сиениты) сохранились по периферии массива и образуют кольцевую полосу шириной 1—2 км, а также залегают в виде останцов среди карбонатитового ядра.

Карбонатиты — сложные многостадийные пневматолито-гидротермальные образования, сформировавшиеся в завершающий этап развития массива.

В первую стадию возникли безрудные крупнозернистые кальцитовые карбонатиты, состоящие на 85—90% из кальцита и подчиненных ему апатита, эгирин-авгита, форстерита и биотита. Они слагают основную часть карбонатитового ядра и большинство жил вокруг него.

Во вторую стадию имело место формирование дуговидных жил и штокверковых зон пегматоидных кальцитовых карбонатитов главным образом в южной части массива.

В третью стадию в результате дробления и перекристаллизации ранних кальцитовых карбонатитов в зонах тектонических нарушений образовались мелкозернистые, как правило, четко полосчатые амфибол-кальцитовые карбонатиты, приуроченные к ряду зон северо-западного и северо-восточного простирания.

В четвертую, самую позднюю стадию карбонатитового процесса образовались анкеритовые карбонатиты, представленные крупным меридиональным телом и целой серией мелких жил различного простирания. Центральная часть этого тела сложена крупнозернистыми анкеритовыми высокопористыми карбонатитами, периферия — мелкозернистыми разностями.

Одновременно с формированием анкеритовых карбонатитов интенсивно проявилась анкеритизация вмещающих кальцитовых карбонатитов. Таким образом, в результате детального изучения выделяются четыре основных типа кальцитовых карбонатитов, закономерно размещенных в пределах рассматриваемого массива: крупнозернистые, пегматоидные, мелкозернистые и их анкеритизированные разности, а также анкеритовые карбонатиты.

Основные типы карбонатитов, отличающиеся по вещественному составу, способу образования и геологическим условиям залегания, характеризуются (по 82 образцам) различными физико-механическими свойствами (табл. 9). Рассмотрение этого вопроса целесообразно начать с физических свойств вмещающих карбонатиты пород — ийолитов.

Последние отличаются от карбонатитов более высокими значениями удельного и объемного весов, пористости, скорости прохождения упругих волн, модуля упругости и других физических свойств. Однако ийолиты и поздние карбонатиты по значениям удельного и объемного весов очень близки между собой, а пористость карбонатитов даже выше, чем ийолитов.

Степень изменения различных физических свойств в отдельных разновидностях карбонатитов неодинакова. Они характеризуются близкими значениями удельного акустического сопротивления, скорости прохождения упругих волн, а также удельного и объемного весов. Отмечается общая тенденция к увеличению пористости, водопоглощения, объемного и удельного весов от ранних к поздним карбонатитам.

Весьма показательным является изменение пористости карбонатитов. Среди крупнозернистых кальцитовых разновидностей резко повышенной пористостью (1,44%) обладают их метасоматические разновидности. Крупнозернистые кальцитовые образования так же, как и пегматоидные карбонатиты, выполняющие трещинные полости, характеризуются меньшими значениями пористости (0,80—0,84%).

Процент пор в карбонатитах уменьшается по мере перекристаллизации крупнозернистых и пегматоидных разновидностей в мелкозернистые. Так, пористость в крупнозернистых, слабо затронутых перекристаллизацией породах составляет 1,13%; в мелкозернистых массивных карбонатитах — 0,93%; в наиболее интенсивно перекристаллизованных разновидностях, представленных мелкозернистыми четко полосчатыми карбонатитами, — 0,74%. В сланцеватых мелкозернистых кальцитовых карбонатитах пористость резко возрастает до 1,58% в связи с появлением в породе системы параллельных микротрещин.

Относительно высокий процент пор (1,5%) отмечается в анкеритизированных кальцитовых карбонатитах. С увеличением степени анкеритизации карбонатита увеличивается его пористость: в мелкозернистых анкеритовых карбонатитах она составляет в среднем 1,84% и достигает в крупнозернистых разновидностях 4,30% (в среднем 2,84%). Анкеритовые карбонатиты, особенно в их средне- и крупнозернистые разновидности нередко имеют кавернозный, ноздреватый облик.

Появление высокопористых анкеритовых карбонатитов, по-видимому, связано с метасоматической усадкой, которая происходила в процессе их анкеритизации. Изменение пористости влияет на такие свойства карбонатитов, как упругость и водопоглощение. Наибольшей упругостью отличаются плотные карбонатиты, а высокой газопроницаемостью и водопоглощением — высокопористые их разновидности.

Коэффициент относительной напряженности (отношение модуля упругости к пористости) — характерный показатель потенциальной ослабленности породы. Наибольшая потенциальная ослабленность свойственна крупнозернистым метасоматическим и мелкозернистым

Порода	Стадия образования карбонатов	Удельный вес, г/см ³	Объемный вес, г/см ³	Эффективная пористость, %	Водонасыщенность, %
Ийолит		2,95	2,88	1,8	0,19
Кальцитовый карбонатит:					
крупнозернистый, метасоматический	I	2,81	2,77	1,44	0,24
крупнозернистый, образовавшийся в открытых полостях пегматоидный	II	2,76	2,73	0,80	0,34
крупнозернистый, частично перекристаллизованный в мелкозернистый	III	2,82	2,79	0,84	0,27
мелкозернистый, массивный и грубополосчатый		2,81	2,77	1,13	0,23
мелкозернистый, четко полосчатый		2,82	2,80	0,93	0,26
мелкозернистый, сланцеватый		2,86	2,82	0,74	0,22
мелкозернистый, анкеритизированный	IV	2,83	2,78	1,58	0,50
Анкеритовый карбонатит:		2,88	2,83	1,5	0,38
мелкозернистый		2,93	2,88	1,84	0,061
крупнозернистый		2,87	2,79	2,84	0,73

сланцеватым разностям кальцитовых карбонатитов, а также мелко- и особенно крупнозернистым анкеритовым карбонатитам.

Высокая магнитная восприимчивость характерна для разновидностей мелкозернистых кальцитовых пород, особенно для пегматоидных, и обусловлена повышенными концентрациями магнетита, реже пирротина. В некоторых участках карбонатитового массива существует прямая корреляционная связь между содержаниями магнетита и пирохлора (коэффициент корреляции 0,72), которая выражается в появлении высоких концентраций пирохлора в участках, богатых магнетитом. В связи с этим магнитная восприимчивость может являться важным оценочным критерием на рудоносность карбонатита.

С точки зрения выявления физической анизотропии карбонатитового массива, которая определяет особенности распределения разрывных структур, контролирующей локализацию рудных тел, особый интерес представляет анализ физических свойств ранних крупнозернистых кальцитовых карбонатитов.

Наибольшей пористостью и ослабленностью обладают метасоматические разновидности ранних карбонатитов ($P_{эф} = 1,94\%$), слагающие основную часть карбонатитового ядра. В связи с этим тектонические деформации и обусловленная ими перекристаллизация ранних карбонатитов проявились в центральной части массива и способствовали образованию зон мелкозернистых кальцитовых

Скорость распространения продольных волн, м/с	Модуль упругости $E \cdot 10^8$, кгс/см ²	Удельное акустическое сопротивление, гс/см ² · с	Коэффициент относительной напряженности $\lambda \cdot 10^4$, кгс/см ²	Коэффициент газопроницаемости K , мд	Магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^{-4}$ ед. СГСм	
3921	4,53	11,32	3,0		600	
3292	2,81	8,76	1,94	0,00240	500	
3296	2,99	9,03	3,42		150	
3286	3,12	9,18	3,80	0,00070	8100	
3382	3,18	9,37	2,84		650	
3531	3,53	9,85	4,05	0,00080	3000	
3233	2,97	9,13	5,15		} 5000	
3164	2,90	8,8	1,8	0,00970		1500
3494	3,50	9,89	3,33			
3425	3,45	9,9	2,01		30	
3369	3,18	9,42	1,5	0,53590	15	

карбонатитов. Типично жильные разности, слагающие периферию ядра и серию жил вокруг него, очень слабо затронуты перекристаллизацией ввиду их значительно большей напряженности ($\lambda = 3,42$). Перекристаллизация и связанное с ней редкометальное оруденение проявились избирательно, главным образом по метасоматическим карбонатитам. Поэтому пористость частично перекристаллизованных разновидностей ниже, чем метасоматических, но выше, чем у карбонатитов, образовавшихся путем выполнения трещинных полостей.

Анализ всех физических свойств карбонатитов показывает, что среди них могут быть выделены главнейшие признаки, позволяющие диагностировать и отличать рудные (пирохлорсодержащие) породы от безрудных.

1. Пирохлорсодержащие карбонатиты (пегматоидные и мелкозернистые кальцитовые), как правило, характеризуются малой пористостью. При ее сопоставлении с рудоносностью отмечается в общем обратная их зависимость.

2. Газопроницаемость рудных (пирохлорсодержащих) кальцитовых карбонатитов в 30 раз меньше, чем безрудных, и значительно меньше, чем анкеритовых.

3. Коэффициент относительной напряженности рудных кальцитовых карбонатитов в 2—2,5 раза выше, чем безрудных кальцитовых и анкеритовых.

4. Высокая магнитная восприимчивость пироклорсодержащих карбонатитов (мелкозернистых и особенно пегматоидных) может быть использована как поисковый признак.

5. Изучение физико-механических свойств ранних карбонатитов позволило выявить участки, наиболее благоприятные для оруденения, и наметить перспективные площади для проведения поисково-разведочных работ.

Редкометальное (тантал-ниобиевое) оруденение вкрапленного типа одного из месторождений

Оруденение связано с метасоматическими породами, имеющими состав, близкий к щелочным гранитам. Они слагают тела линзовидной

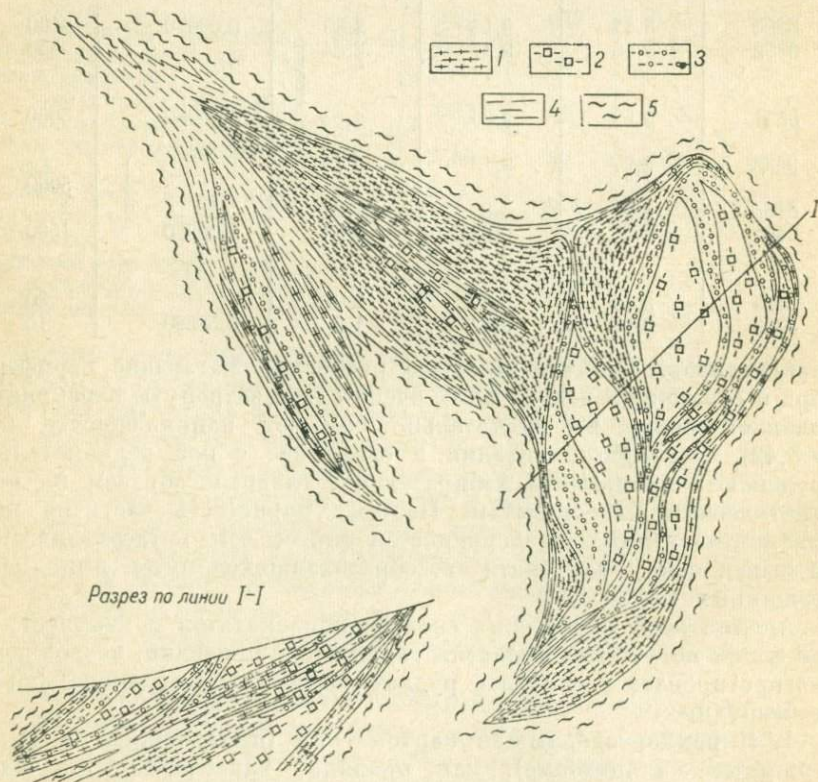


Рис. 13. Схема геологического строения месторождения оруденелых метасоматитов.
(Составили В. С. Кудрин, А. Е. Силаев)

1 — породы линейно-гнейсовидного типа; 2 и 3 — породы порфиробластового типа;
4 — метасоматически измененные гнейсы; 5 — гнейсы, метаморфические сланцы

формы (площадь в несколько километров), залегающие согласно среди вмещающих их метаморфических сланцев и гнейсов нижнего протерозоя, и образовались путем метасоматического преобразования этих сланцев и гнейсов вдоль региональной зоны разломов (рис. 13).

По данным геологов, изучавших данное месторождение (В. С. Кудрина и др.), метасоматизм выразился в последовательно развивающихся явлениях микроклинизации, альбитизации, окварцевания, а также образовании щелочного амфибола, эгирина, астрофиллита и др.

Среди метасоматических пород выделяется ряд разновидностей, различающихся главным образом ассоциациями темноцветных минералов, структурно-текстурными особенностями и степенью рудоносности. По структурно-текстурным особенностям можно выделить два главных типа пород: 1) порфиробластовые — от слабогнейсовидных до массивных с порфиробластовыми выделениями микроклипертита и 2) линейно-гнейсовидные — с отчетливой плоскостной и линейной ориентировкой темноцветных минералов. Установлено, что наиболее отчетливая зависимость существует между уровнем содержания полезных компонентов и структурами (текстурами) метасоматических пород при одинаковом их минеральном составе.

Породы линейно-гнейсовидного типа характеризуются высоким содержанием танталсодержащего пирохлора, а порфиробластового типа — практически безрудные.

Т а б л и ц а 10

	Породы	Эффективная пористость, % (средние данные)		Породы	Эффективная пористость, % (средние данные)	
вещающие породы	Меланократовые гнейсы	1,85	Оруденелые метасоматиты	с амфиболом	1,85	
	Гнейс светло-серый с очковым кварцем	1,50		с амфиболом и эгирином	1,48	
	Метасоматически измененный гнейс, среднезернистый	1,11		Гнейсовидные:		
				с биотитом	1,08	
Оруденелые метасоматиты	Порфиробластовые: с биотитом с биотитом и амфиболом с амфиболом с биотитом и эгирином	0,93 1,38 1,39 1,81		с биотитом и амфиболом	1,36	
				с амфиболом	1,56	
				с амфиболом и эгирином	1,57	
				Линейные:		
	Равномернозернистые: с биотитом с биотитом и амфиболом	1,00 1,12		с биотитом и амфиболом	1,81	
				с амфиболом	1,85	
			(в окварцованных до	1,12)		
			с амфиболом и эгирином	1,83		
			(в окварцованных до	0,37)		

Изучение и систематизация результатов определения пористости пород (табл. 10 и рис. 14) в зависимости от различной стадии их метасоматоза и оруденения позволяют констатировать следующее.

Биотитсодержащие метасоматические породы, отличающиеся от вмещающих интенсивной ранней микроклинизацией, имеют

коэффициент пористости 1,0—1,10%, т. е. более низкий, чем у вмещающих пород (1,82—1,90%).

В породах с проявлением ранней микроклинизации (т. е. в порфиробластовых и равнозернистых) по мере развития более поздних стадий метасоматоза (сопровождаемых замещением биотита амфиболом и амфиболом эгирином) значение коэффициента пористости возрастает (до 1,5—1,86%).

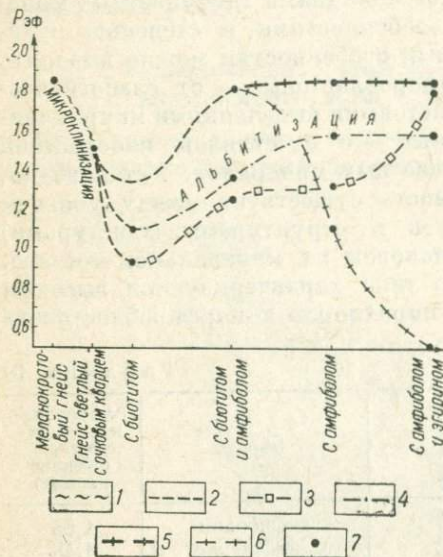


Рис. 14. Изменение значений эффективной пористости различных типов и разновидностей метасоматических пород (по В. С. Кудрину) 1 — гнейс; 2 — метасоматически измененный гнейс среднезернистый; 3 — породы порфиробластового типа; 4 — породы гнейсовидного типа; 5 — породы линейного типа; 6 — окварцованные разности линейного типа пород; 7 — средние значения эффективной пористости для каждого типа пород определенной разновидности

метасоматических пород зонам линейных и гнейсовидных пород, развившихся непосредственно по гнейсам и сланцам, не испытавшими ранней порфиробластической микроклинизации.

Наиболее богатыми ниобий-танталовыми рудами являются породы линейной текстуры, характеризующиеся устойчивыми значениями пористости (около 1,8%) на всем диапазоне рудного процесса.

Месторождение олова

В связи с исследованиями (проведенными в ВИМС под руководством Я. Д. Готмана) околожилых изменений, связанных с процессами рудообразования касситеритово-сульфидных месторождений, нами с целью установления поисковых критериев были произведены определения удельного, объемного весов и пористости пород. Об-

В породах линейной текстуры пористость сохраняется на уровне вмещающих пород (1,80—1,86%) на всех стадиях метасоматоза или же несколько уменьшается к концу процесса, при окварцевании пород. При интенсивном позднем окварцевании пористость падает (до 0,37%).

Гнейсовидные породы по изменению пористости занимают промежуточное положение между порфиробластовыми (равномернозернистыми) породами и породами линейной текстуры.

Следовательно, ранняя микроклинизация, приведшая к значительному уменьшению пористости пород, отрицательно сказалась на локализации оруденения. Порфиробластовые породы с ранним микроклинпертитом обычно имеют низкое содержание рудных минералов.

Рудный процесс локализовался в прилегающих к залежам порфиробластовых и равно-

разцы пород были взяты из участков бороздовых проб, отобранных для химического анализа.

Результаты этих определений показали, что измененные (около-жильные) породы (тектониты) отличаются повышенными значениями объемного веса по сравнению с неизменными породами (глинистыми сланцами и песчаниками), удаленными от контакта с рудными жилами.

Так, наибольшие значения объемного веса (2,68—2,70 г/см³) приурочены к образцам пород, взятым на расстоянии до 1,5 м от жилы, за исключением трех случаев (из 30), где расстояние увеличивается до 2—3 м. Объемный вес 2,65—2,68 г/см³ соответствует образцам пород, взятым на расстоянии от 1—1,5 до 5—6 м от жилы, а 2,62—2,65 г/см³ — взятым на расстоянии от 3—5 до 16—20 м от последней. В свою очередь зависимость между изменением объемного веса и процентным содержанием песчаника в сланцах не наблюдается. Например, в породах с объемным весом 2,65 г/см³ встречаются сланцы с содержанием песчаника в количестве 1, 3, 7, 10, 25, 27 и 30%.

Установленная зависимость между числовыми значениями плотности измененных и неизмененных пород может иметь большое практическое значение при геологопоисковых работах.

Дело в том, что измененные породы, являющиеся в большинстве случаев показателем близости залегания рудных тел, макроскопически почти не отличаются от неизмененных пород. Для их разделения необходимо пользоваться методами микроскопического или спектрального анализом. Оба эти метода являются лабораторными, и применение их связано с большой затратой времени и средств. Что касается метода определения плотности, то его можно считать полевым методом, особенно если производить измерения на денситометре. При этом методе, который сводится к взвешиванию образцов в воздухе и воде на циферблатных весах, можно производить массовое определение плотности пород с последующим использованием этих данных для оконтуривания благоприятных участков поисков слепых рудных тел. Таким образом, повышенная плотность тектонитов данного месторождения может служить одним из поисковых признаков близости оруденения.

Золоторудное месторождение

По данным геологов ЦНИГРИ (М. М. Константинова и др.), в геологическом строении территории, занимаемой описываемым месторождением, принимают участие вулканогенно-осадочные и осадочные отложения верхнего мела, а также интрузии габбро-перидотитового состава. Оно расположено на стыке двух крупных структурных единиц района: близширотного пояса офиолитов и региональной субмеридиональной зоны разлома.

Восточной границей месторождения является крупная протяженная зона разлома близмеридионального — северо-восточного простирания, прослеживающаяся на расстоянии более 7 км и представленная серией сближенных дизъюнктивных нарушений. Этот

разлом ограничивает с востока поле развития габбро и вместе с тем является границей развития метаморфизма нижнесенонских вулканогенно-осадочных толщ: к западу от него отложения нижнего сенона слабо метаморфизованы, тогда как восточнее породы претерпевают значительный метаморфизм. Туфы и порфириды здесь сильно перекристаллизованы и метаморфизованы вплоть до превращения в породы типа амфиболового габбро.

Западной границей месторождения является тектонический блок, сложенный туфами, туфоалевролитами нижнего сенона и расположенный среди поля развития габбро, перидотитов. Туфы и туфоалевролиты в пределах этого блока резко меняют азимут падения слоистости: от 310—320 до 60—55° в южной части и от 270—275 до 70—80° — в северной. В последнем случае слоистость ориентируется вдоль зоны разлома мощностью 3—4 м, где породы настолько интенсивно окварцованы, осветлены и обохрены, что первичная структура их здесь затупевана. Разломы северо-восточного простирания, ограничивающие описываемый блок, выражены зонами гидротермально измененных пород мощностью до 5—6 м.

Западнее описанного тектонического блока рудные тела либо вовсе отсутствуют, либо в них отмечаются лишь следы золота.

Подавляющая часть золоторудных тел месторождения располагается в пределах зон гидротермально измененных пород Центрального участка, ограниченных структурами, описанными выше. Часть рудных тел приурочена к дайкам кварцевых липаритов и порфиров.

Зоны гидротермально измененных пород вытягиваются в близзиротном направлении в поле развития габбро и их контактов с перидотитами. Значительно реже они наблюдаются среди перидотитов и в толще вулканогенно-осадочных пород нижнего сенона. Подавляющая их часть расположена на северном крыле антиклинальной складки, образованной породами нижнего сенона. Зоны сложены кварц-карбонат-тальковыми породами. Мощность их варьирует в широких пределах — от первых метров до 30—40 м, простирание достигает 3—4 км. Большей частью они приурочены к зоне контакта габбро и перидотитов, особенно к тем участкам, где эти контакты неровные. На одном из таких участков перидотиты образуют языкообразный залив в габбро. Рудные тела располагаются в пределах этих зон и представлены кварцевыми жилами и зонами развития кварц-карбонатных прожилков, содержащих большое количество сульфидов. Интересная картина наблюдается в характере распределения рудных тел.

Основная масса их расположена внутри зон в пределах развития габбро. Как уже отмечено выше, зоны прослеживаются не только в габбро, но и переходят в массивы перидотитов. Рудные же тела, как правило, обрываются на контакте габбро с перидотитами и не прослеживаются внутри зон в поле развития перидотитов. Такая картина отчетливо наблюдается на одной из вершин участка месторождения, где зоны гидротермально измененных пород, следуя по контакту габбро с перидотитами, к западу переходят в перидотиты.

Золоторудные же тела, расположенные в этих зонах, обрываются на контакте габбро с перидотитами.

В тех участках, где рудные тела переходят в поле развития перидотитов, они быстро выклиниваются, расщепляясь на множество маломощных коротких ветвей. Такая же картина наблюдается и при переходе рудных тел в поле развития эффузивов нижнего сенона.

В связи с указанными геологическими предпосылками возник вопрос о механических свойствах габбро и перидотитов, которые могли сказаться на образовании трещин и последующем образовании рудных тел.

Фактические данные по динамической прочности этих пород (табл. 11) подтверждают их различие по механическим свойствам. Так, динамическая прочность измененных перидотитов составляет 11,5, а измененных габбро — 9,0.

Таблица 11

Физико-механические свойства	Порода			
	дайка кварцевых липаритов, вмещающая золоторудную минерализацию	габбро	перидотит	лиственитовая порода, вмещающая золоторудную минерализацию
Динамическая прочность, 1/мм	8,11	9,00	11,51	7,58
Удельная ударная вязкость, кгсм/см ³	1,30	1,14	2,32	0,96
Акустическое сопротивление, гс/см ² ·с	8,28	10,88	11,69	8,75
Скорость распространения продольных волн, м/с	3254	3671	4267	3062
Удельный вес, г/см ³	2,61	3,01	3,04	2,93
Объемный вес, г/см ³	2,42	2,96	2,97	2,86
Эффективная пористость, %	7,46	2,0	2,45	3,05
Динамический модуль упругости $E \cdot 10^5$, кгс/см ²	4,40	5,11	6,18	3,28

Это подтверждают и данные определения удельной ударной вязкости. Для перидотитов эта величина вдвое выше, чем для габбро. Показательным является также динамический модуль упругости, который для перидотитов равен 6,18, а для габбро — 5,11.

Дополнительным критерием может служить различная твердость этих пород. Судя по данным табл. 1, твердость ультраосновных пород, к которым относятся перидотиты, по всем указанным методам (вдавливания штампа, истирания и отскока) ниже у ультраосновных (перидотитов) и выше у основных (габбро). Это в свою очередь указывает на различную хрупкость пород. Породы более высокие по твердости являются, как правило, более хрупкими и более благоприятными для трещинообразования.

Представляют известный интерес физико-механические свойства даек кварцевых липаритов и лиственитов, вмещающих золоторудную минерализацию.

Из табл. 11 видно, что липариты и листвениты являются менее прочными, менее плотными и более пористыми породами. Их отличительные особенности от вмещающих пород (габбро и перидотитов) характеризуются также акустическими свойствами. Как липариты, так и листвениты имеют меньшую скорость распространения продольных волн, меньшее акустическое сопротивление и меньшее значение динамического модуля упругости.

Ранее было показано [38], что залегание рудных тел на границе рудовмещающих пород объясняется существенной разницей их физико-механических свойств. Приведенные данные дополняют имеющиеся сведения по физико-механическим свойствам рудовмещающих пород описываемого месторождения золота.

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Преимущественное развитие рудовмещающих трещинных структур в основных породах (габбро) объясняется их большими деформационными свойствами по сравнению с ультраосновными (перидотитами). Габбро характеризуется более низкими значениями динамической прочности, модуля упругости, акустического сопротивления.

2. Кварцевые липариты, листвениты, вмещающие золоторудную минерализацию, отличаются от окружающих пород (габбро и перидотитов) меньшими значениями динамической прочности, акустического сопротивления, скорости продольных волн, динамического модуля упругости и более высокими значениями эффективной пористости.

Месторождения молибдена

Исследования проводились на четырех месторождениях Забайкалья.

Месторождение I сложено главным образом интрузивными, значительно меньше эффузивными и жильными породами (рис. 15). Месторождение штокверкового типа расположено в приосевой части плутона, в зоне контакта меланократовых интрузивных пород, слагающих западную и центральную части рудного поля, с лейкократовыми гранитами, преимущественно распространенными в его северной и восточной частях. Геологами, изучавшими месторождение (М. С. Баклановым, В. Г. Михалевым, Ю. Д. Скобелевым, М. Ф. Соловьянович и А. В. Семеновым), было отмечено, что штокверковое молибденовое оруденение развито главным образом в лейкократовых гранитах и почти не распространяется в меланократовые породы их кровли. Экранирующее влияние меланократовых пород, по данным В. Т. Пакалова и других, вряд ли было связано с отличием их химического состава от состава лейкократовых гранитов, поскольку в практике изучения молибденовых месторождений имеется много примеров концентрации оруденения в породах среднего и основного состава. Очевидно, экранирующая роль меланократовых пород в рудном процессе на этом месторождении была определена не хи-

мическим или минеральным составом этих пород, а их механическими свойствами. Для подтверждения этого вывода упомянутые выше авторы отобрали штучные образцы разных пород, не затронутых процессами гидротермальных изменений, для изучения их физико-механических свойств. Результаты исследований приведены в табл. 12.

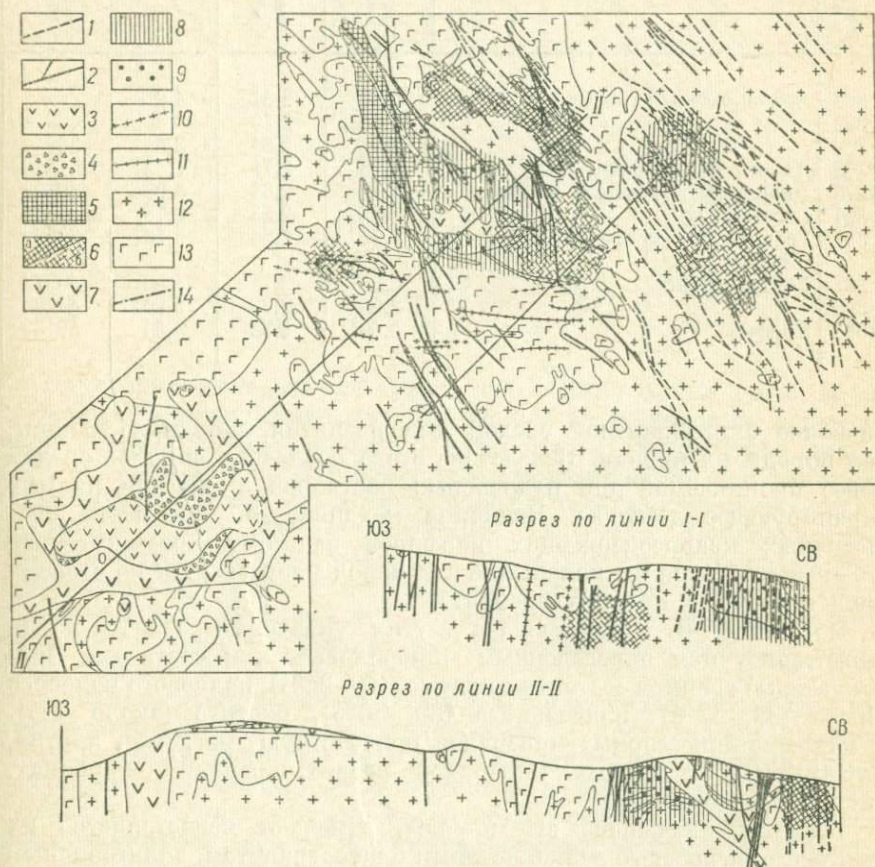


Рис. 15. Геологическая карта месторождения I молибдена. (Составил В. Т. Пакалов)

1 — дайки ортофириров; 2 — дайки диабазовых порфиритов; 3 — субшелочные кварцсодержащие порфиры; 4 — агломеративная вулканическая брекчия; 5 — брекчиевое молибденовое оруденение; 6 — вкрапленное и прожилково-вкрапленное молибденовое оруденение, выходящее на поверхность (а), вкрапленное и прожилково-вкрапленное молибденовое оруденение, не выходящее на поверхность (б); 7 — субшелочные кварцсодержащие порфиры; 8 — медное оруденение; 9 — кварц-полевошпатовые тела; 10 — дайки диоритовых порфиритов; 11 — дайки спессартитов; 12 — лейкократовые граниты; 13 — диориты; 14 — разрывные тектонические нарушения

Анализируя цифровой материал, приведенный в таблице, нетрудно заметить, что лейкократовые граниты обладают наименьшей механической прочностью на скалывание (от 81,2 до 104,0 кгс/см²) по сравнению с механической прочностью меланократовых пород (136,0—157,0 кгс/см²). Поэтому лейкократовые граниты являются

Номер образца	Порода	Удельный вес, г/см ³	Объемный вес, г/см ³	Эффективная пористость, %	Скорость продольных волн, м/с
388	Лейкократовый гранит	2,62	2,51	4,2	—
393	»	2,65	2,56	3,4	—
389	»	2,78	2,68	3,6	3664
392	Диорит роговообманковый	2,75	2,71	1,42	4154
1275	Диорит на контакте с гранитом	2,72	2,64	3,09	3930
394	Роговик	2,88	2,83	1,76	3930
391	Гранодиорит (за пределами рудного поля)	2,71	2,56	5,53	3682
387	Габбро-диорит	2,88	2,74	4,86	4037
390	»	2,90	2,73	5,86	4422
1593	Порфир	2,60	2,52	3,34	3913

наиболее благоприятной средой для развития дорудных трещин, чем породы их кровли. Вследствие этого последние явились средой менее проницаемой для рудоносных растворов и оказали на них экранирующее действие. Величина механической прочности субщелочных кварцсодержащих порфиров занимает промежуточное положение. Такое же положение эти породы занимают и по степени концентрации в них оруденения.

По данным В. Т. Пакалова и других, указанные разности пород характеризуются определенным минералогическим составом. Лейкократовые граниты состоят из кварца (10—24%), калиевого полевого шпата (35—37%), плагиоклаза (39—53%), биотита (около 1%). В качестве акцессорных минералов присутствуют магнетит, апатит, циркон. Из вторичных минералов развиты серицит, карбонат, эпидот, мусковит.

Геологи, изучавшие эти породы, отмечают непостоянство их состава, отвечающего лейкократовым плагиогранитам, аплитовидным гранитам и аплитам.

Меланократовые породы представлены диоритами, гранодиоритами и габбро-диоритами, связанными между собой целой гаммой переходных разновидностей. В сложении всех этих пород участвуют плагиоклаз (55—67%), роговая обманка (10—31%), биотит (2—4%), кварц (1—4%) и калиевый полевой шпат (9—19%). Из акцессорных минералов присутствуют магнетит, сфен, апатит, циркон. Характерно повышенное содержание сфена (0,5—1,5%).

Субщелочные кварцсодержащие порфиры представляют собой светлые, розовато-серые порфировые породы, состоящие из плагиоклаза, калинатрового полевого шпата, кварца, рудных минералов (пирита, магнетита, гематита, ильменита) и серицита.

Водонасыщенные, %	Механическая прочность на скалывание, кгс/см ²	Твердость по методу Вестгаблери, 1/см	Магнитная восприимчивость % · 10 ⁻⁸ ед. СГСМ	Модуль упругости, 10 ⁸ кгс/см ²	Относительная напряженность, 10 ⁸ кгс/см ²	Акустическое сопротивление, г/см ² · с
1,509	81,2	—	—	—	—	—
0,583	101,9	—	—	—	—	—
0,378	104	700	97 280	3,59	1,0	9,81
0,556	120	329	—	4,75	3,35	11,24
0,635	112	299	—	4,10	1,33	10,37
0,581	137	273	—	4,35	2,48	11,12
0,580	136	454	42 987	3,47	0,9	9,42
0,558	136	327	12 162	4,46	0,9	11,06
0,458	157	341	78 462	5,33	0,9	12,07
0,907	117	481	—	3,88	1,16	9,85

Из приведенных данных видно, что лейкократовые граниты по сравнению с меланократовыми отличаются более высоким содержанием кварца (10—24% против 1—4%), калиевого полевого шпата (35—37% против 8—19%), отсутствием роговой обманки и меньшим содержанием биотита. Это отличие пород в минералогическом составе сказалось и на физико-механических свойствах. Лейкократовые граниты оказались менее прочными (более хрупкими) по сравнению с меланократовыми породами благодаря более высокому содержанию в них кварца и почти полному отсутствию в них цветных минералов (роговой обманки и биотита), увеличивающих механическую прочность породы.

Минералогический состав порфиров также вполне объясняет их физические свойства. В них содержится до 18% кварца (из них 15% в основной массе), что безусловно сказалось на их механической прочности, занимающей промежуточное положение по сравнению с лейкократовыми гранитами и меланократовыми породами. С этих позиций можно объяснить и другие физические свойства исследованных образцов пород, приведенных в табл. 12.

Следовательно, лейкократовые граниты, содержащие значительное количество кварца и характеризующиеся менее плотной структурой, имеют более высокую твердость и меньшие значения модуля упругости, коэффициента относительной напряженности, а также акустических свойств (скорости продольных волн и удельного акустического сопротивления). Это также свидетельствует о том, что лейкократовые граниты по сравнению с меланократовыми породами являлись более благоприятной средой для локализации рудного вещества.

Месторождение II. Рудное поле приурочено к тектонической зоне близмеридионального простирания (рис. 16). В его

строении участвуют габбро-диабазы и порфириды среднего кембрия, прорванные в центральной части разновозрастными интрузиями габбро-диоритов, гранитов, микродиоритов, гранит-порфиров, кварцевых порфиров и диабазовых порфиритов, образующих на поверхности серию крупных и мелких выходов, ориентированных преимущественно в близмеридиональном направлении. Этому главному структурному направлению соответствует зона перекристаллизованных, разгнейсованных в результате динамотермального мета-

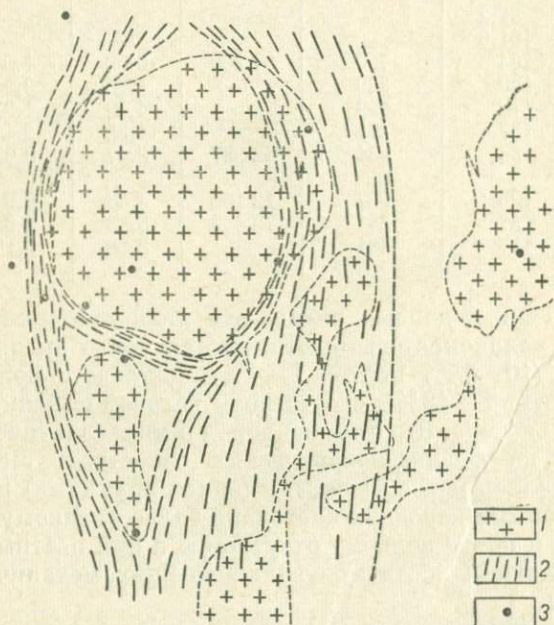


Рис. 16. Геологическая схема месторождения II молибдена (по данным В. Т. Накалова)
1 — граниты; 2 — зоны расщепления; 3 — место отбора образцов

морфизма гранитов и эффузивов, которые вместе с выходами магматических пород подчеркивают существование долгоживущей тектонической зоны.

Зона разгнейсования и расщепления пород, возникшая в первый этап метаморфизма, прослеживается по центральной части месторождения в меридиональном направлении и захватывает как граниты, так и эффузивы. Граниты в этой зоне перекристаллизованы в мелкозернистый кварц-полевошпатовый агрегат, имеющий гнейсовидную (полосчатую) текстуру, обусловленную чередованием полос кварца и полевого шпата. Интенсивная перекристаллизация эффузивов привела к образованию мелкозернистых актинолит-кварц-полевошпатовых, эпидот-актинолитовых, эпидот-актинолит-полевошпатовых и актинолит-эпидот-кварцевых расщепленных пород.

Во второй этап метаморфизма происходит дальнейшее расслабление эффузивов, чаще оно развивается по зонам первого этапа, приурочено к контактам эффузивов и гранитов и сопровождается интенсивным образованием мелкочешуйчатого зеленого биотита.

Кроме того, между этими двумя этапами динамотермального метаморфизма расслабленные граниты были интенсивно калишпатизированы.

У геологов, изучавших данное месторождение, возник вопрос о том, почему первый период метаморфизма проявился как на интрузивных (гранитах), так и на эффузивных (диабазы, порфириты) породах, а второй период метаморфизма сказался лишь на эффузивах.

Логично предположить, что к моменту возникновения первого периода метаморфизма граниты и эффузивные породы имели близкие физико-механические свойства, а к моменту возникновения второго этапа метаморфизма они отличались по своим характеристикам.

С целью выяснения этого вопроса были определены механическая прочность, твердость и другие физико-механические свойства (табл. 13). Этим предположениям вполне удовлетворяют данные по твердости пород (средняя твердость малоизмененного гранита 511, диабаза 500).

В результате перекристаллизации и калишпатизации гранитов (первый этап метаморфизма) прочность их на скалывание и твердость по методу истирания значительно возросли (соответственно $K_{ск} = 175$ кгс/см² и $H_{н-т} = 850$). В эффузивах (полосчатых) механическая прочность на скалывание становится меньше вдоль полосчатости (134 кгс/см²) и остается прежней поперек полосчатости (265 кгс/см²). В то же время твердость по методу истирания в них падает, что и обуславливает, по-видимому, развитие зон метаморфизма второго этапа преимущественно в эффузивах.

Твердость и механическая прочность пород, вероятно, сказались и на распределении последующего предрудного дробления и распределении оруденения. Граниты в центре месторождения после их перекристаллизации и калишпатизации превратились в жесткий массив, обладающий более высокой твердостью (832—990), механической прочностью (170—182 кгс/см²), малой пористостью (3,39—5,55%) и водонасыщением (0,29—0,39%). Вследствие этого дробление проходило в основном вокруг него. Соответственно кольцеобразно вокруг гранитов расположилось и оруденение.

Указанная геологическая интерпретация результатов испытания физико-механических свойств показывает, что числовые значения твердости и механической прочности исследованных пород могут быть использованы для разрешения поставленных геолого-генетических вопросов. Другие свойства пород, приведенные в табл. 13, также находятся в тесной зависимости от вещественного состава и степени их изменения.

В качестве примера рассмотрим физико-механические свойства гранитов, в различной степени измененных гидротермальными процессами (табл. 14).

Номер образца	Место взятия пробы	Порода	Эффективная пористость, %	Водонасыщение, %	Механическая прочность на скалывание, кгс/см ²	Твердость по методу истирания, 1/см
459	За пределами рудного поля	Г р а н и т: неизмененный	4,04	0,758	72	361
717	Скв. 9	среднезернистый слабо измененный	6,32	0,446	133	704
952	Скв. 3	слабо измененный	8,00	0,743	128	489
466/3	Штольня 3 (рассечка 33)	перекристаллизованный	3,39	0,398	175	832
343	Скв. 33	полосчатый микроклинизированный	3,76	0,291	170	809
233	Скв. 47	перекристаллизованный, микроклинизированный	5,55	0,379	182	990
358	Скв. 61	перекристаллизованный и микроклинизированный	4,15	0,300	150	436
304	За пределами рудного поля	Д и а б а з: неизмененный	3,02	0,128	262	500
472	Штольня 3 (рассечка 26)	полосчатый	6,02	1,725	134 *	123
469	То же, рассечка 40	полосчатый	5,55	0,540	265 **	
861	Скв. 14	диабазовый порфирит послерудный	7,05	0,218	181	225

* Вдоль полосчатости.

** Поперек полосчатости.

Неизмененный гранит состоит из кварца (22%), плагиоклаза (40%), калишпата (27%), биотита (8%), рудного минерала (магнетита 3%); слабо измененный — из кварца (26%), калишпата (43%), плагиоклаза (20%), роговой обманки (8%), эпидот-цоизита (2%), рудного минерала (1%); сильно измененный — из кварца (20%), калишпата (54%), плагиоклаза (5%), мусковита (12%), цоизита (7%). Обращает внимание количество плагиоклаза, которое в неизмененном граните составляет 40%, в частично измененном 20% и в измененном 5%.

В соответствии с этим изменилось и количество калишпата как вторичного минерала; в неизмененном граните его количество равно 27%, в слабо измененном 43% и сильно измененном 54%. Изменение связано с преобразованием плагиоклаза (альбита) в ортоклаз и микроклин в результате процесса калишпатизации. В соответствии с этим процессом изменилась и структура породы. В неизмененном

Физико-механические свойства	Гранит			Физико-механические свойства	Гранит		
	неизмененный	слабо измененный	сильно измененный		неизмененный	слабо измененный	сильно измененный
Акустическое сопротивление, гс/см·с	6,21	8,98	10,26	Механическая прочность на скалывание, кгс/см ²	72	133	150
Удельный вес, г/см ³	2,72	2,69	2,65	Твердость по методу истирания, 1/см	361	704	436
Объемный вес, г/см ³	2,61	2,52	2,54	Магнитная восприимчивость $\times 10^{-6}$, ед. CGSm	38 511	24 299	267
Эффективная пористость, %	4,04	6,32	4,15	Модуль упругости $E \cdot 10^{10}$, кгс/см ²	1,48	3,20	4,15
Скорость распространения продольных волн, м/с	2883	3566	4043	Относительная напряженность $\lambda \cdot 10^5$, кгс/см ²	0,3	0,5	1,0
Водонасыщаемость, %	0,758	0,446	0,300				

граните она гранитная, в слабо измененном — гломеробластическая и в сильно измененном — гранито-гнейсовидная.

Физико-механические свойства указанных пород находятся в полном соответствии с их вещественным составом и структурой.

Увеличение степени калишпатизации увеличивает акустическое сопротивление, скорость продольных волн, механическую прочность, модуль упругости, коэффициент относительной напряженности и уменьшает процент водонасыщения. Обращает также внимание значение магнитной восприимчивости. Неизмененный гранит имеет максимальное значение ($38511 \cdot 10^{-6}$ ед. CGSm). По мере изменения гранитов магнитная восприимчивость заметно уменьшается и в наиболее измененных образцах имеет минимальное значение (267×10^{-6} ед. CGSm).

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Физико-механические свойства исследованных пород изменяются в зависимости от изменения их вещественного состава и структуры и позволяют характеризовать измененные и неизмененные породы определенными числовыми значениями механической прочности, твердости, скорости продольных волн и других физических свойств.

2. Для объяснения различного влияния первого и второго периодов метаморфизма на вмещающие породы месторождения могут быть использованы значения их твердости и механической прочности.

3. Твердость, механическая прочность и другие свойства пород месторождения сказались и на распределении оруденения. Граниты

в центре месторождения как более твердые и прочные породы превратились в жесткий массив, вокруг которого происходили расщепление примыкающих к ним пород и локализация оруденения.

Месторождение III. Рудное поле месторождения (по данным геологов А. Г. Евдохина, Б. С. Чернова, В. Г. Кругловой и др.) сложено гранитами среднепалеозойского возраста, прорванными верхнеюрскими эффузивными кварцевыми порффирами (южный массив), поздне-верхнеюрскими гранит-порффирами (центральный массив), кварцевыми порффирами и лампрофирами (дайки).

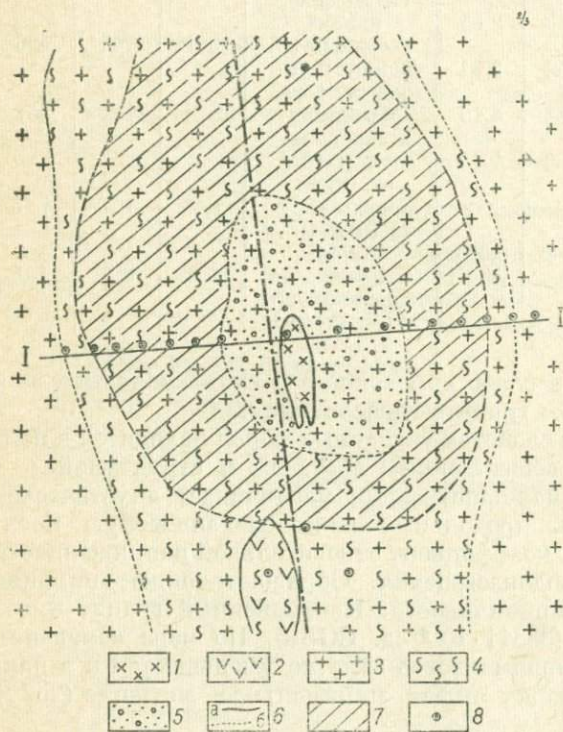


Рис. 17. Схематический план геологического строения месторождения III молибдена (по данным П. С. Чернова)

1 — послевеерхнеюрские гранит-порфиры; 2 — верхнеюрские эффузивные кварцевые порфиры; 3 — варисские граниты; 4 — гидротермально измененные (серицитизированные) породы внешней зоны; 5 — дробленые, калишпатизированные и окварцованные породы ядра; 6 — границы пород (а), зон (б); 7 — контур промышленного распространения молибденового оруденения; 8 — место взятия пробы

В 1956 г. Н. А. Хрущов впервые высказал идею о концентрически-зональном строении месторождения, над развитием и обоснованием которой сотрудники партии ВИМС работали в последующий период. В результате этих работ было установлено, что в центральной части месторождения вокруг вытянутого в меридиональном направлении тела гранит-порфиров располагаются сильно раздробленные, калишпатизированные и окварцованные граниты, образуя так называемое «ядро» грубо изометрической формы. Вокруг этого «ядра» расположена «внешняя зона» сильно гидротермально измененных (осветленных), преимущественно серицитизированных гранитов (рис. 17).

К этим породам, в частности, и приурочено рудное тело, представляющее собой штокверк кольцеобразной формы, включающий

различно ориентированные кварцево-молибденовые жилы и прожилки.

В пределах месторождения наиболее четко проявлена меридиональная тектоническая зона, которая фиксируется телами молодых эффузивных и интрузивных пород, многочисленными брекчиями и четко выраженной системой трещин близмеридионального простирания.

Характерным для месторождения является интенсивное проявление околорудных изменений вмещающих пород (в порядке убывающего значения): серицитизация, окварцевание, калишпатизация, березитизация, карбонатизация, хлоритизация и каолинизация.

Основной структурой, контролирующей оруденение, является долгоживущий (заложенный еще в палеозое) меридиональный разлом. Существенную роль для локализации оруденения играла также система дорудных трещин тектонической зоны северо-западного простирания, сопряженной с главным контролирующим разломом.

Большое влияние на морфологию рудного тела оказало внедрение штока гранит-порфиров, сопровождавшееся интенсивным дроблением.

В. Г. Круглова установила на месторождении семь стадий минералообразования: кварцевую, магнетит-кварцевую, молибденит-кварцевую, пирит-кварцевую, галенит-сфалеритовую, золото-кварцевую и карбонатно-халцедоновую.

Закономерное размещение ассоциаций минералов первых трех стадий: кварцевой, магнетит-кварцевой и молибденит-кварцевой подчеркивает концентрически-зональное строение рудного поля. Вокруг практически безрудного ядра концентрируются прожилки магнетит-кварцевой стадии.

К «внешней» зоне приурочено основное молибденовое оруденение, образовавшееся в третью стадию минерализации. Частично минерализация каждой последующей стадии накладывается на предыдущие.

Прожилки четвертой стадии (кварц-пиритовой) наблюдаются на всех участках месторождения, за исключением кварцевого «ядра».

Более поздние стадии (галенит-сфалеритовая, золото-кварцевая и карбонатно-халцедоновая) не связаны с концентрически-зональным размещением ранних стадий и проявлены в юго-восточной части месторождения. Прожилки этих стадий приурочены в основном к зоне дробления северо-западного простирания.

Непосредственно в образовании рудных минералов метасоматоз играл подчиненную роль, и отложение рудных компонентов в основном происходило путем выполнения открытых трещин.

При определении физико-механических свойств околорудных пород учитывался основной структурный признак данного месторождения, а именно концентрически-зональное строение рудного поля, включающее внешний контур, промышленный контур и ядро (см. рис. 17).

Краевая часть массива представлена неизменным роговообманково-биотитовым гранитом; внешний контур пород — сильно

серицитизированным, каолинизированным и трещиноватым гранитом (в контуре этих пород имеется выход кварцевых порфиров с каолинизированными зернами полевых шпатов); промышленный контур — сильно измененными гранитами в результате серицитизации, березитизации, пиритизации и дробления и, наконец, породы ядра — окварцованным и калишпатизированным биотитовым гранитом, включающим шток гранит-порфира среднезернистой порфировой структуры.

В соответствии с этим делением пород проведены исследования их физико-механических свойств, характеризующих указанные их разности (табл. 15).

Таблица 15

Физико-механические свойства	Краявая часть рудного поля	Внешний контур		Промышленный контур	Ядро	
		граниты	кварцевые порфиры		граниты	гранит-порфиры
Эффективная пористость, %	3,39	10,11	6,46	8,14	5,44	3,07
Водонасыщенность, %	0,672	5,596	3,97	1,678	1,128	0,823
Твердость по методу истирания, 1/см	465	9	88	146	1056	520
Механическая прочность на скалывание, кгс/см ²	60	26	44	50	122	—
Скорость распространения продольных волн, м/с	3400	2475	2829	3108	4041	4219
Модуль упругости $E \cdot 10^6$, кгс/см ²	2,93	1,6	1,97	3,03	5,28	4,49
Относительная напряженность образца породы $\lambda \cdot 10^5$, кгс/см ²	0,8	0,17	0,30	0,45	0,96	—
Усадка при сжатии, %	28,1	37,7	32,6	39,7	33,1	—
Относительная пустотность, %	4,0	1,0	2,3	1,10	3,29	—

Показатели, приведенные в таблице, также увязываются с характером изменения этих пород; судя по описанию, изменение их связано в основном с дорудными процессами калишпатизации и окварцевания. Этим в значительной степени объясняется то, что породы ядра являются практически безрудными.

Исходя из фактических данных, можно предположительно считать, что наиболее благоприятными значениями физико-механических свойств измененных гранитов, сопутствующих оруденению, являются: пористость в пределах 8—10%, водонасыщение 1,5—5,0%, прочность по скалыванию до 100 кгс/см², скорость продольных волн 1500—3000 м/с, коэффициент относительной напряженности около 0,5.

Изучение каменного материала месторождения в раздробленном состоянии дало дополнительные данные, например, усадка при сжа-

тии равна 34—41%, коэффициент относительной пустотности около 1,0.

Таким образом, полученные данные по определению физико-механических свойств рудовмещающих горных пород в значительной степени подтверждают сложившееся мнение геологов о концентрическом строении данного месторождения.

Измененные граниты, слагающие внешний и промышленный контуры месторождения, отличаются от краевой части и ядра более высокими пористостью, усадкой, меньшими твердостью, механической прочностью, модулем упругости. Характерные данные получены и по другим свойствам, приобретающим значение физико-механических индикаторов околорудных пород.

Месторождение IV. Рудное поле месторождения (по данным А. Г. Евдохина) приурочено к южному эндоконтакту плутона киммерийского возраста (с жильными дериватами-аплитами и пегматитами), прорванного многочисленной серией дайковых тел. Восточный и юго-восточный фланги плутона граничат с полями развития юрских осадочных образований (песчаники и сланцы с прослоями конгломератов). Основной геологический фон рудного поля образуют биотитовые и биотитово-роговообманковые граниты и гранодиориты обычно порфировидного облика.

Отличительной чертой описываемого месторождения является жильная форма локализации оруденения. Такой характер морфологии рудных тел месторождения обусловлен унаследованным развитием трещинных структур, план которых не меняется на протяжении долгого периода.

Изучение физико-механических свойств околорудных горных пород данного месторождения показало, что измененные породы имеют физические свойства, резко отличающиеся от неизмененных пород.

Данные по наиболее характерному разрезу приведены на рис. 18, из которого следует, что измененный (околорудный) гранит резко отличается значениями пористости, водонасыщения, магнитными и механическими свойствами. Для поисковых работ наибольшее значение могут иметь определения пористости и магнитной восприимчивости.

Исследования физико-механических свойств пород в монолите были дополнены опытами по сжимаемости пород в раздробленном состоянии. Для этого были использованы те же характерные образцы горных пород, для которых определялись физико-механические свойства в монолите.

Обобщенные результаты исследований физико-механических свойств пород в монолите и в раздробленном состоянии применительно к измененным и малоизмененным породам приведены в табл. 16.

Из табл. 16 видно, что все значения физических и механических свойств измененных (околорудных) пород существенно отличаются от значений указанных свойств для неизмененных и малоизмененных

пород. Исходя из этого, все они в той или иной степени могут являться индикаторами измененных (околорудных) пород. Некоторые из них могут определяться непосредственно в поле (пористость в монолите, магнитная восприимчивость, модуль упругости, отношение модуля упругости в монолите к пористости в монолите, скорость продольных волн), что является особенно ценным при поисково-разведочных работах.

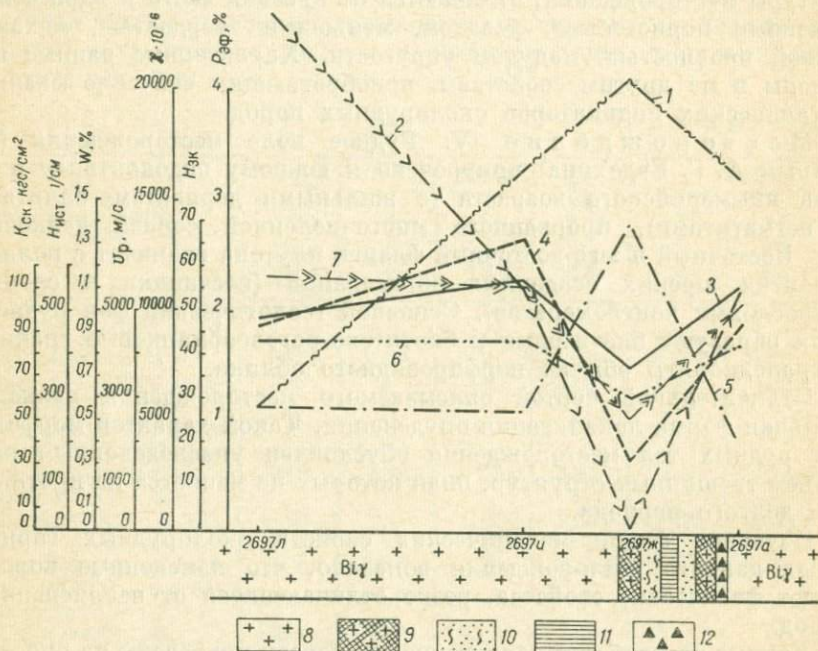


Рис. 18. Поперечный разрез через кварцлаг 64 по жиле 32 (III горизонт)

1 — эффективная пористость ($P_{эф}$); 2 — магнитная восприимчивость ($\chi \cdot 10^{-6}$); 3 — механическая прочность по скалыванию ($K_{ск}$); 4 — твердость по методу истирания $H_{ист}$; 5 — водопоглощаемость (W); 6 — скорость распространения продольных волн v_p ; 7 — твердость по методу царапания и затухающих колебаний $H_{зк}$; 8 — гранит; 9 — измененный гранит; 10 — жильный кварц; 11 — карбонат жильный; 12 — брекчия (цифры с буквенными обозначениями — номера образцов)

Таким образом, гидротермально измененные (околорудные) граниты месторождения резко отличаются от неизмененных или малоизмененных гранитов, удаленных от рудных тел. Измененные граниты характеризуются большими пористостью и усадкой, более высоким процентом водонасыщения, меньшими магнитной восприимчивостью, твердостью, механической прочностью и модулем упругости монолита.

Установленные параметры физико-механических свойств измененных (околорудных) пород для данного месторождения близки к значениям, приведенным для третьего месторождения.

Физико-механические свойства	Породы		Физико-механические свойства	Породы	
	измененные (около-рудные)	неизмененные и мало-измененные, залегающие в удалении от рудных тел		измененные (около-рудные)	неизмененные и мало-измененные, залегающие в удалении от рудных тел
Эффективная пористость в массиве, %	4—5	(1,1—3,3)	Механическая прочность по скальванию, кгс/см ²	50—82	95—130
Водонасыщенность, %	0,9—1,70	0,6—0,8	Относительная напряженность породы в монолите (в образце) $\lambda \cdot 10^5$, кгс/см ²	0,5—1,0	1,3—5,7
Магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^{-6}$, ед. CGSM	140—300	500—27 355	Усадка при сжатии, %	34—38	30—32
Скорость распространения продольных волн, м/с	3000—322	3300—4400	Относительная пустотность, %	1,5—2,0	2,2—10,7
Твердость по методу истирания, 1/см	150—200	470—671			

Месторождения свинца и цинка

Исследования физико-механических свойств пород, вмещающих месторождения свинца и цинка, производились на Козулинском и Северо-Акатуевском месторождениях.

Козулинское месторождение. В геологическом строении месторождения (по материалам В. Юрченко) принимает участие сложный комплекс эффузивно-туфогенных пород верхнеюрского возраста, представленный диоритовыми порфиритами, кристаллотуфами, дацитовыми порфиритами, реже туфопесчаниками и туфобрекчиями (рис. 19). Все эти разновидности пород имеют сложные и взаимопереходные контакты и трудно различимы макроскопически.

Широким развитием на участке пользуются малые интрузии диорит-порфиритов, кварцевых порфиров, сиенит-порфиров и других пород, имеющих тесную пространственную и генетическую связь с верхнеюрскими эффузивными покровами.

Дайковые проявления на участке представлены лампрофирами, диабазами, мелкозернистыми диоритами, реже кварцевыми порфирами. Характерной особенностью даек является значительная (до 3—6 км) протяженность их по простиранию, свежий неизменный внешний облик и темная окраска. Мощность их колеблется от 5—10 до 30 м.

Большая часть даек пространственно приурочена к разрывным нарушениям северо-восточного простирания (45—50°). Наиболее

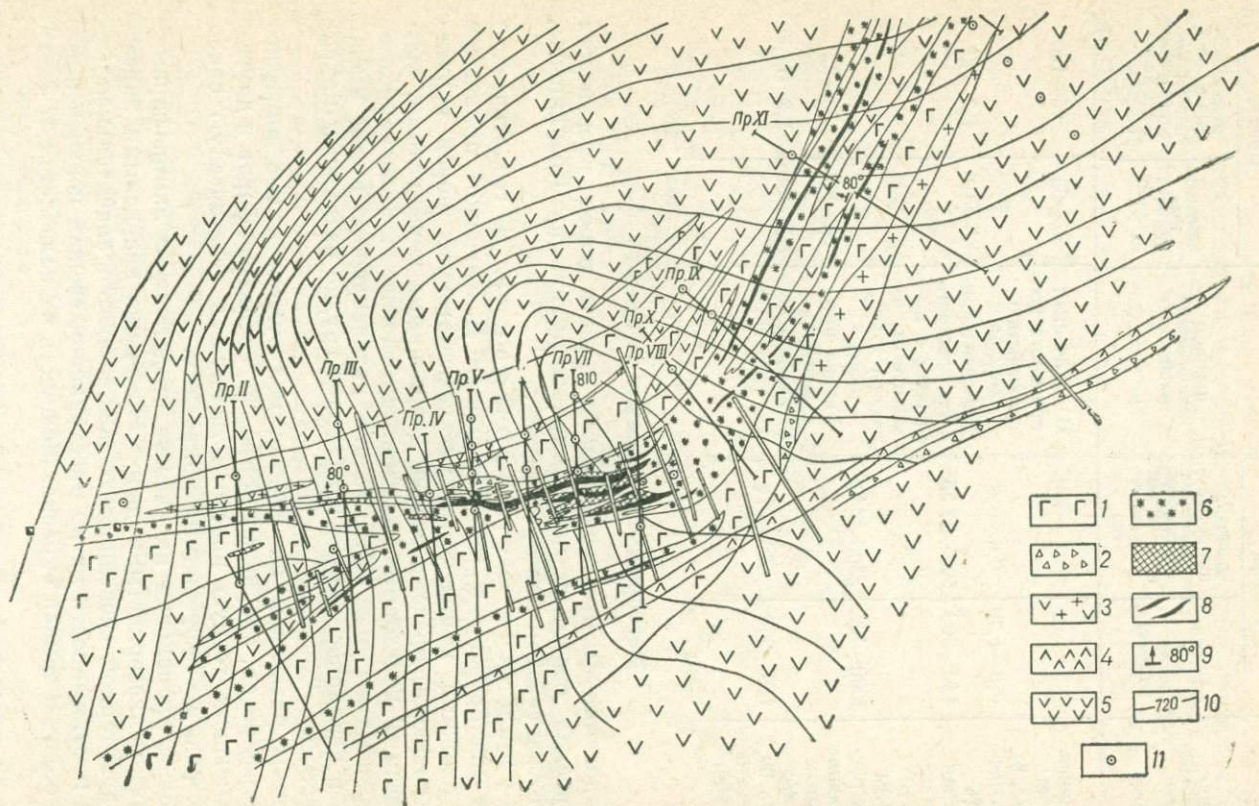


Рис. 19. Геологическая карта юго-западного фланга Козулинского месторождения. (Составил В. И. Юрченко)
 1 — кристаллотуфы с подчиненным количеством туфобрекчий и порфирита; 2 — туфобрекчия; 3 — раздробленные кристаллотуфы; 4 — лампрофиты; 5 — нерасчлененные диоритовые порфириты и кварцевые порфиры; 6 — гидротермально измененные породы с рудной минерализацией; 7 — рудная минерализация; 8 — промышленные рудные тела; 9 — элементы залегания; 10 — высотные отметки; 11 — скважины

крупное нарушение, прослеженное с различной степенью детальности на 10 км, являющееся контролирующим оруденение, сопровождается целой серией сопряженных (оперяющих) более мелких нарушений, преимущественно, по-видимому, сколового характера.

Те и другие тектонические нарушения выражены интенсивным дроблением и гидротермальным изменением пород, характеризующихся хлоритизацией, оталькованием и сульфидной минерализацией, в виде обильной рассеянной вкрапленности пирита, а также редких тонких прожилков и гнезд галенита и сфалерита.

Козулинское месторождение в целом представлено четырьмя участками: Козулинскими I и II, промежуточным и Александровским. Эти участки представляют собой отдельные свинцово-цинковые рудообразования на фоне общей бедной сульфидной минерализации рудной зоны месторождения.

Для характеристики вещественного состава вмещающих горных пород нами произведено определение их петрографического состава на примере 28 образцов из скважин 4, 7, 10, 11, использованных для сопоставления с результатами определения физико-механических свойств. Они представлены в основном андезитовыми и амфибол-биотитовыми порфиритами, кварцевыми порфирами и их туфами, в различной степени измененными вторичными процессами.

В частности, породы сильно катаклазированы. Отмечаются карбонатизация, серицитизация, окварцевание и целитизация. Для указанных пород также характерна пиритизация в виде более или менее равномерной вкрапленности пирита. Туфы и туфобрекчии в сочетании с измененными порфиритами являются наиболее благоприятной средой для локализации в них оруденения. Они обладают наибольшей пористостью, невысоким модулем упругости и др. (табл. 17).

Как известно, для месторождений молибдена, залегающих в гранитах, были установлены индикаторы измененных (околорудных) пород (см. табл. 17). Сопоставление значений физико-механических свойств измененных пород Козулинского месторождения с этими индикаторами показало, что они в основном удовлетворяют их пределам, за исключением твердости (по истиранию), которая у гранитов больше (137—568), чем у порфиритов (26—92). Объясняется это тем, что гранит на 30—35% состоит из твердого минерала — кварца, а в порфирите он практически отсутствует.

Для примера рассмотрим физико-механические свойства околорудных пород по скважинам 10 и 11 (табл. 18). Скв. 10 (рис. 20) пересекла кристаллотуфы, сильно измененные вторичными процессами (образец 18), характеризующие околорудный участок породы. По своим физико-механическим свойствам эти породы полностью соответствуют индикаторам измененных (околорудных) пород, указанных в табл. 17. Данные по образцу 15 лишь частично удовлетворяют этим пределам, а результаты исследования образцов 13 и 9, значительно удаленных от рудного тела, практически не соответствуют индикаторам для пород как в массиве, так и в их раздробленном состоянии.

Физико-механические свойства	Состояние породы	Околорудные породы	
		эффузивные (порфириты)	интрузивные (граниты)
Удельный вес, г/см ³	Массив	2,76—2,86	2,64—2,90
Объемный вес, г/см ³	»	2,49—2,64	2,50—2,75
Эффективная пористость, %	»	4,4—10,4	4,12—9,35
Механическая прочность по скалыванию, кг/см ²	»	61—83	37—82
Твердость по методу истирания, 1/см	»	26—92	137—568
Скорость распространения продольных волн, м/с	»	3110—3495	3136—3347
Магнитная восприимчивость $\times 10^{-6}$, ед. CGSM	»	182—492	0—321
Модуль упругости, кг/см ²	»	2,10—4,5	2,70—4,06
Относительная напряженность породы в образце $\lambda \cdot 10^5$, кг/см ²	»	0,26—1,20	0,3—1,0
Пористость (пустотность) после сжатия, %	Порошок	6,4—11,6	2,15—10,1
Пористость после сжатия без нагрузки, %	»	14,0—16,5	6,55—17,8
Усадка, %	»	37,2—42,8	34—41,6
Модуль упругости сжатого порошка, кг/см ²	»	0,095—0,163	0,14—0,19
Относительная пустотность, %	»	0,9—1,8	0,23—2,0
Относительная упругость $\epsilon \cdot 10^5$, кг/см ²	»	17—26	14—27
Объемная сжимаемость, %	»	99,9—103,1	93,2—109,5
Коэффициент разрыхления	»	1,61—1,77	1,59—1,66

Скв. 11 (рис. 21) пересекает дробленые кристаллотуфы, физико-механические свойства которых отвечают индикаторам околорудных пород. Об этом свидетельствуют

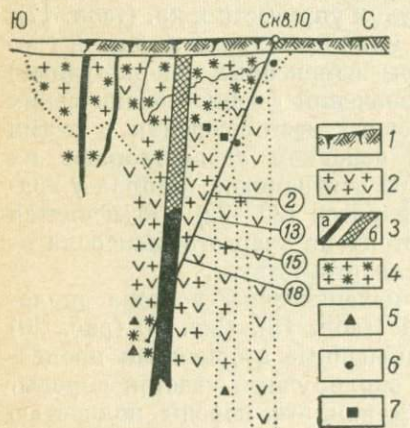


Рис. 20. Геологический разрез по профилю IV

1 — почвенно-растительный слой; 2 — кристаллотуфы; 3 — рудное тело (а — первичные руды, б — окисленные); 4 — гидротермально измененные андезиты-дациты; 5 — галенит; 6 — сфалерит; 7 — пирит (цифры в кружке — номера образцов)

данные по образцам 2, 3, 7, 9, 13, 14, 15. Характерно отметить, что обр. 11, взятый из малоизмененных кристаллотуфов, не соответствует по своим свойствам указанным выше индикаторам. То же самое надо сказать про образцы 16, 17, 18, 22. В этих породах рудные тела выклиниваются.

Физико-механические индикаторы, указывающие на близость залегания рудных тел, при благоприятных геологических предпосылках могут иметь практическую ценность для поисково-разведочных работ.

В настоящее время можно сослаться на пример разведки данного месторождения, где на основании физических индикаторов

Номер скважины	Номер образца	Порода	Глубина, взятия образцов, м	Пористость, %		Относительная пористость, %	Усадка при сжатии, %	Модуль упругости монолита $E \cdot 10^3$, кгс/см ²	Относительная напруга при $\lambda \cdot 10^3$, кгс/см ²
				монолита	скало порошка				
10	9	Порфирит, сильно измененный вторичными процессами	32,8	3,8	10,2	3,0	36,0	4,5	1,5
	13	Порфирит	41,8	3,5	12,5	4,0	33,0	5,2	2,0
	15	Порфирит, измененный вторичными процессами (карбонатизированный, серицизированный)	46,9	7,0	12,0	1,8	38,0	4,0	0,6
	18	Кварцевый порфир, сильно измененный вторичными процессами	55,5	6,5	10,5	1,1	37,8	2,1	0,5
11	2	Кристаллотуфы	11,0	4,5	11,0	2,8	37,5	4,5	1,2
	3	Кристаллотуфы с вкрапленностью галенита и пирита	11,5	6,0	12,0	1,8	35,0	4,4	0,8
	7	То же	42	10,2	9,0	0,8	41,0	3,5	0,4
	24	Порфирит	44,5	1,5	12,0	6,0	34,0	5,0	4,0
	9	Кристаллотуфы	47,5	5,5	6,5	1,1	41,0	3,8	0,7
	11	»	61,5	3,0	12,5	4,0	33,5	4,2	1,5
	13	Кристаллотуфы измененные	68,5	4,5	6,5	1,5	41,0	4,1	0,9
	14	»	70,3	4,8	9,0	1,8	38,0	4,0	0,8
	23	Доломит	72,0	1,0	5,0	6,0	38,0	5,5	4,0
	15	Кристаллотуфы	73,5	5,0	9,0	2,1	37,5	3,5	0,8
	16	Кварцевый порфир	81,9	2,0	9,0	5,0	34,5	5,0	3,0
	17	»	89,5	2,5	8,0	3,0	37,0	4,5	1,7
	18	Порфирит	92,5	1,5	10,5	6,0	36,5	5,0	4,0
	22	»	107,0	1,0	6,0	7,0	38,0	5,2	4,0

измененных пород высказывались предположения о возможной близости залегания рудного тела в первой зоне гидротермально измененных раздробленных кристаллотуфов (обр. 2 и 3), во второй и третьей зонах пород (обр. 7, 9, 13, 14, 15), пересеченных скв. 11.

Последующие работы на месторождении (скв. 17) подтвердили наличие этих зон на глубине и обнаружили в них рудные тела (см. рис. 21).

Таким образом, физико-механические свойства измененных пород (гранитов), установленные по молибденовым месторождениям, применимы для характеристики измененных эффузивов типа порфиритов, кварцевых порфиров и их туфов.

Северо-Акатувское месторождение. В геологическом строении Акатувского рудного поля принимают участие породы нижнего палеозоя, которые расположены в виде полосы, вытянутой в северо-восточном направлении и представленной

переслаиванием известняков, алевролитов, глинистых и углисто-глинистых сланцев. К этой полосе нижнепалеозойских пород и приурочены почти все рудные тела месторождения.

На юго-востоке породы нижнего палеозоя прорваны варисскими гранитоидами; на северо-западе — несогласно перекрыты кластическими образованиями нижней и средней юры; на юго-западе —

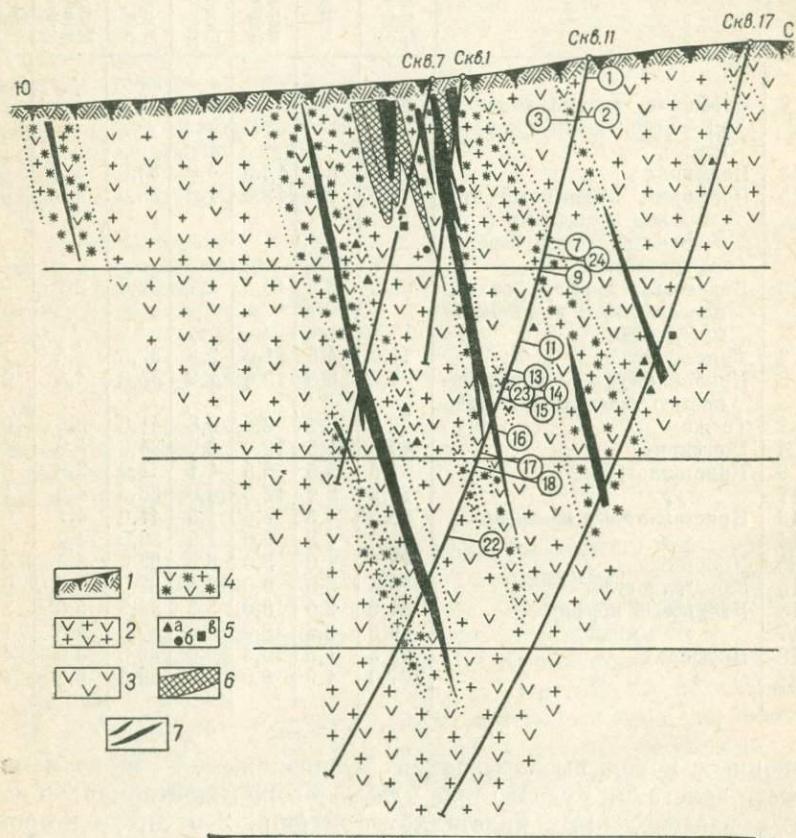


Рис. 21. Геологический разрез по профилю VII

1 — почвенно-растительный слой, делювий; 2 — кристаллотуфы; 3 — диоритовые порфириты; 4 — гидротермально измененные кристаллотуфы; 5 — вкрапленность галенита (а), сфалерита (б), пирита (в); 6 — бедное сульфидное оруденение; 7 — рудные тела (на этом и следующих рисунках цифры в кружках — номера образцов)

перекрываются породами среднего палеозоя, несколько севернее которых располагается шток киммерийских граносиенит-порфиров. Широко распространены по всей площади дайки и небольшие штоки диоритовых порфиров.

Акатуевское рудное поле вмещает около 20 рудных тел и зон, которые имеют форму груб, гнезд, штокообразных охристо-лимонитовых тел. Некоторые рудные тела приурочены к зонам дробления,

другие расположены на контакте известняков со сланцами, часть рудоносных горизонтов примыкает к контактам известняков с граносиенит-порфирами. Истинная мощность рудных тел иногда достигает 21 м.

Минералогический состав первичных руд разнообразен и представлен главным образом галенитом, пиритом, сфалеритом, буланжеритом, арсенопиритом и др. В некоторых рудных телах руды окислены до глубины 50—200 м. Они представлены церусситом, смитсонитом и др.

В генетическом отношении намечается пространственная связь оруденения с малыми интрузиями граносиенит-порфиров послепермского возраста. Предполагается, что эти интрузии и оруденение являются производными одной и той же глубоко залегающей интрузии. По данным исследователей, Северо-Акатуевское месторождение относится к мезотермальному типу.

Известно, что на Акатуевском рудном поле каротажные работы дали положительные результаты (по работам геофизической экспедиции Читинского ГУ).

Благодаря определенным значениям электросопротивления и радиоактивности появилась возможность выразительно и четко выделить рудные горизонты и вмещающие их породы (рис. 22). Для доказательства можно сослаться на следующие данные.

Мраморизованные и доломитизированные известняки отличаются высоким электросопротивлением, значения которого изменяются в пределах 4000—16 000 ом·м. Скарнированные их разности, напротив, обладают гораздо меньшим сопротивлением (в среднем около 250 ом·м), что можно объяснить трещиноватостью и пиритизацией. Они к тому же имеют относительно повышенную радиоактивность.

Сульфидные руды и углисто-глинистые сланцы по своим электрическим свойствам имеют много общего. В частности, значения сопротивления сульфидной руды колеблются в пределах 1—100 ом·м, а углисто-глинистых сланцев 10—1000 ом·м. Аналогичными данными характеризуются они и по величине потенциала естественного поля.

Разделение сульфидных руд и углисто-глинистых сланцев производится радиоактивным каротажем. Первые, как правило, слабоактивные, вторые отличаются повышенной активностью, достигающей 20—30 ед. и более. Окисленные руды, представляющие охристо-глинистый материал, являются проводящими (50—500 ом·м); их активность составляет 5—19 ед.

Среди изверженных пород (порфиры, граносиенит-порфиры, граниты), встречающихся на месторождениях Акатуевского рудного поля, только граниты обладают высоким сопротивлением (6000—11 000 ом·м); остальные же являются более электропроводными, что, по-видимому, вызвано их сильно измененным состоянием. Например, сопротивление порфиритов составляет 200—3000 ом·м. Радиоактивность изверженных пород повышенная и колеблется

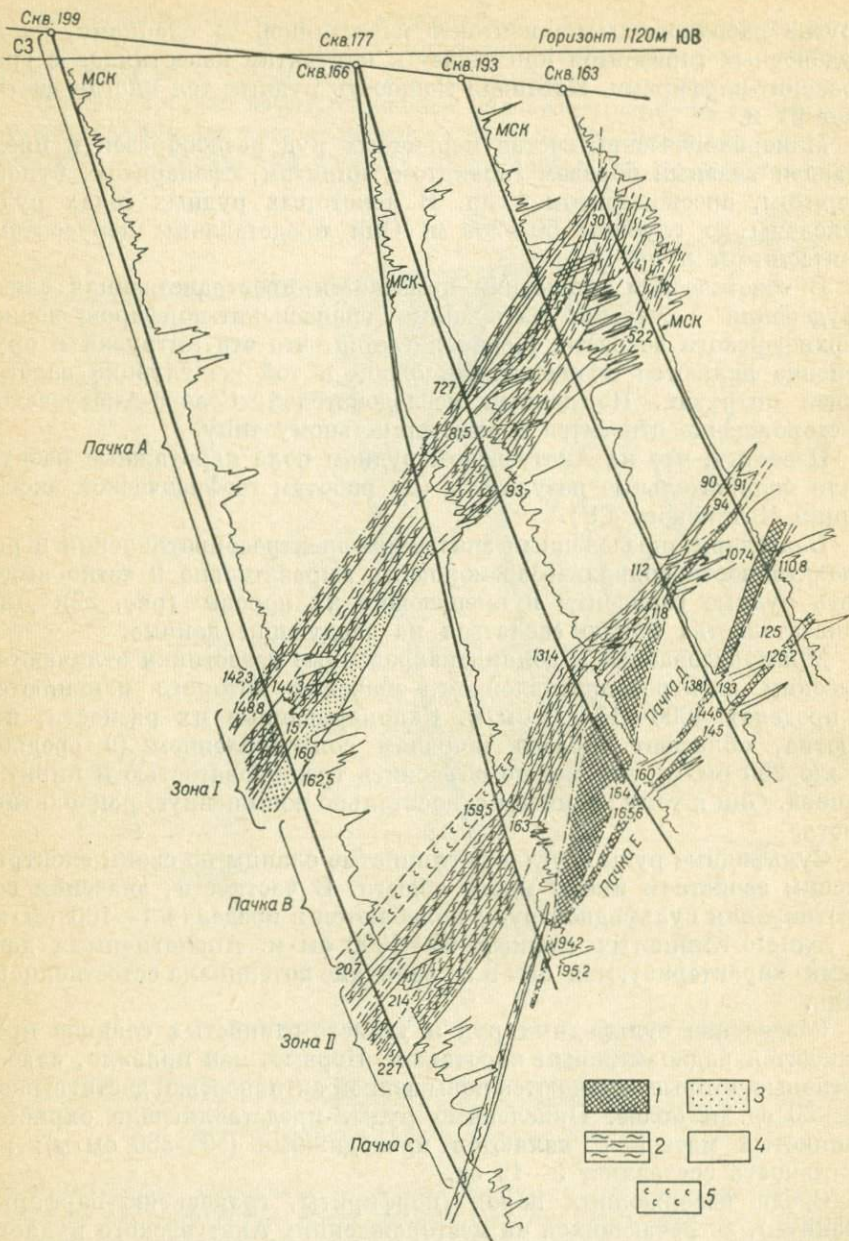


Рис. 22. Геологический разрез по профилю IX. (Составлен по данным буровых скважин и каротажа)

1 — сульфидная руда; 2 — углисто-глинистые сланцы; 3 — зона дробления; 4 — известняки; 5 — скарны; А — покрывающие известняки; В — нижележащие известняки; С — подстилающие сланцы; Д — известняки, залегающие между рудными телами; Е — известняки, подстилающие рудное тело; Зона I — сланцы, удаленные от рудного тела; Зона II — сланцы околорудные

в пределах 12—24 ед. Естественное электрическое поле магматических, равно как и карбонатных, пород нормальное.

Трециноватость и дробление пород обычно сопровождаются повышением электрической проводимости, не вызывая при этом каких-либо заметных колебаний естественного поля и радиоактивности. Окварцевание пород, которое повсеместно распространено на месторождениях Акатуевского рудного поля в виде мелких прожилков, гнезд, участков, приуроченных к трециноватым зонам, вмещающим рудные тела, геофизическими методами отмечается нечетко. Однако замечено, что окварцованные карбонатные породы во многих случаях характеризуются возрастанием электрического сопротивления.

В одной из своих работ [35] С. С. Смирнов указывал на то важное обстоятельство, что большинство полиметаллических месторождений нерчинско-заводской группы приурочено к контактными зонам карбонатных пород со сланцами. На границе этих двух пород, различно реагирующих на складчатость, по его мнению, осуществляются наиболее благоприятные условия для развития смятых трециноватых зон. Это замечание можно отнести ко всему Акатуевскому рудному полю.

Подтверждение этому можно видеть на некоторых профилях каротажных работ (см. рис. 22).

По мнению геологов, изучавших месторождение, в его образовании существенное значение имели следующие факторы: зоны тектонических разломов, пересекающие карбонатно-сланцевую толщу рудного поля в северо-восточном направлении; трециноватость пород; литологический состав и контакты разных по составу пород, а также мелкая складчатость.

Мелкая складчатость сказывалась также при формировании рудных тел и обусловила в сочетании с контактами пород различного состава и трециноватостью довольно неправильную их форму с ответвлениями, прожилками и раздувами.

В образовании некоторых рудных тел этого месторождения принимали, вероятно, участие и структуры отслоения, возникавшие без значительных послыжных подвижек.

Это предположение вполне логично, так как породы разного состава должны вести себя по-разному при их сжатии и растяжении.

Мы не можем воссоздать те условия, при которых это могло происходить, и фактически имеем дело с породами, претерпевшими длительные процессы метаморфизма. В результате этих процессов различия между породами, в том числе разного литологического состава, могли в той или в другой степени нивелироваться. Тем не менее мы попытались выяснить этот вопрос методом сжимаемости пород в раздробленном состоянии. Результаты этих исследований приведены в табл. 19.

Исследовались образцы пород из шести буровых скважин, пересекающих руду почти на всех разведочных линиях. Благодаря склонению рудного тела и различному расположению скважин

Таблица 19

Профиль	Номер скважины	Глубина отбора образца, м (интервалы)	Номер образца	Порода	Коэффициент разрыхления	Модуль упругости сыпчатого порошка $E_s \cdot 10^4$, кгс/см ²	Пористость раздробленной породы при давлении 3000 кгс/см ² , %	Усадка, %
II	107	49 50,75—51,75	9	Известняк	1,88	0,133	16,5	32
		61—81	11; 12	Руда марганцовая Известняк	1,85	0,080	13,9	34
IV	106	49 49,55—58,10	13	Известняк	2,02	0,070	10,0	43
		62	16	Лимонит Известняк	2,02	0,173	19,0	34
V	198	7—49 50,65—66	5; 6	Известняк	2,03	0,131	28,2	34
		66	7	Руда окисленная	1,89	0,092	28,6	29
		68 71—73	8	Известняк Сланец	2,09	0,088	22,5	37
		75—90	10; 11	Проявление сульфидной минерализации Известняк	1,98	0,113	9,5	41
VI	127	9—80 84	2; 3; 4; 5 7	Известняк	1,88	—	15,8	36
		84,45—86,30		Скарнированный известняк	2,0	—	5,8	44
		91 91,70—93,45	9	Вкрапленная сульфидная руда Сланец	1,85	—	18,6	36
		95—133	10; 11	Сульфидная руда Известняк	1,84	—	13,4	37
IX	166	131 135—141 145—159	12 13; 14	Известняк Сланец	1,94 2,14	0,083 0,043	23,6 23,3	31 35
		160 160,8—165,45		Сульфидная руда с про- пластком Известняк	1,95	0,088	16,0	36
		166	16; 18	Сульфидная руда Известняк	2,07	0,093	5,0	41
		220—249	22, 23, 24, 25	Известняк мраморизо- ванный	1,92	—	17,8	35
XI	256	264—275		Сульфидная руда				
		276—295	27, 28, 29, 30	Известняк скарниро- ванный	1,97	—	16,7	37

в профиле руда пересечена на разных глубинах, а следовательно, и образцы из околорудных пород, исследованные нами, получены с разных глубин.

В ходе исследований определяли коэффициент разрыхления, процент усадки раздробленной породы при сжатии, пористость и модуль упругости сжатого порошка.

Рассмотрим результаты этих исследований по каждой скважине отдельно.

Скв. 107 пересекла залегающую в известняках (окисленную) руду. Мощность рудного тела невелика. Хотя вмещающей породой является одна — известняк, тем не менее покрывающая его часть отличается от подстилающей по проценту усадки, пористости и модуля упругости.

Покрывающая часть известняков оказалась более упругой по сравнению с подстилающей. Это, в свою очередь, сказалось и на меньшей их сжимаемости. В полном соответствии с таким представлением находится и пористость сжатого порошка — более упругая часть породы оказалась более пористой.

В следующем примере, где приведены данные по скв. 106, имеет место более существенная разница между показателями испытания покрывающих и подстилающих частей породы, представленной также известняками.

Здесь покрывающие известняки характеризуются более высоким процентом усадки (43 вместо 34%), меньшим модулем упругости и меньшей пористостью по сравнению с подстилающей частью известняков.

Не менее показательны данные по скв. 198, которая пересекла довольно мощную рудную зону окисленных и первичных руд. Здесь, так же как и в предыдущих примерах, рудный горизонт находится между известняками, отличающимися по усадке, модулю упругости и пористости.

Для большей убедительности прилагаем графики изменения усадки известняков, залегающих выше и ниже руды, от давления (рис. 23). Из графика видно, что при удельном давлении до 75 кгс/см² процент усадки той и другой породы близки. Но с увеличением давления разница в усадке увеличивается и достигает максимума при 2500 кгс/см².

Характерно отметить, что большая разница в усадке пород (развилка) совпадает со сравнительно большой мощностью рудного тела, вскрытого этой скважиной (рис. 24).

Данные по скв. 127 свидетельствуют о незначительной разнице в усадке сланцев, покрывающих рудное тело, и подстилающих известняков (табл. 19), что также увязывается с небольшой мощностью рудного тела, залегающего между ними (рис. 25). Из графика сжимаемости указанных разновидностей пород (рис. 26) видно, что наибольшее расхождение в усадке пород наблюдается при давлении в пределах до 1080 кгс/см². При более высоком давлении разница в степени сжимаемости пород уменьшается.

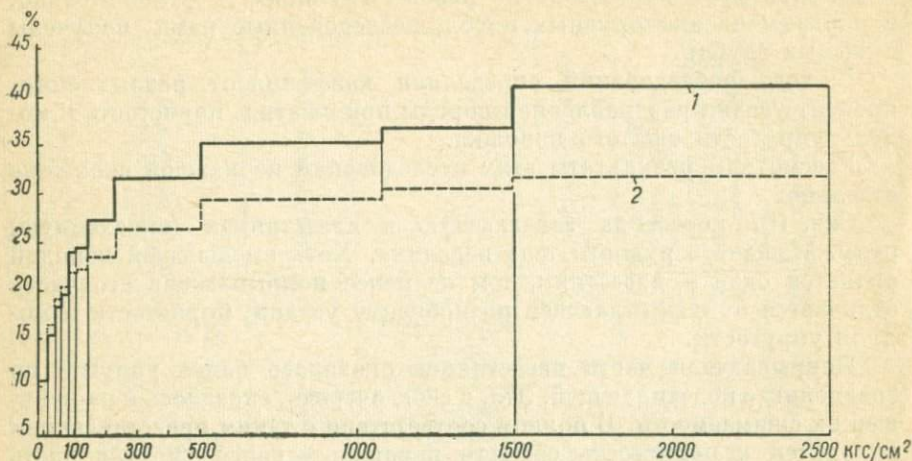


Рис. 23. Зависимость изменения усадки раздробленных пород от давления
1 — усадка известняков; 2 — усадка кремнистых известняков

Таблица 20

Пачки и зоны	Порода	Количество измеренных образцов	Физико-механические свойства образцов				
			в раздробленном состоянии		в массиве		
			процент усадки	гистерезис, %	модуль упругости $E \cdot 10^4$, кгс/см ²	прочность на скалывание, кгс/см ²	пористость, %
A	Измененные известняки	51	37,8	4,6	5,65	86,0	3,4
I	Сланцы	14	40,3	6,7	6,36	115	3,7
B	Известняки измененные	35	39,4	4,8	6,76	83	3,7
II	Сланцы	25	41,1	5,2	5,21	89	4,5
C	Известняки измененные между сланцами и рудой	15	37,9	4,5	6,03	68	2,5
D	Измененные известняки между рудами	6	34,6	5,5	5,20	50	7,6
E	Измененные известняки ниже руды	18	38,0	4,5	5,96	69	2,9

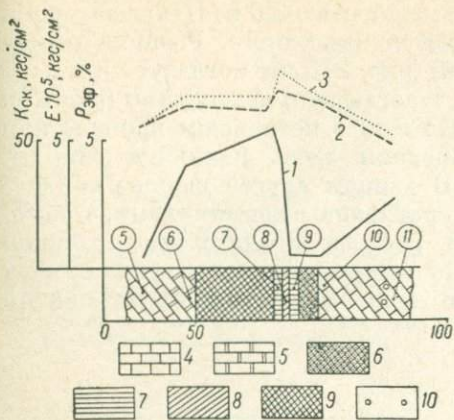


Рис. 24. Физико-механические свойства околорудных пород по скв. 198

1 — эффективная пористость; 2 — механическая прочность на скалывание; 3 — модуль упругости; 4 — известняк тремолитизированный слабоокремленный; 5 — известняк окремленный; 6 — сульфидная руда (галенит, сфалерит, пирит, арсенопирит); 7 — известняк; 8 — сланец глинисто-углистый ожелезненный; 9 — окисленные руды с обломками оруденелых сланцев и остатками первичной руды (галенита); 10 — пиритизация

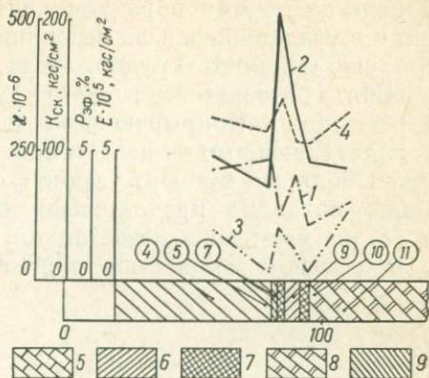


Рис. 25. Физико-механические свойства измененных (околорудных) пород по скв. 127

1 — эффективная пористость; 2 — механическая прочность на скалывание; 3 — магнитная восприимчивость; 4 — модуль упругости; 5 — известняк; 6 — чередование глинисто-углистых сланцев с известняками; 7 — сульфидная руда (пирит, галенит, сфалерит); 8 — известняк полочатый, местами скарнированный и окремленный; 9 — скарнированный известняк ожелезненный, трещиноватый, переслаивающийся с рыхлыми отложениями — сланцами

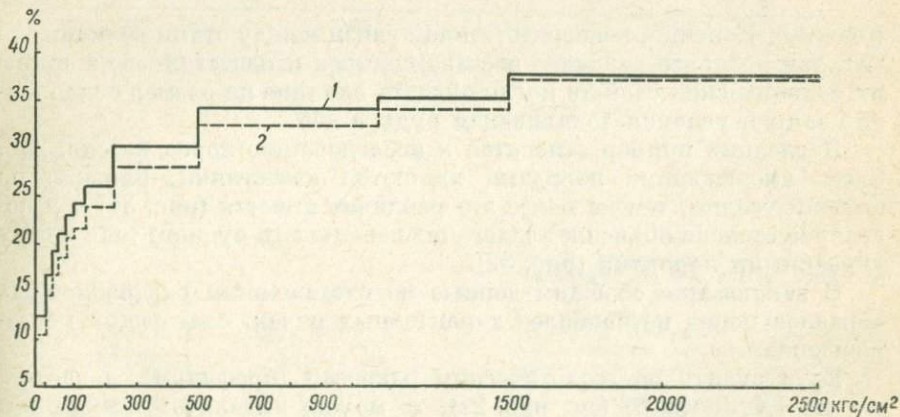


Рис. 26. Зависимость изменения усадки раздробленных пород от давления (средние данные по скв. 127)

1 — усадка известняков; 2 — усадка сланцев с прослоями известняков

Скв. 163 пересекла рудное тело мощностью 2,0 м. Покрывающими и подстилающими породами являются известняки. Разница между ними в усадке оказалась небольшой (рис. 27), что согласуется и с небольшой мощностью рудного тела, залегающего между ними (рис. 28).

Скв. 166 пересечено одно рудное тело с небольшим пропластком известняков. Покрывающими породами здесь являются сланцы, а подстилающими — известняки. В данном случае сланцы обнаружили большой процент усадки по сравнению с известняками, что особенно наглядно представлено на рис. 29. Значительная разница в усадке сланцев и известняков до некоторой степени увязывается и с большой мощностью рудного тела, пересеченного скважиной

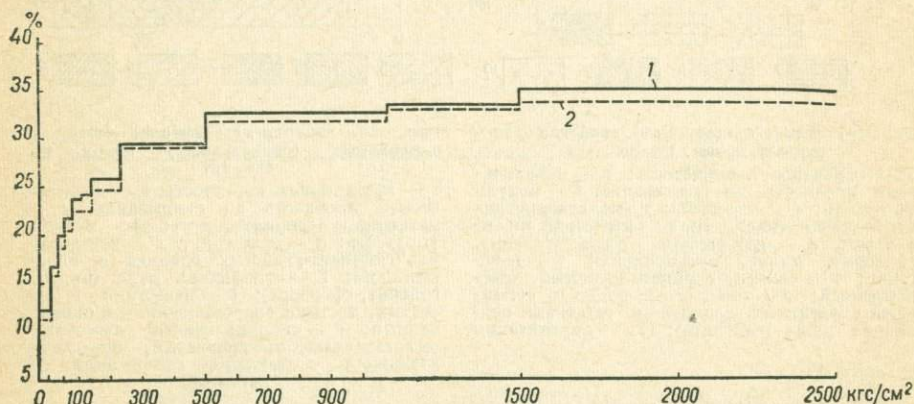


Рис. 27. Зависимость изменения усадки раздробленных пород от давления (средние данные по скв. 163)

1 — усадка известняков; 2 — усадка окремненных известняков

(рис. 30). Конечно, непосредственной связи между этими величинами нет, тем не менее различие состава сланцев и известняков, а также их механических свойств могли оказать влияние на размер ослабленной зоны и условия локализации руды в ней.

Последний пример относится к исследованию пород из скв. 256. Здесь вмещающими породами являются известняки, близкие по степени усадки, тем не менее это различие имеется (рис. 31) и в некоторой степени объясняет залегание небольшого рудного тела между указанными породами (рис. 32).

В заключение обобщим данные по сжимаемости раздробленных образцов пород из наиболее характерных пачек, слагающих месторождение.

Если судить по геологическим разрезам (профилям), в частности по IX профилю (см. рис. 22), то можно выделить: известняки, покрывающие (пачка А) сланцы (зона I), известняки между сланцами (пачка В), сланцы (зона II), известняки между сланцами и рудой (пачка С), известняки между рудой (пачка Д), известняки ниже руды (пачка Е). Соответственно с этим делением нами исследованы физи-

Рис. 28. Физико-механические свойства измененных (околорудных) пород по скв. 163

1 — эффективная пористость; 2 — механическая прочность на скалывание; 3 — магнитная восприимчивость; 4 — роговик пиритизированный; 5 — руда свинцово-цинковая; 6 — известняк; 7 — известняк окремненный, тремолитизированный

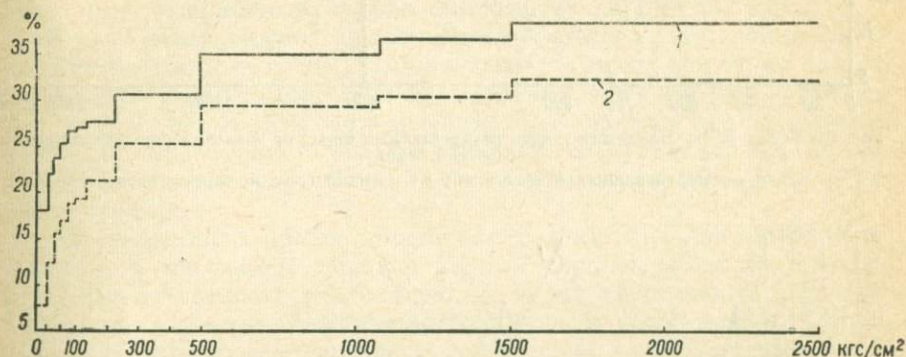
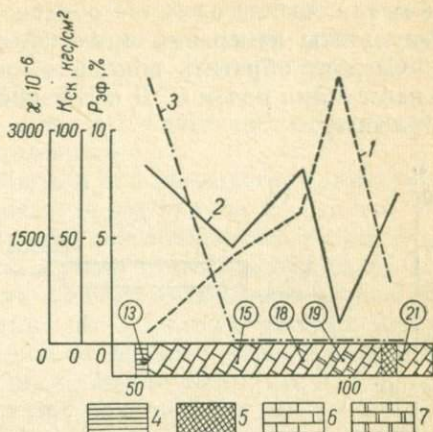


Рис. 29. Зависимость изменения усадки раздробленных пород от давления (средние значения по скв. 166)

1 — усадка известняков; 2 — усадка сланцев

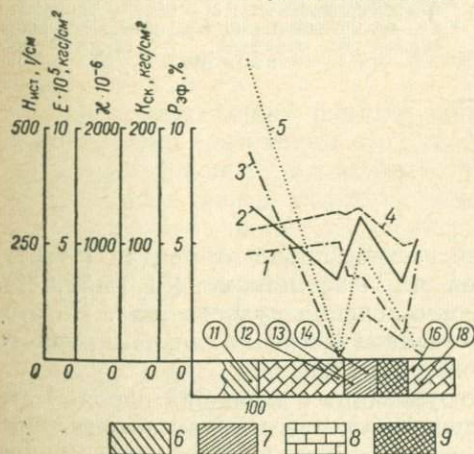


Рис. 30. Физико-механические свойства измененных (околорудных) пород по скв. 166

1 — эффективная пористость; 2 — механическая прочность на скалывание; 3 — магнитная восприимчивость; 4 — модуль упругости; 5 — твердость по методу истирания; 6 — кварциты и роговики пиритизированные; 7 — сланец углисто-глинистый пиритизированный; 8 — известняк; 9 — свинцово-цинковая руда

ко-механические свойства образцов из указанных разностей пород. Результаты измерений приведены в табл. 20.

Следует обратить внимание на то, что именно сланцы зоны II и известняки пачек С, Д и Е непосредственно примыкают к рудному горизонту.

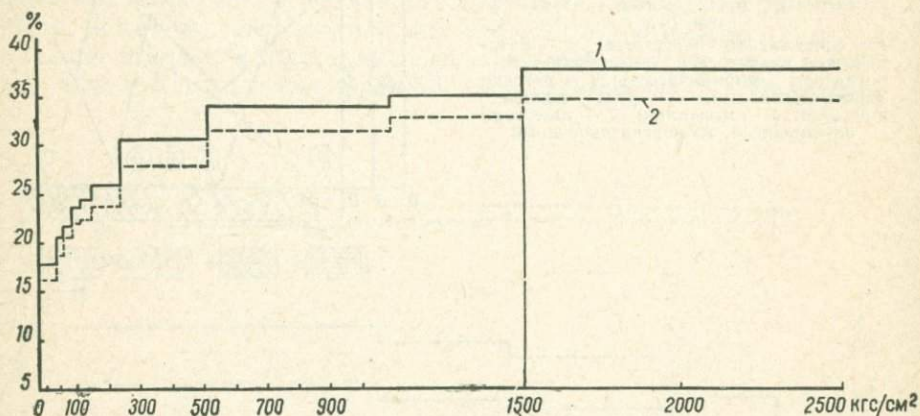


Рис. 31. Зависимость изменения усадки раздробленных пород от давления (средние значения по скв. 256)

1 — усадка мраморизованных известняков; 2 — усадка скарнированных известняков

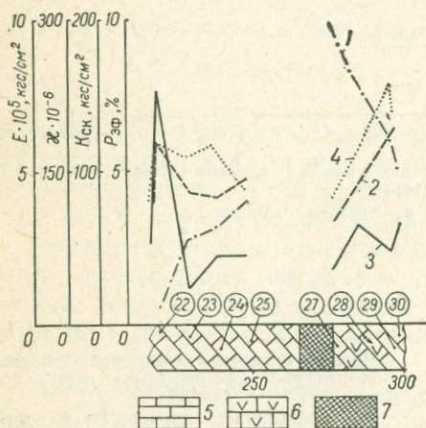


Рис. 32. Физико-механические свойства измененных (околорудных) пород по скв. 256

1 — эффективная пористость; 2 — механическая прочность на скалывание; 3 — магнитная восприимчивость; 4 — модуль упругости; 5 — мраморизованный известняк; 6 — скарнированный известняк; 7 — свинцово-цинковая руда

Сланцы зоны II имеют более высокий процент усадки (41,1%) по сравнению с подстилающими их известняками (34,6—37,9%). Это не могло не сказаться на формировании рудного тела. На это, в частности, указывает пространственное тяготение главного рудного тела к пачке сланцев зоны II (см. рис. 22).

Рассмотрим также пористость указанных разностей пород. Наименьшая пористость (2,5 %) приурочена к известнякам, залегающим между сланцами и рудой, т. е. к породам, прилегающим к рудной

зоне с висячего бока. Они могли быть естественной преградой распространения руды в этом направлении. В свою очередь наибольшая пористость (7,6%) приурочена к известнякам, залегающим между двумя рудными телами (пачка Д).

Благоприятным показателем является и более низкая механическая прочность этих пород на скалывание.

Если еще учесть малую пористость и повышенную механическую прочность (69 кгс/см²) подстилающих пород (пачка Е), то эти все факторы могут иметь большое значение для объяснения условий локализации продуктивной толщи не только с геологической, но и с точки зрения физико-механических свойств вмещающих пород.

В поисково-разведочной практике весьма важно уяснить критерии отличия метаморфических пород от первоначально осадочных. Между тем, обнаружить эти различия не всегда легко, так как в большинстве случаев перекристаллизация карбонатных пород не связана с изменением их состава и сопровождается лишь проявлением некоторых отличий структурно-текстурного характера.

В этой связи важное значение приобретают исследования физико-механических свойств рудовмещающих горных пород не только в монолите, но и в раздробленном состоянии после сжатия. В последнем случае результаты определения этих свойств будут зависеть только от вещественного состава. Поэтому следует обращать внимание на значения пористости (пустотности) раздробленных пород после сжатия.

Эти сведения в общем дополняют результаты определения пористости в массиве (в образце керна). Однако, если представить себе, что пустотность раздробленных пород после сжатия зависит в основном только от вещественного состава, то полученные числовые данные ее приобретают до некоторой степени контролирующее значение индикатора при рассмотрении геологоструктурных условий залегания околорудных пород.

В таблицах 21 и 22 приведены некоторые физико-механические свойства вмещающих пород. В них сохранено основное деление известняков и сланцев на пачки и зоны, о которых уже было сказано выше.

При сопоставлении данных табл. 21 желательно иметь породы с эталонными значениями этих свойств. Но, к сожалению, все разности известняков в той или иной степени изменены. Однако в первом приближении такими породами могут быть полосчатые известняки (составная часть пачки А), и они в этом смысле могут служить некоторым эталоном малоизмененных пород.

По данным табл. 21 отчетливо выявляются известняки пачки Д, залегающие между рудными телами, по сравнению с известняками пачек А, В, С, Е и околорудные сланцы зоны II по сравнению со сланцами зоны I, удаленных от рудного тела (табл. 22).

Если считать физико-механические свойства известняков пачки Д и сланцев зоны II за показатели, указывающие на близость рудного тела, то они приобретают значение индикаторов. Известняки пачки Д

Физические свойства	Физические свойства (индикаторы) известняков, залегающих между рудами (пачка Д)	Физические свойства известняков пачек			
		А	В	С	Е
Модуль упругости породы в образце $E \cdot 10^5$, кгс/см ²	3,8—5,96	5,3—5,96	6,01—7,39	5,5—6,18	5,58—6,23
Гистерезис породы в раздробленном состоянии после снятия нагрузки, %	4,8—6,3	3,7—5,9	3,9—5,8	4,3—10,1	2,3—6,3
Эффективная пористость породы в образце, %	5,5—12,5	1,9—2,9	2,1—4,6	2,0—2,9	1,3—9,5
Пористость (пустотность) породы в раздробленном состоянии после сжатия, %	18—28	11,8—15,9	5,2—14,1	4,3—12,9	8,2—17,9
Усадка раздробленной породы после сжатия, %	29—40,4	35,6—41,3	38,3—42,6	37,2—48,2	35—42
Магнитная восприимчивость породы $\times 10^{-6}$, ед. CGSM	95—130	69—1159	23—718	26—402	31—455
Объем породы в раздробленном состоянии после сжатия, см ³	110—134	102—127	102—115	106—144	99—119

Таблица 22

Физические свойства	Пределы числовых значений для сланцев	
	верхней пачки — удаленной (зона I)	околорудных (зона II)
Эффективная пористость образца, %	3,2—4,8	3,8—6,2
Пористость (пустотность) сжатого порошка, %	8,0—13,1	2,6—5,2
Пористость (пустотность) после разгрузки, %	18,5—22,8	12,2—14,2
Усадка, %	38,9—41,8	43,6—45,2
Модуль упругости образца $E \cdot 10^5$, кгс/см ²	5,55—6,49	5,15—6,35
Модуль упругости сжатого порошка $E_2 \cdot 10^5$, кгс/см ²	0,095—0,135	0,200—0,334
Относительная пустотность, %	2,5—2,9	0,6—1,2
Относительная упругость $\varepsilon \cdot 10^5$, кгс/см ²	41—63	16—25
Относительная напряженность образца в монолите $\lambda \cdot 10^5$, кгс/см ²	1,3—1,9	0,8—1,5
Относительная напряженность образца в раздробленном состоянии $\lambda' \cdot 10^5$, кгс/см ²	4—7	14—24

особенно отличаются по модулю упругости, пористости и пустотности и в меньшей степени — по данным усадки, объему сжатого порошка и магнитной восприимчивости.

Из табл. 22 следует, что сланцы зоны I, удаленные от рудного тела (см. рис. 22), значительно отличаются от сланцев зоны II. Это особенно отчетливо видно на рис. 33, где показатели физико-меха-

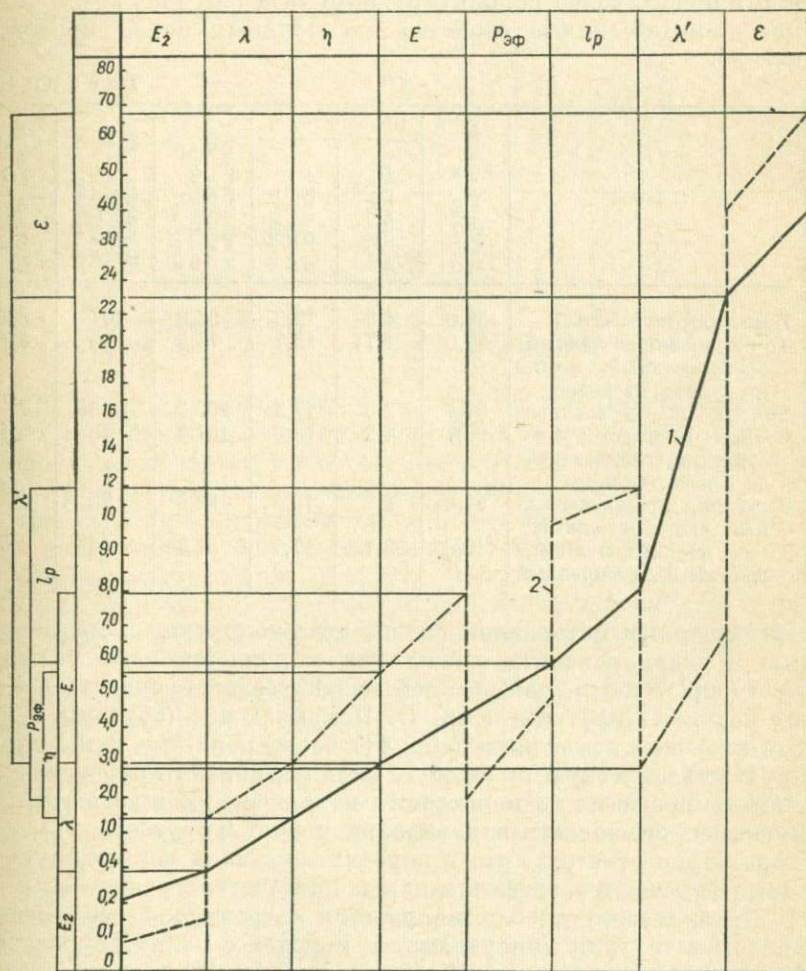


Рис. 33. Индикатриса физико-механических свойств измененных (околорудных) пород 1 — сланцы околорудные; 2 — сланцы, удаленные от рудной зоны; E_2 — модуль упругости сжатого порошка; $\lambda = \frac{E}{P_{эф}}$ — относительная напряженность образца в монолите; $\eta = \frac{l_p}{P_{эф}}$ — относительная пустотность; E — модуль упругости образца в монолите; $P_{эф}$ — эффективная пористость образца в монолите; l_p — пористость (пустотность) сжатого порошка; λ' — относительная напряженность сжатого порошка; ϵ — относительный модуль упругости

нических свойств околорудных сланцев приняты за индикаторы близости рудного тела, а их сочетание — за индикатрису.

При дальнейшем рассмотрении физико-механических свойств околорудных пород использованы данные буровых скважин 127, 163, 166, 198, 256.

Скв. 127 пересекла два рудных пропластка, являющихся ответвлениями одного более мощного рудного тела (см. рис. 25).

Физико-механические свойства околорудных пород приведены в табл. 23.

Таблица 23

Номер образца	Порода	Глубина взятия образца, м	Пористость, %		Механическая прочность на скалывание, кгс/см ²	Магнитная восприимчивость $\times 10^{-6}$ ед. CGSM	Модуль упругости $E \cdot 10^6$, кгс/см ²
			в массиве (образце)	в спрессованном порошке			
4	Известняк полосчатый	58,0	4,3	16,3	96,9	107	6,32
5	То же, мраморизованный, окварцованный, местами скарнированный	80,0	4,7	13,7	73,3	25	5,72
7	То же, скарнированный	83,7	2,5	17,3	200,3	103	7,10
9	Сланцы глинисто-углистые, переслаивающиеся с известняками	90,7	4,2	18,0	137,7	70	5,47
10	Известняк мраморизованный, скарнированный	95,05	2,2	15,5	92,6	22	5,39
11	То же, местами, скарнированный и окремненный	110,9	3,1	17,7	87,7	143	6,52

Из указанных материалов видно, что околорудные, мраморизованные и скарнированные известняки отличаются меньшей пористостью (обр. 7 и 10), повышенной механической прочностью и высоким модулем упругости (обр. 7). Покрывающие (образцы 4 и 5) и подстилающие известняки (обр. 11) более пористые и имеют невысокую механическую прочность. Сланцы, контактирующие с рудой, имеют повышенную пористость, механическую прочность, магнитную восприимчивость и невысокий модуль упругости.

Характерно отметить, что в породах, имеющих повышенную пористость, отмечаются графитизация и присутствие углистого вещества, обрамляющего дробленые участки и трещинки, заполненные кальцитом и другими минералами. В породах с малой пористостью графитизация развита в меньшей степени (обр. 10) или отсутствует совсем (обр. 7). Характеристика рассмотренных материалов дополняется рис. 25, на котором видна связь между изменением пористости, с одной стороны, и механической прочностью и модулем упругости — с другой. Причем связь обратная — породы с меньшей пористостью имеют более высокие прочность и модуль упругости.

Магнитная восприимчивость, как следует из графиков, увеличивается с удалением от продуктивной (рудной) залежи.

Скв. 163 (см. рис. 28) пересекает небольшое рудное тело, вмещающими породами которого являются измененные известняки. В некотором удалении от рудного тела залегают роговики. Физико-механические свойства указанных пород приведены в табл. 24.

Таблица 24

Номер образца	Порода	Глубина взятия образца, м	Пористость, %		Механическая прочность на скальвание, кгс/см ²	Магнитная восприимчивость $\mu \cdot 10^{-6}$ ед. СГСМ
			в массиве (в образцах)	в спрессованном порошке		
13	Роговики шпритизированные	53,1	0,4	9,0	84,9	3900
15	Известняк	73,5	4,0	16,0	44,9	49
18	То же, тремолитизированный	88,95	6,3	14,0	83,5	36
19	То же, окремненный	96,6	12,5	—	8,9	—
21	Известняк	110,65	2,6	17,3	70,1	95

Обращает внимание высокая магнитная восприимчивость роговиков по сравнению с подстилающими их известняками. Кроме того, отличительной чертой роговиков является малая пористость и повышенная механическая прочность по скальванию.

Известняки, залегающие выше руды, имеют сравнительно высокую пористость и низкую магнитную восприимчивость.

Физико-механические свойства подстилающих известняков несколько отличаются, в частности, они более плотные. Об этом свидетельствует меньшая пористость и повышенная механическая прочность.

Из графиков (см. рис. 28), видно, что между пористостью и механической прочностью имеется обратная зависимость. Особенно отчетливо это проявилось на примере исследования роговиков и пород, прилегающих к рудному телу. Обращает внимание также график изменения магнитной восприимчивости. Оказалось, что околорудные породы характеризуются низкими значениями магнитной восприимчивости.

Скв. 166 вскрыла рудное тело в контакте с известняками (подстилающими), сланцами, известняками и кварцитами, залегающими выше рудного тела. Физико-механические свойства перечисленных горных пород приведены в табл. 25. Характер изменения этих свойств также отражен на рис. 30.

Из приведенных материалов видно, что все разности вмещающих пород обладают различными физико-механическими свойствами, за исключением значений модуля упругости, которые для известняков и сланцев близки.

Подстилающие известняки (обр. 16) в контакте с рудным телом сильно окварцованы. Количество кварца и карбоната примерно одинаково. Размер зерен кварца менее 0,01 мм. Карбонатное вещество

Номер образца	Порода	Глубина взятия образцов, м	Пористость, %		Механическая прочность по скваживанию, кгс/см ²	Магнитная восприимчивость $\times 10^{-6}$, ед. СГСМ	Модуль упругости $E \cdot 10^3$, кгс/см ²	Твердость по методу истирания 1/см
			в массиве	в спрессованном порошке				
11	Кварциты и роговики пиритизированные	93,87	4,6	20,6	135,6	1774	5,6	699
12	Известняки мраморизованные	131,35	5,1	12,7	67,1	22	6,46	23
13	Сланцы углисто-глинистые, пиритизированные (под микроскопом углисто-кварцевые сланцы)	135,75	3,6	20,3	94,6	186	6,31	67
14	То же	141,31	3,6	18,7	122,1	391	6,52	233
16	Известняки окремненные	159,85	1,1	12,7	64,2	131	4,93	79
18	То же, скарнированные	166,5	4,7	15,2	102,7	70	5,18	21

(пелитоморфное) концентрируется в мелкие кучные скопления среди кварцевого агрегата. Карбонат нескольких генераций, видны прожилки кальцита, секущие пелитоморфный карбонат. Направление прожилков самое разнообразное. Эти породы характеризуются меньшей пористостью.

Известняки (скарнированные) по данным обр. 18 существенно отличаются от описанных выше. Эта порода состоит в основном из зерен кальцита; размер зерен колеблется от 0,5 до 0,1 мм. Границы между зернами неровные до зубчатых. Кроме кальцита в породе обнаружены чешуйки мусковита и зерна реликтового пироксена. Кроме того, в шлифе обнаружен значительный участок серпентина. Эта порода более пориста. Отсутствие окремнения повысило ее механическую прочность.

Сланцы, залегающие выше руды (образцы 13 и 14), существенно отличаются от прилегающих к ним известняков. Они более прочные, имеют более высокие твердость и модуль упругости. В этом смысле эти сланцы могли служить естественной преградой распространения рудного вещества в вышележащие слои известняков.

Под микроскопом сланцы представляют собой тонкозернистую породу (размер зерен менее 0,01 мм). Вещественным составом породы являются зерна кварца и углистое (графитовое) вещество приблизительно в равных количественных соотношениях. Распределение углистых частиц в породе равномерное. В породе содержится до 30% карбоната, который с небольшим количеством пирита, серицита и альбита приурочен к прожилкам, направленным параллельно

микроросчатой текстуре. Ширина прожилков различная — от сотых долей до 2 мм.

Пирит, как правило, выделяется в форме кубов среди углесто-кварцевого агрегата или чаще приурочен к зальбандам прожилков.

Сравнительно высокие прочность, твердость и упругие свойства сланцев могут быть объяснены мелкокристаллической структурой и существенно кварцевым составом, а высокая пористость (3,6%) — сланцеватой текстурой и наличием открытых трещин в породе.

Известняки, залегающие в контакте со сланцами (обр. 12), являются менее твердыми и прочными породами, что отчасти может быть объяснено высокой пористостью (5,1%). Судя по микроскопическому описанию, порода сильно изменена, имеются участки перетертых минералов (кальцита и др.). В породе обнаружены (5—7%) скопления псевдоморфоз талька и реже серпентина по оливиному. Встречены единичные зерна апатита. Порода сечется тонкими прожилками кальцита. Выше по разрезу залегают кварциты и роговики (обр. 11). Они обнаружили особенно высокие твердость, механическую прочность и магнитную восприимчивость. Характер изменения указанных физических свойств хорошо виден на рис. 30.

Физико-механические свойства окolorудных пород в общем находятся в соответствии с вещественным составом и характером их изменения (табл. 26). Подстилающие известняки (обр. 11) имеют повышенную пористость (2,6%). Скарнированные известняки в контакте с сульфидным рудным телом (образцы 9 и 10) характеризуются значительно меньшей пористостью (0,4%). Известняки из контакта с окисленными рудами (образцы 7 и 8) характеризуются высокой пористостью (4,0—5,5%). Пористость 0,8 относится к тремолитизированному (полосчатому) известняку (обр. 5), принятому нами (условно) за некоторый эталон, соответствующий менее измененным известнякам.

Повышенные значения механической прочности, скорости продольных волн и модуля упругости приурочены к подстилающим и покрывающим окolorудным известнякам. Минимальную магнитную восприимчивость имеют тремолитизированные известняки.

Физико-механические свойства окolorудных пород скв. 256 приведены в табл. 27 и на рис. 32.

Вмещающими породами рудного тела, пересеченного скважиной, являются известняки мелкозернистые, плотные, слаботрещиноватые. Судя по микроскопическому описанию, покрывающие породы (образцы 22—25) мраморизованы, доломитизированы с признаками дробления (зерна кальцита обладают резко волнистым погасанием). Границы между зернами неровные до зубчатых. Размер их от сотых долей до 1 мм, в единичных случаях до 2 мм. Мелкие зерна, вероятно, являются результатом перетирания кристаллов кальцита. К дробленным участкам приурочены тонкие частицы графита и наличие открытых трещин, которыми, в частности, можно объяснить значительную пористость пород. Подстилающая порода (образцы 27—30) микроскопически представляет собой скарнированный известняк.

Номер образца	Порода	Глубина взятия образца, м	Пористость, %		Магнитная восприимчивость $\times 10^{-6}$, ед. CGSM	Механическая прочность на скалывание, кгс/см ²	Скорость продольных волн, м/с	Модуль упругости $E \cdot 10^8$, кгс/см ²
			в массиве (в образцах)	в спрессованном порошке				
5	Известняк тремолитизированный	39,20	0,8	12,0	27	54,8	4554	5,47
6	То же, окремненный	48,7	4,0	13,9	115	66,8	4984	6,51
7	Известняк	66,4	5,5	15,3	97	66,9	3829	3,78
8	Сланец глинисто-углистый	68,0	4,3	14,5	77	76,1	4186	4,62
9	Известняк	69,75	0,4	—	—	—	—	—
10	То же, с включением галенита, местами окремненный	75,15	0,4	14,2	63	67,3	4867	6,44
11	То же, тремолитизированный, пиритизированный, участками дробленый	91	2,6	12,2	111	51,9	4286	4,81

Таблица 27

Номер образца	Глубина взятия образца, м	Пористость, %		Механическая прочность по скалыванию, кгс/см ²	Магнитная восприимчивость $\times 10^{-6}$, ед. CGSM	Модуль упругости $E \cdot 10^8$, кгс/см ²
		в массиве (в образце)	в спрессованном порошке			
22	219,6	0,4	15,3	119,1	230	6,07
23	229,75	2,6	13,6	87,4	35	5,60
24	239,05	3,3	13,8	84,3	66	5,87
25	249,6	4,0	15,0	95,7	67	4,41
27	276,15	9,9	14,5	65,6	56	4,06
28	285,10	8,0	18,0	94,2	97	5,52
29	295,85	6,1	7,9	128,9	73	7,80
30	296,85	5,2	20,4	129,6	100	5,01

В шлифе видно послойное чередование пироксена и карбоната, придающих породе грубослоистую структуру.

Сравнивая петрографическое описание окolorудных пород с показателями их физико-механических свойств, необходимо обратить внимание на характер графиков пористости (см. рис. 32). С приближением к контакту с рудой пористость увеличивается, а механическая прочность пород уменьшается. То же самое можно сказать о характере изменения модуля упругости.

Магнитная восприимчивость в общем уменьшается с приближением к рудному телу.

В итоге рассмотренных материалов приведем количественную характеристику известняков и углисто-глинистых сланцев, примыкающих к рудным телам одного из главных участков Северо-Акатуевского месторождения, сравнив их со значениями физико-механических свойств околорудных гранитов из молибденовых месторождений и порфиритов из Козулинского свинцово-цинкового месторождения (табл. 28).

Таблица 28

Физико-механические свойства	Изверженные породы		Осадочные породы		
	интрузивные (граниты)	эффузивные (порфириты)	известняки	сланцы	
В монолите	Удельный вес, г/см ³	2,64—2,90	2,76—2,86	2,73—3,02	2,76—3,12
	Объемный вес, г/см ³	2,50—2,75	2,49—2,64	2,54—2,86	2,64—3,04
	Эффективная пористость, %	4,12—9,35	5,40—10,4	5,50—12,5	3,80—6,20
	Механическая прочность на скальвание, кгс/см ²	37—82	61—83	63—103	76—200
	Твердость по методу истирания, 1/см	137—568	26—92	8—435	42—381
	Скорость распространения продольных волн, м/сек	3136—3347	3110—3495	3829—5340	4186—4850
	Магнитная восприимчивость $\times 10^{-6}$, ед. CGSM	0—321	182—492	109—316	73—121
	Модуль упругости $E \cdot 10^5$, кгс/см ²	2,70—4,06	2,47—3,22	3,88—6,07	5,15—6,35
	Относительная напряженность $\lambda \cdot 10^5$, кгс/см ²	0,3—1,0	0,26—0,59	0,4—8,0	1,1—2,8
	В раздробленном состоянии	Пористость (пустотность) после сжатия, %	2,15—10,1	6,4—11,6	18,0—28,0
Пористость (пустотность) после разгрузки, %		6,55—17,8	14,0—16,5	12,7—18,9	14,5—18,7
Усадка, %		34—41,6	37,2—42,8	29,0—41,9	32,6—44,0
Модуль упругости $E_2 \cdot 10^5$, кгс/см ²		0,14—0,19	0,095—0,163	0,059—0,112	0,041—0,204
Относительная пустотность, %		0,23—2,0	0,9—1,6	1,4—16,9	3,2—6,5
Относительная напряженность $\lambda' \cdot 10^5$, кгс/см ²		7—28	6—11	4—18	3—35
Относительная упругость $\epsilon \cdot 10^5$, кгс/см ²		14—27	17—26	39—91	34—159
Объемная сжимаемость, %		93,2—109,5	99,9—103,1	108,2—145,2	68—141,3
Коэффициент разрыхления		1,59—1,66	1,61—1,77	1,80—2,08	1,85—2,15

Следует отметить близость значений пористости пород в монолите. Для околорудных изверженных пород она изменяется от 4—5 до 9—10%, а для осадочных — от 4 до 12,5%.

Механическая прочность пород на скалывание отличается лишь верхним пределом, который у известняков и сланцев выше.

Следует также отметить близкие значения объемной сжимаемости, усадки при сжатии и пористости (пустотности) пород после разгрузки, а также невысокую, близкую по значениям для всех пород магнитную восприимчивость.

Другие показатели (скорость продольных волн, динамический модуль упругости, относительная упругость) выше у известняков и сланцев.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Метод изучения горных пород в раздробленном состоянии после сжатия нашел конкретное применение при исследовании околорудных пород данного месторождения. Особенно показательна в этом отношении сжимаемость горных пород в зависимости от их состава и упругих характеристик.

Известняки, вмещающие рудные тела (скважины 107, 106, 198), несмотря на близкий вещественный состав, имеют различные упругие характеристики и различную сжимаемость. Например, сжимаемость покрывающих известняков (скв. 106) имеет более высокий процент усадки по сравнению с подстилающими, меньшие модуль упругости после сжатия и пористость.

Характерно отметить, что наибольшая разница в усадке совпадает с большей мощностью рудных тел. Вмещающие породы (известняки и сланцы) двух рудных тел, пересеченных скв. 127, обладают различной сжимаемостью, при этом сланцы имеют наибольшую усадку. Разница между объемной сжимаемостью сланцев, покрывающих рудное тело, и подстилающими известняками невелика, что увязывается с небольшой мощностью рудных тел.

2. Различная сжимаемость вмещающих (покрывающих и подстилающих рудные тела) горных пород указывает на возможность образования структур отслоения и ослабленных зон как благоприятных условий для локализации оруденения.

3. Обращает внимание повышенное значение пустотности скарированных и дробленых известняков, залегающих в зоне контактов с рудными телами. Обратная картина наблюдается в околорудных сланцах.

4. Отмечен фактор тесной связи пространственного положения рудного тела с пористостью подстилающих и покрывающих горных пород.

5. Околорудные породы (известняки и сланцы) данного месторождения по целому ряду параметров физико-механических свойств (например, пористость в монолите) близки к околорудным породам (гранитам, порфирирам) молибденового и свинцово-цинкового месторождений.

Месторождение меди

Согласно данным геологов, изучавших Шамлугское месторождение меди (С. У. Вартанян), оно приурочено к области развития вулканогенных пород юры, мела и эоцена. В этом комплексе пород выделяются (сверху вниз): песчаники, альбитофиры, кератофиры и их брекчии, вулканические брекчии порфиритов, порфиры андезитового и дацитового состава (рис. 34).

Наиболее богатые медноколчеданные залежи неправильной формы залегают в кератофирах и их брекчиях. В нижележащих породах (в туфобрекчиях порфиритов) оруденение представлено жилами и линзообразными телами небольших размеров.

В связи с избирательным характером оруденения возникла необходимость изучения физико-механических свойств вмещающих горных пород и установления их влияния на локализацию оруденения.

С этой целью определены удельный и объемный вес, эффективная пористость, водопоглощение, твердость, магнитная восприимчивость, скорость распространения продольных волн. В ходе исследований также определялось акустическое сопротивление.

В табл. 29 приведены результаты определения указанных выше физико-механических свойств песчаников, альбитофиров, кератофиров, рудной брекчии кератофиров, вулканических брекчий порфиритов и порфиритовой брекчии. Из таблицы видно, что покрывающие альбитофиры имеют невысокие пористость, водонасыщение и сравнительно высокую скорость продольных волн, акустическое сопротивление и твердость по методу истирания. Кератофиры, вмещающие рудные тела, отличаются наиболее высокими пористостью и водонасыщением. Акустические свойства и твердость их невысоки. В этом смысле кератофиры являются благоприятной средой для локализации оруденения. Вулканические брекчии порфиритов, включающие прожилковый тип оруденения, значительно отличаются от кератофиров. Они менее пористые и имеют повышенные значения твердости и удельного акустического сопротивления.

Эти данные находятся в некотором соответствии с характером оруденения и ограниченными размерами рудовмещающих жил и линзообразных тел.

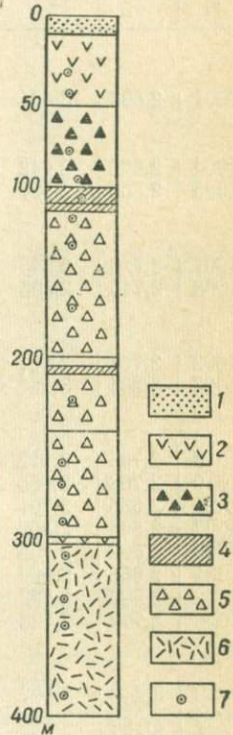


Рис. 34. Геологический разрез месторождения меди (по скв. 204)

1 — песчаники; 2 — альбитофиры; 3 — кварцевые кератофиры; 4 — рудное тело; 5 — вулканические брекчии порфиритов; 6 — порфиритовая брекчия; 7 — место взятия образцов

Номер образца	Удельный вес, г/см ³	Объемный вес, г/см ³	Эффективная пористость, %	Водонасыщенность, %	Скорость продольных волн, м/с	Магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^{-4}$ ед. СГСМ	Твердость по методу Истриани, 1/см	Акустическое сопротивление, гс/см ² ·с
<i>Песчаники</i>								
1001	2,693	2,624	2,56	0,903	3448	4	181	9,05
<i>Альбитофиры</i>								
1004	2,682	2,642	1,49	0,675	3322	0,6	166	8,77
1005	2,666	2,597	2,59	0,932	3551	2	356	9,22
<i>Кератофиры</i>								
1007	2,720	2,545	6,43	2,720	2621	1	66	6,65
1008	2,713	2,505	7,67	—	—	—	—	—
<i>Рудные брекчии кератофирос</i>								
1002	2,707	2,607	3,69	1,891	3577	4	491	9,33
1023	3,234	3,164	2,16	1,275	3256	1,5	556	10,30
<i>Вулканические брекчии порфиров</i>								
1013	2,734	2,612	4,46	1,668	3174	3	386	8,29
1019	2,763	2,685	2,92	1,002	2995	7	308	8,02
1025	2,835	2,761	2,61	0,999	3222	4	792	8,89
1027	2,864	2,809	1,92	0,877	3249	5	157	9,13
1029	2,802	2,708	3,35	1,325	3164	2	745	8,57
1031	2,955	2,896	2,00	0,862	3387	6	335	9,72
1032	2,806	2,723	2,96	0,934	3224	11	128	8,77
1036	2,779	2,728	1,83	0,649	3430	4	164	9,36
<i>Порфиритовые брекчии</i>								
1038	3,448	3,397	1,77	0,266	3549	4	264	11,99
1044	2,758	2,706	1,88	0,757	3276	5,5	785	9,35
1050	2,724	2,667	2,09	0,768	3488	3,5	371	9,30
1054	2,749	2,700	1,78	0,992	3542	13	240	9,56

Физико-механические свойства рудной кератофировой брекчии характеризуются более низкими пористостью и водонасыщением по сравнению с кератофирами. Это связано с процессами оруденения, при которых поровые пространства и открытые трещины могли быть залечены и заполнены рудой. Об этом также свидетельствуют высокая твердость и повышенные значения акустических свойств.

Дополнительным материалом, подтверждающим выявленные закономерности, могут служить результаты определения физико-механических свойств пород по образцам, отобраным из подземных горных выработок.

Из полученных данных (табл. 30) следует, что альбитофиры имеют минимальные значения пористости (1,54%) и водопоглощения (0,748%) и сравнительно высокие акустические свойства (скорость

Номер образца	Удельный вес, г/см ³	Объемный вес, г/см ³	Эффективная пористость, %	Водонасыщенность, %	Твердость по методу истирания, 1/см	Скорость продольных волн, м/с	Акустическое сопротивление, гс/см ² ·с
<i>Альбитофиры</i>							
1	2,681	2,635	1,71	0,828	118	4779	12,57
2	2,719	2,683	1,32	1,065	114	4497	12,05
3	2,707	2,662	1,66	0,402	163	4017	11,17
4	2,725	2,691	1,25	0,632	134	4675	12,57
5	2,719	2,671	1,76	0,814	98	4488	12,98
<i>Кератофиры и их брекчи</i>							
6	2,741	2,514	8,28	3,097	56	3671	9,22
7	2,721	2,560	5,92	2,784	60	3890	9,92
8	2,769	2,562	7,47	2,157	90	3804	9,76
9	2,702	2,497	7,59	2,545	63	3692	9,20
10	2,852	2,774	2,73	1,688	82	4278	11,85
<i>Туфобрекчи порфиритов</i>							
842	2,710	2,604	3,91	1,366	106	3910	10,24
849	2,757	2,688	2,50	0,808	117	3711	9,97
847	2,797	2,697	3,57	1,089	90	4040	10,89
852	2,800	2,709	3,25	1,311	69	3604	9,80
838	—	—	—	0,768	—	—	—
859	2,754	2,642	4,07	1,438	60	3513	9,28
850	2,790	2,715	2,69	1,010	—	—	—

распространения ультразвука 4491 м/с, удельное акустическое сопротивление 12,27 гс/см²·с).

В свою очередь кератофиры и кератофировые брекчи характеризуются высокими значениями пористости (6,40%) и водопоглощения (2,45%). В то же время эти породы имеют сравнительно низкие значения твердости (70) и акустических свойств. Туфобрекчи порфиритов по своим физико-механическим свойствам занимают промежуточное положение.

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Кератофиры как околорудные породы отличаются высокими пористостью и водонасыщением, малой твердостью, низким значением акустического сопротивления.

2. Вулканические брекчи порфиритов характеризуются малыми пористостью и водонасыщением, высокой твердостью и повышенным акустическим сопротивлением (8,84 гс/см²·с). Приведенные данные могут быть использованы для доказательства высоких деформационных свойств этих пород и прожилкового характера оруденения.

3. Рудные тела, залегающие в кератофировой брекчи, тяготеют к контакту двух сред (кварцевые кератофиры и вулканогенные брекчи порфиритов), значительно отличающихся по их твердости (66—376).

учитывался характер оруденения (вкрапленный и прожилковый типы), который, по мнению геологов (Н. В. Ярмолович), мог образоваться в результате различия физических и механических свойств вмещающих пород.

Песчаники софийской свиты с вкрапленным оруденением. Породы представлены кварцевым песчаником с железисто-кварцево-каолинито-серицитовым цементом и киноварью.

Песчаник более или менее равномернозернистый. Размеры его зерен в шлифе колеблются от 0,01 до 0,6 мм. Преобладают зерна размером 0,2—0,3 мм. В небольшом количестве имеется алевритовый материал. Зерна песчаника представлены более чем на 90% кварцем. В небольшом количестве среди них встречаются мусковит, кислый плагиоклаз, обломки тонкозернистой породы, циркон, лейкоксен, сфен и турмалин.

Кварц наблюдается в виде угловатых зерен, корродированных в краях. Для него характерно волнистое угасание. Встречаются зерна кварца, имеющие в скрещенных николях мозаичное строение. Зерна кварца располагаются в песчанике группами. Мусковит образует удлинённые пластинки, часто изогнутые и обычно имеющие одинаковую ориентировку. Кислый плагиоклаз имеет форму табличатых кристаллов и угловатых зерен. Он нацело серицитизирован. Циркон встречается в единичных мелких угловатых зернах и правильных кристаллах. Лейкоксен образует округлые и неправильные зерна. Сфен встречается редко. Иногда он замещается лейкоксеном. Турмалин встречается в единичных зернах.

Цемент песчаника выполняет поры и составляет примерно 30% массы породы. Среди минералов, составляющих цемент песчаника, преобладает серицит, который образует мелкочешуйчатые агрегаты; каолинит присутствует в виде мелкопластинчатых вееро- и червеобразных агрегатов.

Гидроокислы железа пропитывают агрегаты других минералов цемента, окрашивая их в бурый цвет, и образуют тонкодисперсные агрегаты ржаво-бурого цвета.

В песчанике содержится киноварь в количестве примерно от 0,1 до 1,0%. Она приурочена к цементу песчаника и образует агрегаты неправильных зерен и правильных кристаллов. Иногда киноварь замещает цемент и сама является цементом минералов, слагающих породу.

В единичных кубических кристаллах встречается окисленный пирит. Иногда он ассоциирует с киноварью.

Песчаники софийской свиты (безрудные). Породы представлены кварцевым песчаником с кварцево-хлорито-серицитовым цементом.

На общем более или менее равномернозернистом фоне породы выделяются отдельные более крупные зерна кварца размером до 1,2 мм. Преобладают зерна размером 0,2—0,4 мм. В небольшом количестве имеется алевритовый материал.

Зерна песчаника примерно на 90% представлены кварцем, около 10% приходится на долю мусковита. В небольшом количестве встречаются кислый плагиоклаз и обломки тонкозернистой породы. В единичных знаках обнаружены циркон, турмалин, лейкоксен и сфен.

Кварц наблюдается в виде угловатых зерен, часто корродированных в краях. Для него характерно волнистое угасание. Встречаются зерна кварца сильнотрещиноватые. Мусковит образует удлиненные и широкие пластинки, часто изогнутые. Пластинки мусковита большей частью имеют одинаковую ориентировку. Кислый плагиоклаз в угловатых зернах нацело серицитизирован.

Циркон встречается в единичных округлых и угловатых мелких зернах. Турмалин — в угловатых зернах и правильных кристаллах иногда с зональной окраской (желтовато-зеленой по периферии и синеватой в центральной части кристалла). Лейкоксен образует небольшие хлопьевидные скопления и отдельные угловатые зерна. Сфена мало (единичные зерна).

Цемент песчаника составляет примерно 35% его массы. По минералогическому составу он неоднороден и состоит из серицита, каолинита и мелкозернистого кварца. В незначительном количестве в нем содержатся гидроокислы железа.

Серицит имеет мелкочешуйчатые агрегаты. Каолинит мелкопластинчатый представлен в виде веерообразных агрегатов. Кварц (в виде цемента) образует аллотриоморфные зерна размером 0,001—0,01 мм. В песчанике наблюдаются пустоты неправильной формы, выполненные каолинитом. В единичных мелких зернах присутствует рудный минерал, имеющий черный цвет в проходящем и отраженном свете. Киноварь почти не встречается.

Песчаники чегарникской свиты безрудные. Породы близки по составу к безрудным песчаникам софийской свиты. Некоторым отличием их является более мелко- и равномернозернистый состав зерен минералов, слагающих породу, и отсутствие гидроокислов железа в цементе песчаников.

Песчаники чегарникской свиты южного крыла с прожилковым оруденением. Породы характеризуются известной неоднородностью. Наряду с кварцевым песчаником с железисто-кварцево-серицитовым цементом, описанным выше, встречается песчаник брекчированного строения. Брекчии состоят из угловатых обломков песчаника, аналогичного песчанику софийской свиты, а также обломков, представленных нацело окисленным пиритом.

Размеры обломков брекчии колеблются от 2 до 7 мм. Промежутки между обломками заполнены мелкоиздробленным материалом песчаника, такого же как и обломки породы, а также каолинитом и гидроокислами железа. Последние, кроме того, выполняют густую сеть трещин в обломках песчаников. Каолинит наблюдается в виде пластинчатых, вееро- и червеобразных агрегатов. Пирита много. Он образует как самостоятельные обломки в брекчии, так и скопления в об-

ломках песчаников. Часто он встречается в правильных кристаллах, имеющих в шлифе квадратные и шестигранные разрезы. Пирит нацело замещен окислами железа. В породе содержится киноварь в количестве от 2 до 15%. Она встречается в ассоциации с пиритом и в этом случае цементирует кристаллы и зерна последнего, а также наблюдается в виде редкой неравномерной вкрапленности и небольших скоплений в брекчии.

Ниже в табл. 31 приведены результаты определения физико-механических свойств образцов песчаников месторождения. Данные табл. 31 позволяют сопоставить полученные результаты применительно к выделенным группам пород, отличающихся по характеру оруденения и геологическим условиям их залегания.

Таблица 31

Номер образца	Свита	Тип оруденения	Свойства									
			Удельный вес, г/см ³	Объемный вес, г/см ³	Эффективная пористость, %	Водопоглощение, %	Скорость продольных волн, м/с	Модуль упругости $E \cdot 10^6$, кгс/см ²	Акустическое сопротивление, гс/см ² ·с	Относительная напряженность $\lambda \cdot 10^6$, кгс/см ²	Твердость по методу истирания 1/см	
4 1 2	Софийская	Вкраплен- ное ору- денение	2,79	2,63	5,60	2,13	2700	1,89	7,10	0,34	—	
			2,65	2,43	8,45	3,49	2835	1,93	6,85	0,23	—	
			2,70	2,50	8,05	2,96	3058	2,28	7,64	0,28	—	
5 10 17	Чегарник- ская	То же	2,78	2,54	8,71	3,43	2278	1,29	5,77	0,15	—	
			2,70	2,51	7,00	2,78	3065	2,31	7,70	0,33	228	
			2,74	2,54	7,38	2,93	3269	2,65	8,28	0,36	445	
12 13	Софийская	Безрудный	2,68	2,49	7,12	2,85	1926	0,91	4,77	0,13	68	
			2,62	2,40	8,42	3,50	2767	1,80	6,65	0,21	113	
3 16	Чегарник- ская	То же	2,69	2,48	8,05	3,24	1980	0,95	4,90	0,12	13	
			2,58	2,38	7,90	3,31	2584	1,57	6,15	0,20	7	
8 9 14	То же	Жильный	2,96	2,74	7,46	2,72	3371	3,12	9,24	0,42	169	
			3,37	3,01	10,60	3,54	2237	1,46	6,75	0,14	—	
			2,73	2,50	8,28	3,31	1914	0,90	4,79	0,11	6	
15 11	Софийская	Безрудный	2,56	2,31	10,00	4,35	2301	1,20	5,33	0,12	3	
			2,63	2,29	12,77	5,56	2180	1,08	5,00	0,08	18	

Песчаники софийской толщи с вкрапленным характером оруденения отличаются от безрудных песчаников этой же толщи более

высокими значениями удельного (2,71 против 2,65) и объемного (2,52 против 2,44) веса, скорости распространения продольных волн (2864 против 2346), акустического сопротивления (7,17 против 5,71), модуля упругости (2,03 против 1,35), относительного напряжения (0,28 против 0,17), несколько меньшими значениями пористости (7,36 против 7,77) и водонасыщения (2,86 против 3,17). Если обратиться к петрографической характеристике указанных пород (см. выше), то увидим, что основное их отличие заключается в составе цемента. Песчаник с вкрапленным оруденением имеет железисто-кварцево-каолинито-серицитовый цемент, а безрудный песчаник — кварцево-хлорито-серицитовый.

Главной же причиной различия значений физико-механических свойств пород указанных разностей безусловно является оруденение. Если учесть, что рудный минерал (киноварь) выполняет поровые пространства и в большинстве случаев сам является цементом, то влияние оруденения на указанные свойства станет очевидным.

Далее следует сравнить значения физико-механических свойств безрудных песчаников софийской и чегарникской толщ северного крыла. Как видно из табл. 31, эти значения близки. Объяснением этому могут служить почти одинаковый состав этих разностей песчаников и отсутствие оруденения в них.

Необходимо также сравнить результаты изучения песчаников софийской толщи с вкрапленным оруденением, залегающих на северном крыле складки, с рудоносными песчаниками южного крыла (жильный тип оруденения) чегарникской толщи. Из таблицы видно, что песчаники чегарникской толщи отличаются повышенными значениями удельного (3,02 против 2,71), объемного (2,75 против 2,52), веса, пористости (8,78 против 7,36), водонасыщения (3,19 против 2,86).

В свою очередь они обладают меньшими значениями скорости продольных волн (2507 против 2864), удельного акустического сопротивления (6,92 против 7,17), относительной напряженности (0,22 против 0,28). Приведенные значения в известной степени объясняются различием в составе пород. Чегарникская толща песчаников характеризуется неодинаковым их строением. Наряду со сравнительно однородными песчаниками, близкими по составу и структуре к песчаникам софийской толщи, встречаются брекчиевидные их разности.

Такие физические свойства, как пористость и водопоглощение, вполне увязываются с брекчиевидным строением породы.

В свою очередь угловатая форма зерен кварца, обломки пород и наличие густой сети мелких трещин могут служить объяснением меньших значений модуля упругости и акустических свойств.

Известный интерес представляют физико-механические свойства безрудных песчаников северного и южного крыльев складки, относящихся к софийской толще.

Из табл. 31 видно, что значения их физико-механических свойств практически близки между собой, за исключением пористости и коэф-

коэффициента водонасыщения, значения которых выше у песчаников южного крыла. Есть некоторые отличия и в значениях других свойств, но они незначительны, за исключением твердости, которая ниже у песчаников южного крыла. Эти отличия объясняются различным пространственным положением пород, слагающих северное и южное крылья антиклинали, тем более что породы южного крыла, судя по песчаникам чегарникской свиты, отличаются большей трещиноватостью.

Физико-механические свойства песчаников софийской и чегарникской толщ северного крыла с вкрапленным оруденением практически одинаковы.

Таким образом, из приведенных выше данных можно сделать следующие выводы:

1. Физико-механические свойства исследованных песчаников вполне увязываются с их составом и характером оруденения.

2. Песчаники софийской и чегарникской свит северного крыла с вкрапленным оруденением имеют практически одинаковые значения. Большое сходство в значениях физико-механических свойств также наблюдается и в безрудных песчаниках этих свит северного и южного крыльев.

3. Песчаники софийской свиты с вкрапленным оруденением существенно отличаются от безрудных пород этой свиты — они более плотные, с более высокими акустическими свойствами и модулем упругости.

4. Существенное различие в составе песчаников чегарникской свиты южного крыла с прожилковым оруденением отразилось и на исследованных свойствах. Они отличаются:

а) от безрудных пород этой свиты, залегающих на северном крыле, большими значениями удельного, объемного весов, скорости продольных волн, модуля упругости, удельного акустического сопротивления, коэффициента относительного напряжения, твердости;

б) от безрудных песчаников софийской свиты более высокими значениями удельного и объемного весов, скорости продольных волн, модуля упругости, твердости, удельного акустического сопротивления, относительной напряженности;

в) от песчаников софийской свиты северного крыла с вкрапленным оруденением повышенными значениями удельного и объемного весов, пористости и коэффициента водонасыщения. По другим свойствам (акустическим и механическим) они отличаются меньшими значениями. Полученные результаты можно объяснить различиями в составе и структуре пород.

5. Существующие различия между физико-механическими свойствами рудных и безрудных песчаников рассмотренных свит позволяют использовать некоторые из этих свойств (например, акустические) при поисках новых рудных участков геофизическими и другими методами.

Железорудное месторождение

Рассмотрим Тагарское месторождение, находящееся в Средне-Ангарском железорудном районе (Красноярский край).

Основной структурой района является Кадинская антиклиналь, простирающаяся в северо-западном направлении. Ядро антиклинали сложено карбонатными отложениями нижнего кембрия, а крылья — карбонатными отложениями среднего и верхнего кембрия, породами нижнего ордовика и терригенными отложениями среднего и верхнего карбона. Магматические породы представлены пластовыми интрузиями или секущими телами траппов мезозоя.

Тагарское железорудное месторождение приурочено к присводовой части Кадинской антиклинали. Основное направление месторождения северо-западное. Контролируется оно крупной зоной нарушения того же простираания.

Оруденение до глубины 100—150 м представлено зоной окисления. Первичные магнетитовые руды образуют две рудные зоны — западную и восточную. Западная рудная зона расположена в измененных карбонатных породах (кальцитифиры и магнезиальные скарны), а восточная — в кальцитифирах и в брекчии скарнированных базальтов (рис. 36).

Рудные залежи с промышленным оруденением железа локализируются в контактах различных по своим физико-механическим свойствам пород и накладываются на ореолы гидротермально измененных пород.

Одним из решающих факторов, влияющих на ход рудообразующего процесса и локализацию промышленного оруденения несомненно является структурный фактор — трещиноватость и пористость пород, определяющие степень их проницаемости.

Формирование пород и руд описываемого месторождения происходило под действием интенсивного метасоматоза, в результате которого образовались различные по составу породы — скарноподобные пироксеновые и гранат-пироксеновые породы, которые при дальнейших процессах хлоритизировались, серпентинизировались и флогопитизировались. При этих процессах происходил привнос и вынос вещества. Такую работу гидротермальные растворы могли произвести только в условиях достаточной проницаемости пород. Инфильтрационный эффект, являющийся важным признаком благоприятных условий для рудоотложения при метасоматических процессах, в основном зависит от величины пористости пород. Поэтому для выяснения дорудной анизотропии пород большой интерес представляет выявление физико-механических свойств пород и руд месторождения.

С этой целью были отобраны образцы вмещающих горных пород для определения удельного и объемного весов и эффективной пористости.

Породы, отличающиеся минеральным составом и условиями образования, имеют различия и по физико-механическим свойствам.

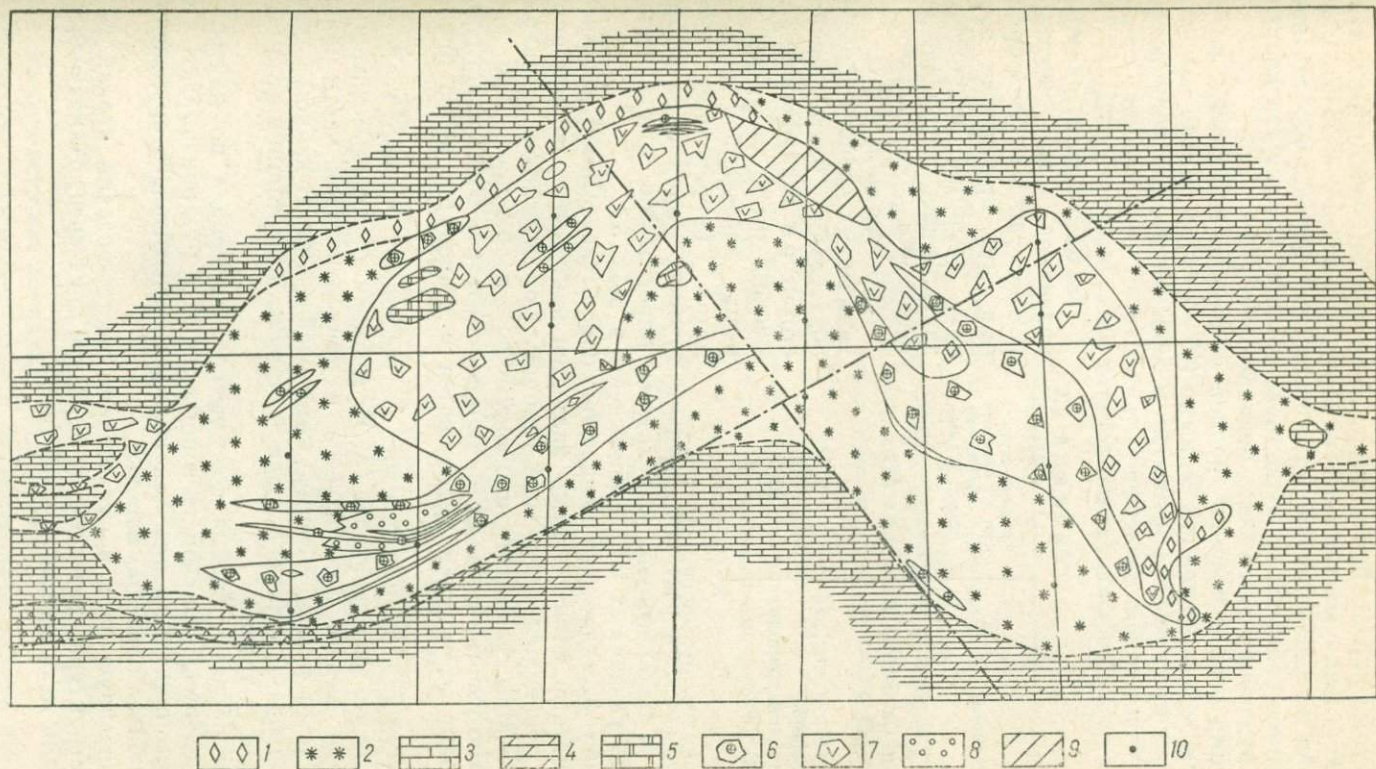


Рис. 36. Геологический план месторождения железа (по отметке +100 м)

1 — карбонатные метасоматиты; 2 — форстеритовые апоскарны и кальцитовые жилы; 3 — известняки; 4 — доломиты; 5 — известняки мраморизованные; 6 — рудная брекчия по трещинам; 7 — брекчия трещин; 8 — кальцит-хлорит-серпичитовые породы; 9 — мартиitizedованная руда; 10 — скважины, из которых отобраны образцы для определения физико-механических свойств пород

Карбонатные породы (известняки, доломитовые известняки и доломиты) характеризуются невысокой пористостью (1,43—2,43%). Скарнирование и гидротермальное изменение этих пород с образованием кальцифиров повысило их пористость до 5,5%. Однако для концентрации оруденения этого было недостаточно.

Скарнированные брекчии трапшов с пористостью 6—8% по содержанию железа являются бедными (15—20%), и только наложенные на них процессы хлоритизации и серпентинизации, сопровождающиеся отложением магнетита, способствуют образованию промышленных руд. Коэффициент пористости увеличивается до 12—17,7%.

Т а б л и ц а 32

Порода	Средние значения динамической прочности пород, т/мм
Известняки, доломиты и карбонатные метасоматиты	4,0
Форстеритовые апоскарны и кальцифиры	9,5
Рудная брекчия трапшов	40,0
Брекчия трапшов	11,1

Таким образом, одним из признаков, по которым можно судить о благоприятных для оруденения породах, является пористость, достигающая в рудовмещающих породах 17—28%.

Для выяснения роли механических свойств пород на образование благоприятных структур и локализацию оруденения были отобраны образцы известняков и доломитов, карбонатных метасоматитов, рудной брекчии, брекчии трапшов, форстеритовых апоскарнов и кальцифиров.

Результаты определения динамической прочности указанных пород приведены в табл. 32.

Из табл. 32 видно, что вмещающие породы (известняки, доломиты и карбонатные метасоматиты) являются наименее прочными породами по сравнению с брекчией трапшов. Форстеритовые апоскарны и кальцифиры занимают промежуточное положение. При этом необходимо учесть, что известняки и доломиты как более пластичные породы при деформации уплотняются и становятся менее проницаемыми.

Приведенные данные вполне подтверждают мнение геологов, изучавших это месторождение (А. Я. Архипенко), что промышленное оруденение железа локализуется в приконтактной части пород с различными физико-механическими свойствами. В данном случае такими породами являются, с одной стороны, известняки и доломиты и с другой — трапшы.

Таким образом, анализ фактического материала по изучению физико-механических свойств горных пород и руд показывает, что:

- 1) благоприятными для локализации магнетитового оруденения были наиболее пористые породы;
- 2) решающую роль в образовании месторождений играли разрывные структуры, развитые на контакте двух сред, отличающиеся различными механическими свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ближайшей задачей геологов в период девятой пятилетки будут являться поиски новых рудных тел и месторождений полезных ископаемых в районах действующих горнорудных предприятий, в связи с чем определению физико-механических свойств рудовмещающих пород в сочетании с геологическими предпосылками должно уделяться наибольшее внимание.

Исследуя физико-механические свойства горных пород (на примере некоторых рудных месторождений), авторы учитывали, что изучение этих свойств проводится в целом ряде институтов, в партиях и экспедициях геологических управлений и трестов для разрешения различных геологических задач. Приведенный литературный обзор нельзя считать полным, однако он позволил дать представление о том, что исследование физико-механических свойств горных пород производится при изучении:

— условий образования геологических структур, благоприятных для локализации оруденения;

— количественной характеристики гидротермально-метасоматических изменений рудовмещающих пород и условий локализации оруденения.

В работе изложены результаты экспериментальных работ и параметры физико-механических свойств рудовмещающих горных пород некоторых месторождений цветных, редких и других металлов.

Помимо известных методов определения физико-механических свойств горных пород, примененных при исследованиях, были разработаны новые методы анализа каменного материала для некоторого объяснения геологоструктурных условий локализации рудных тел. Одним из таких методов является изучение физико-механических свойств пород в раздробленном состоянии при сжатии. Постановка этих исследований преследовала цель выяснить возможность определения степени сжимаемости пород различного вещественного состава.

Применение метода сжимаемости горных пород в раздробленном состоянии к анализу фактических материалов по свинцово-цинковому месторождению показали следующее.

Осадочные породы различного вещественного состава имеют различную усадку при сжатии. Особенно это наблюдается на контакте

пород, разделенных рудным телом. Имеются примеры, когда значительная разница в усадке покрывающих и подстилающих соответствует большей мощности рудных тел. Конечно, здесь нельзя проводить непосредственной связи между различием в степени усадки пород при сжатии (в раздробленном состоянии) с шириной рудовмещающих полостей, тем не менее различие в составе вмещающих пород не могло не сказаться на линейных размерах рудного тела в момент его образования.

При применении этого метода анализа фактических материалов по другим месторождениям (молибденовому, полиметаллическому), залегающих в изверженных породах получены не менее характерные данные, позволяющие отчетливо различать неизменные породы от измененных вблизи рудных тел и, до некоторой степени, судить о структуре рудных тел и условиях локализации оруденения.

Эффективным методом изучения изменения физико-механических свойств горных пород является определение скорости продольных волн. Этот метод вполне оправдал себя при исследовании состояния пород под влиянием изменения температуры и водонасыщения. Опытами установлено, что скорость продольных волн позволяет отмечать появление трещин и пустот, возникающих при нагревании породы, а также степень изменения водонасыщения породы в прокаленном и непрокаленном состояниях. Этими исследованиями установлено, что, например, существенное нарушение сплошности структуры сиенита наступает при 200—300° С, гранита — при 200—400° С, песчаника — при 600—800° С, доломита — при 400—600° С.

Исследованиями также установлено, что на температуру образования трещин оказывает влияние первоначальная пористость. В породах (песчаник, доломит) с высокой пористостью (5,2—9,1%) заметные трещины образуются при сравнительно высокой температуре. Это можно объяснить наличием значительного количества пор, позволяющих расширяться зернам минералов при нагревании без разрыва сплошности породы. Этими опытами также установлено, что увеличение температуры прокаливания увеличивает их открытую (эффективную) пористость за счет вновь образующихся трещин в минералах и пустот на контакте между ними.

С увеличением открытой пористости увеличивается и процент водонасыщения пород.

При исследовании вмещающих пород месторождений редких и рассеянных элементов, молибдена, свинца и цинка, меди, киновари, железа преследовалась цель установить роль физико-механических свойств горных пород в формировании структуры рудных полей и оценить гидротермально-метасоматические изменения околорудных пород.

1. Рудовмещающие породы месторождения урана прожилково-вкрапленного типа (алевролиты, диоритовые порфириды и лампрофиры) характеризуются определяющими значениями физико-механических свойств. Например, эффективная пористость колеблется в пределах 0,8—7,0%, при этом породы, вмещающие богатые руды,

имеют наибольшую пористость (5,4—6,6%). По мере удаления от рудных тел пористость пород уменьшается до 0,8—1,5%, а богатые руды переходят в бедные и ореолы рассеяния урана. Ореолы рассеяния молибдена и свинца повторяют контуры уранового оруденения и фактически определяются значением эффективной пористости.

Использование геологических предпосылок в сочетании с параметрами физико-механических свойств рудовмещающих пород позволили расширить фронт геологоразведочных работ и обнаружить перспективные рудопроявления.

2. Пироклорсодержащие карбонатиты отличаются малой пористостью (0,74—0,93 против 1,13—2,84%), высокой магнитной восприимчивостью (5000—8100 против $15-65 \cdot 10^{-6}$ ед. CGSm), высоким коэффициентом относительной напряженности (4—5 против 1,5—2,8).

Использование указанных различий в физико-механических свойствах позволило выявить новые участки, наиболее благоприятные для оруденения, и наметить перспективные площади для проведения поисково-разведочных работ.

3. Околорудные породы (тектониты) месторождения олова, обладающие повышенным объемным весом, могут служить дополнительным поисковым признаком для обнаружения рудных жил.

4. Преимущественное развитие рудовмещающих трещин в основных породах (габбро) на золоторудном месторождении объясняется их более высокими деформационными свойствами. Они по сравнению с ультраосновными породами (перидотитами) характеризуются более низкими значениями динамической прочности и модуля упругости.

5. Лейкократовые граниты, вмещающие молибденовое оруденение (месторождение I), отличаются от меланократовых пород (диоритов, габбро-диоритов, порфиоров) меньшей механической прочностью, более низкими значениями модуля упругости и удельного акустического сопротивления.

Эти данные определяют лейкократовые граниты как среду, наиболее благоприятную для развития дорудных трещин по сравнению с меланократовыми породами их кровли. Вследствие этого последние явились средой менее проницаемой для рудоносных растворов и могли оказать на них экранирующее воздействие.

6. Рудовмещающие породы месторождения молибдена (месторождения II) отличаются от безрудных (гранитов) меньшей твердостью и меньшей механической прочностью. Безрудные граниты, залегающие в центре месторождения, как более твердые и прочные породы, превратились в жесткий массив, вокруг которого происходили расщепление примыкающих к ним пород и локализация оруденения.

7. Физико-механические свойства месторождения III (молибдена) подтвердили концентрически-зональное строение массива:

— краевая часть, сложенная неизменным гранитом, обладает малой пористостью, высокой твердостью и механической прочностью повышенным значением модуля упругости;

— внешний контур, представленный измененными гранитами, характеризуется высокой пористостью, низкой твердостью и механической прочностью, малым модулем упругости;

— промышленный контур, представленный сильно измененными гранитами, образовавшимися в результате серицитизации, березитизации и дробления, отличается промежуточными значениями указанных физико-механических свойств гранитов. Здесь могло сказаться оруденение и сопутствующие ему процессы;

— породы ядра, представленные калишпатизированными гранитами и гранит-порфирами, имеют невысокую пористость, очень высокую твердость и наибольшее значение модуля упругости.

Исходя из фактических данных, можно предположительно считать, что наиболее благоприятными параметрами физико-механических свойств измененных гранитов с молибденовым оруденением являются:

- эффективная пористость 8—10%;
- твердость по методу истирания в пределах до 150 л/см;
- механическая прочность на скалывание в пределах 30—50 кгс/см²;
- модуль упругости 1,6—3,0·10⁻⁵ кгс/см²;
- усадка при сжатии 37—39%;
- скорость продольных волн 2400—3100 м/с.

8. Измененные (околорудные) граниты месторождения IV (молибдена) резко отличаются по физико-механическим свойствам от неизмененных или малоизмененных гранитов, удаленных от рудных тел. Некоторые из них по своему значению близки к измененным гранитам месторождения III. Отмечены низкие значения магнитной восприимчивости измененных (околорудных) гранитов (140—300 вместо 500—27 355·10⁻⁶ ед. CGSm), что может быть использовано при поисково-разведочных работах.

9. Исследования околорудных пород Козулинского месторождения свинца и цинка (порфириды и их туфы) показали, что их физико-механические свойства близки к измененным гранитам молибденовых месторождений.

Параметры измененных (околорудных) пород при благоприятных геологических предпосылках могут быть использованы при поисках и разведке новых рудных тел. Подтверждением этому может служить пример обнаружения рудного тела (скв. 17), залегающего в зоне дробленых кристаллотуфов Козулинского месторождения.

10. Околорудные породы свинцово-цинкового месторождения отличаются пористостью, магнитной восприимчивостью, механической прочностью и степенью сжимаемости в раздробленном состоянии.

Околорудные известняки (пачки Д) отличаются от удаленных от рудных тел известняков (пачки А, В, С):

- более высокой пористостью (5,5—12,5 против 1,9—4,6%);
- меньшими значениями модуля упругости (3,8—5,96·10⁵ против 5,3—7,39·10⁵ кгс/см²);

— меньшей магнитной восприимчивостью (около $130 \cdot 10^{-6}$ против $402-1159 \times 10^{-6}$ ед. CGSm).

Околорудные сланцы также являются более пористыми (3,8—6,2 против 3,2—4,8%) и имеют бóльшую усадку при сжатии (43,6—45,2 против 38,9—41,8%).

Установлена различная сжимаемость покрывающих и подстилающих рудное тело горных пород. Характерно, что наибольшая разница в усадке совпадает с большей мощностью рудных тел.

Следует отметить повышенные значения пустотности после сжатия раздробленных скарнов, скарнированных и дробленных известняков, залегающих в зоне контактов с рудными телами.

11. Вкрапленное и прожилковое оруденение на месторождении киновари определяется составом рудовмещающих песчаников и их физико-механическими свойствами. Особенно показательны в этом отношении акустические свойства, которыми можно воспользоваться при поисках новых рудных участков геофизическими методами.

12. Физико-механические свойства рудовмещающих пород месторождений колчеданной меди и железа показали, что оба месторождения залегают на границе пород, отличающихся по твердости и механической прочности. Кроме того, рудовмещающие породы железорудного месторождения имеют высокую эффективную пористость (18—28%).

Количественные выражения физико-механических свойств измененных (околорудных) пород рассмотренных месторождений приобретают значения индикаторов, которые при благоприятных геологических предпосылках могут иметь практическое значение для поисково-разведочных работ. Например, эффективная пористость для рудовмещающих пород месторождений изменяется в пределах: 1,5—3,0% для редких и рассеянных элементов; 4,0—10,0% для цветных и редких металлов; 18,0—28,0% для железа. Динамический модуль упругости измененных (околорудных) пород изменяется в пределах $2,8-5,5 \cdot 10^{-5}$ кгс/см².

Благоприятные условия для образования рудовмещающих структур и локализации оруденения, помимо геологических предпосылок, определяются комплексом физико-механических свойств пород, характеризующихся в основном деформационной способностью и их проницаемостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багин и др. Изменение фазового состава ферромагнитной фракции базальтов. — «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1969, № 11, с. 66—76.
2. Бриджмен П. В. Новейшие работы в области высоких давлений. М., «Иностр. лит.», 1948, 500 с.
3. Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. М., Госгеолтехиздат, 1954, 607 с.
4. Белоусов В. В. Тектонические разрывы, их типы и механизм образования. — «Труды Ин-та геофиз. АН СССР», 1952, № 17, 147 с.
5. Белоусов Е. И., Черткова В. В. Моделирование складчатости в условиях продольного изгиба. — «БМОИП, отд. геол.», 1955, т. XXX, вып. 5, с. 117—124.
6. Белаенко Ф. А. Свойства горных пород с точки зрения управления кровлей. ОНТИ НКТП СССР, 1936, 106 с.
7. Волярович М. П., Пархоменко З. И. Исследование разрушений при кручении тонких образцов горных пород при одностороннем давлении. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1957, № 3, с. 319—328.
8. Волярович М. П., Балашов Д. Б. Скорости упругих волн в горных породах. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1957, № 3, с. 319—330.
9. Вольфсон Ф. И. Проблемы изучения гидротермальных месторождений. М., Изд-во АН СССР, 1952, 212 с.
10. Грейтон Л. Природа рудообразующего флюида. (Пер. с англ.). М., Госгеолиздат, 1946, 184 с.
11. Горшков А. А., Омельяненко Б. И., Солюшкин Е. П. Опыт изучения условий локализации прожилково-вкрапленных урановых руд гидротермального происхождения. — В кн.: Геология рудных месторождений. Т. I. М., «Наука», 1964, с. 33—50.
12. Дортман Н. Б. Взаимосвязь петрографической характеристики горных пород с геологическим строением регионов. (Тезисы докл. IV науч.-техн. конф.). Л., ОНТИ ВСЕГЕИ, 1968.
13. Ершов А. Д. Тектоника рудных полей жильного типа. — «Советская геология», 1941, № 4, с. 115—120.
14. Жилкин Н. Г., Любимов Н. И., Морозов В. И. Приближенная оценка измененных горных пород по их физико-механическим свойствам. — «Разведка и охрана недр», 1960, № 12, с. 14—17.
15. Звягинцев Л. И. Значение пористости горных пород в локализации сульфидного оруденения на рудном Алтае. — В кн.: Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. М., «Наука», 1968, с. 251—257.
16. Измененные околорудные породы и их поисковое значение. [Сборник статей]. Под ред. Н. Н. Курека. М., Госгеолтехиздат, 1954, с. 3—52, 196—255.
17. Крейтер В. М. Структуры рудных полей и месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1956, 272 с.
18. Кобранова Н. В., Лепарская Н. Д. Определение физических свойств горных пород. М., Гостехиздат, 1957, 160 с.
19. Калашников А. Г. Магнитная восприимчивость горных пород. — «Докл. АН СССР», 1948, т. 63, № 6, с. 657—660.

20. Крейгер В. М., Жилкин Н. Г., Морозов В. И. Некоторые данные о свойствах горных пород после раздробления. — В кн.: Минеральное сырье. Вып. 1. М., Госгеолтехиздат, 1960, с. 215—228.

21. Ловеринг Т. С. Об изменении пород как поисковых признаках. М., «Иностр. лит.», 1951, 96 с.

22. Любимов Н. И. Принципы классификации и эффективного разрушения горных пород при разведочном бурении. М., «Недра», 1967, с. 5—57.

23. Любимов Н. И. Рациональный породоразрушающий инструмент и способы бурения скважин при разведке месторождений твердых полезных ископаемых. ОНТИ ВИЭМС, 1971, с. 10—19.

24. Любимов Н. И., Морозов В. И., Фролов А. А. Физико-механические свойства карбонатитов и их роль в размещении редкометалльного оруденения. — «Разведка и охрана недр», 1963, № 5, с. 30—33.

25. Нагата Т. Магнетизм горных пород. М., «Иностр. лит.», 1965, с. 9—337.

26. Осборн Е. Ф. Химия земной коры. Т. 2. М., «Наука», 1964, с. 75—87.

27. Павленко А. С. Особенности метасоматоза в одном из районов Северного Криворожья. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1959, № 1, с. 81—101.

28. Пластическая деформация карбонатных горных пород. — «Труды ИГН АН СССР», 1950, вып. 122, № 14. Авт.: Ю. А. Розанов и др., с. 14—22.

29. Розанов Ю. А. Экспериментальные исследования деформаций горных пород при высоких давлениях и температуре до 200° С. — «Труды ИГЕМ». М., Изд-во АН СССР, 1962, вып. 66, 82 с.

30. Розанов Ю. А. Роль физико-механических свойств горных пород в формировании структур месторождений и локализации оруденения. — В кн.: Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. М., «Наука», 1968, с. 220—225.

31. Ризниченко Ю. В., Силаева О. И. Определение зависимости скоростей распространения упругих волн в образцах горных пород от одностороннего давления. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1955, № 3, с. 193—197.

32. Роль физико-механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. Под ред. В. И. Казанского, Н. П. Лаврова, Ю. А. Розанова. М., Изд-во АН СССР, 1971, 45 с.

33. Смирнов С. С. Избранные труды. М., Изд-во АН СССР, 1955, 248 с.

34. Трещиноватые породы и их коллекторские свойства (методы исследований). [Сборник статей]. Под ред. Е. М. Смехова. М., Госгеолтехиздат, 1958, с. 7—66.

35. Смирнов С. С. Полиметаллические месторождения Восточного Забайкалья. ОНТИ НКТП СССР, 1934, 492 с.

36. Силаева О. И., Шамина О. Г. Распространение упругих импульсов в образцах цилиндрической формы. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1958, № 1, с. 32—45.

37. Толканов А. Е., Максимов И. Г. О влиянии физико-механических свойств рудовмещающих пород на локализацию флюоритового и свинцово-цинкового оруденений. — В кн.: Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. М., «Наука», 1968, с. 248—251.

38. Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. М., «Наука», 1968. (Докл. на симпозиуме, состоявшемся 30/XI—4/XII 1964 г.), 333 с.

39. Физические свойства осадочного покрова территории СССР. [Сборник статей]. Под ред. М. Л. Озерской и Н. В. Подоты. М., «Недра», 1967, 772 с.

40. Хисемудинов М. Г. О влиянии вмещающих пород и температуры растворов на образование руд. — «Советская геология», 1956, № 50, с. 12—27.

41. Юшко С. А. Методы лабораторного исследования руд. М., «Недра», 1971, 344 с.

42. Fa y o l H. Nate sur les mouvements de terrain provogues par l'exploitation des mines. — «Bull. Soc. l'ind. min.», 1885.

963