

В. ЛИНДГРЕН

208.

МИНЕРАЛЬНЫЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Выпуск I



ОНТИ НКТП СССР 1934
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ
ГОРНО-ГЕОЛОГО-НЕФТЯНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

В. ЛИНДГРЕН

экз
20/1/311

553.4
Л-59.

МИНЕРАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Перевод с английского
под редакцией Б. П. НЕКРАСОВА
переводчица А. Н. ЛЕПЕШКИНА

Выпуск I

8234
8218
8288

*ГУУЗ'ом НКТП СССР рекомендовано
в качестве учебного пособия для гео-
лого-разведочных и горных ВТУЗ'ов*



ОНТИ НКТП СССР • 1934

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ
ГОРНО-ГЕОЛОГО-НЕФТЯНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
Москва • Грозный • Ленинград • Новосибирск

Гр — 65-5-2

Протокол ТКК № 94

MINERAL DEPOSITS

by

WALDEMAR LINDGREN

Third Edition

New York and London, 1928

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА РУССКОГО ПЕРЕВОДА

Книга В. Линдгрена «Минеральные месторождения» является самым крупным трудом по геологии месторождений твердых полезных ископаемых. Первым изданием эта книга появилась 20 лет тому назад (1913 г.) в американском издательстве, будучи переиздана в 1919 г., позже в 1928 г. и наконец в 1933 г., каждый раз с дополнениями новых геологических примеров различных частей света и расширением отдельных глав.

Заслуженная популярность этой книги является следствием не только полноты собранного материала, добросовестности и точности интерпретации отдельных авторских мнений и взглядов, но вместе с этим строгости и законченности выдвинутых проф. Линдгреном принципов классификации месторождений полезных ископаемых. Генетическая однородность как основной принцип классификации позволила охватить с наименьшим количеством исключений, в сравнении с классификациями ряда других авторов в Европе и Америке, во взаимоотношениях и отчетливой связанности почти все месторождения (исключая нефть и уголь) полезных ископаемых.

Книга проф. Линдгрена не учебник. Объединяя идеей генетической однородности отдельные группы месторождений полезных ископаемых, как геологических тел, локализующихся в верхней зоне земной коры, безотносительно к промышленному значению и направлению дальнейшего использования, книга проф. Линдгрена включает ряд дисциплин прикладной геологии наших вузов: «Геологию рудных месторождений», «Геологию месторождений минерального сырья» и «Строительные материалы».

Несмотря на отсутствие в русском научном лексиконе названия «Минеральные месторождения», нам кажется более добросовестным и целесообразным перед смыслом и содержанием переведенной книги это название за ней сохранить. При всей распространенности и общности у нас термина «Рудные месторождения» он далеко не отвечает содержанию труда проф. Линдгрена.

Как и следовало ожидать, попытка все встречающиеся в переведенном труде единицы измерения привести к употребительной в Союзе метрической системе мер не могла быть доведенной до конца без ущерба для книги и ее оригинальности. Единство системы мер не было соблюдено в английском оригинале книги. Для примеров Европы, французских, голландских и т. п. европейских колоний даны в большинстве случаев метрические меры и для стран английского языка — английские меры (мили, футы, дюймы, фунты и т. д.).

Если не представляет трудности *определенные* линейные меры в футах перевести на метры, то при употреблении описательных терминов «не-

сколько сот футов» или относительных величин, иллюстрирующих данные тех или иных оригинальных таблиц (давление в фунтах на кв. дюйм, геотермический градиент в градусах Фаренгейта на глубину в футах и т. д.), это не возможно. Изменение английской системы мер и перевод их на метрическую систему не целесообразны и по существу. Книга является руководством — справочником для студентов, геологов, горных инженеров. Огромный библиографический материал по любому разделу книги, с краткой характеристикой основной идеи автора в данном вопросе, все равно столкнет читателя, углубляющегося в изучение вопроса и в той или иной мере владеющего английским языком, с истинно английскими мерами в английском тексте и заставит его «физически» представлять измеряемый в английских мерах геологический объект. И в этом случае лучше иметь первоначальное знакомство с английскими мерами в русском тексте.

Относительно терминологии. Геологическая терминология, как описательная, весьма богата. Для стран английского языка она к тому же разнообразна. В данном труде оригинальная терминология, по возможности, переведена на русский язык с сохранением английского названия. Исключительно широкий и пышный расцвет горного дела в США и Южноафриканских колониях, обусловивши большой научный прогресс геологии полезных ископаемых, породил и новые термины, которые, равно как и определяемые ими понятия, отсутствуют и по сей день в русском языке. История горного дела показывает, что этот передовой геологический опыт, переходя в другие страны, приносит в большинстве случаев с собой и терминологию.

Учащиеся нашей высшей школы, геологи и инженеры в поле и на рудниках без сомнения встретят появление в свет труда проф. Линдгрена с чувством глубочайшей признательности ему, любезно давшему согласие на появление его книги в Союзе.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Приложение геологии к актуальным запросам промышленности составляет предмет экономической геологии. В эту отрасль науки в качестве ее наиболее важного раздела входит изучение месторождений полезных ископаемых и пород, подземных вод, происхождение и состав поверхностных образований и приложение принципов геологии к задачам проектирования инженерных работ.

Данный труд не претендует охватить полностью все вопросы экономической геологии. Он ограничивается описанием условий залегания, структуры и генезиса типичных, экономически важных месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых по классам и типам. Во избежание чрезмерного объема из труда исключено описание месторождений, угля, нефти и битумов, а также некоторых строительных материалов. Статистике уделено лишь скромное место, но вопросы генезиса и соотношения различных типов месторождений освещены достаточно подробно, причем характеристике различных классов предшествует общая часть, трактующая общеприложимые принципы.

Полное и всестороннее освещение вопросов, имеющих отношение к теме данного труда, потребовало бы включения разделов о распределении месторождений, условиях залегания, структуре, генезисе, продуктивности и оценке, использовании добытых полезных ископаемых, процессах добычи и обработки и т. д. Но данный труд не столь всеобъемлющ, и автор полагает, что если читатель будет изучать вопрос с научной, а не утилитарной точки зрения, то он получит более ясное понятие о геологическом соотношении различных месторождений.

Вся обширная наука экономической геологии основана на химии и физике. С одной стороны, она связана с теоретической геологией, палеонтологией, минералогией и петрографией, с другой — с горным делом, металлургией и многими другими разделами знания. Читатель, пытающийся подойти к вопросу без необходимой подготовки в области вышеупомянутых наук, не будет иметь базы для своих занятий. Даже при определенной подготовке изучение экономической геологии представляет много трудностей. В породах, непосредственно граничащих со многими месторождениями, наблюдается столь сильное изменение, что исследователь, знакомый лишь со свежими, не подвергшимися изменению, образцами пород, может оказаться в тулупе, не будучи в состоянии с уверенностью отнести образец к какому-либо определенному типу. Например, измененные андезиты могут быть чрезвычайно похожи на кварциты; мо-

жет возникнуть вопрос, была ли окремненная порода когда-то известняком, или же порфиром. Диабаз может местами превращаться в белые, мелкозернистые кальцит-серицит-кварцевые породы, в других же местах он будет иметь вид агрегата, состоящего преимущественно из эпидота и хлорита. Эти примеры достаточны, чтобы показать, что изменение породы представляет для рудничного геолога вопрос первостепенной важности.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ¹

Земля, как целое. Взгляды и понятия о строении внутренней части земного ядра за последнее время имеют несколько большую ясность, главным образом благодаря изучению скорости распространения сейсмических волн на различной глубине, установлению ряда аналогий с метеоритами, изучению явлений сжимаемости горных пород и химической изученности изверженных пород.

Земля представляет плотный сфероид, удельный вес которого 5,52 и радиус около 6 400 км. Температура земного ядра неизвестна, но по всей вероятности она не столь высока, как это казалось бы по градиенту, измеренному у поверхности. В поверхностной оболочке могут возникнуть местная пластичность и оплавление, как следствие различных изменений физических условий, или же, быть может, радиоактивных воздействий.

Washington считает, что центральное ядро радиусом $\sim 3\ 400$ км состоит из никель-железа (плотность ~ 10). Центральное ядро постепенно переходит в магнезиально-железистый силикат, по составу близкий перидотиту, с большим или меньшим содержанием окислов и сульфидов. Мощность этого переходного слоя $\sim 1\ 400$ км. Выше пояса переходного состава располагается перидотитовый пояс, мощностью 1 500 км и уд. веса 4.

Перидотитовую оболочку покрывает земная «кора» мощностью от 60 до 100 км. Нижняя часть коры базальтового или габброидного состава кверху постепенно переходит во внешнюю оболочку гранитового или гранодиоритового состава мощностью от 15 до 20 км и уд. веса от 2,77 до 2,80. Это единственная часть земного шара в большей или меньшей степени доступная нашим исследованиям. Эту весьма тонкую верхнюю оболочку обычно называют «средней изверженной породой». Ей часто приписывают мощность в 10 миль, или 16 км, и из нее мы берем пробы для анализов пород. Она сложена гранитами, гнейсами и сланцами, вулканическими излияниями и различного рода интрузиями ².

V. M. Goldschmidt и G. Tamman считают, что первоначальная жидкая масса земли при остывании разделилась на три жидкие, несмешивающиеся между собою части или фазы: металлический расплав, сульфидный расплав и силикатный расплав, и одну газовую фазу (атмосферу). Относительно роли сульфидного расплава, как отдельной фазы, мнения расходятся. Под действием силы тяжести три расплава приняли концентрическое расположение. Goldschmidt предполагает также существование эклогитовой оболочки из граната и пироксена, т. е. минералов, сохраняющих свою индивидуальность при большом давлении, и под ней другой оболочкой, представляющей смесь сульфидов и окислов. Однако, повидимому, еще не установлено, до какой глубины может сохраняться кристаллическое со-

стояние минералов. Под влиянием процессов гравитационной и кристаллизационной дифференциации силикатная оболочка разделилась на более тяжелые и более легкие части. Таким путем могли возникнуть некоторые месторождения полезных ископаемых, однако, большинство их погребено на недостижимой для нас глубине. Различного рода химические процессы в отвердевавшей коре вызвали дальнейшую дифференциацию, с которой связано развитие многих других месторождений полезных ископаемых.

Газовая фаза в дальнейшем разделилась на жидкую и газообразную фазы, соответствующие гидросфере и атмосфере. Действием этих двух фаз на силикатную оболочку обусловлены разделение и концентрация элементов, т. е. процессы, с которыми связано образование остальных месторождений.

Имеется несколько вычислений среднего состава земли, как целого; последнее из них дал Washington (в 1925 г.) (им не включены элементы, составляющие менее 0,1%):

Состав земли по элементам

Fe (металл)	31,82	Mg	8,69
Ni	3,16	Ca	2,52
O	27,71	Na	0,39
Si	14,53	K	0,14
Al	1,79	S	0,64
Fe (силикат)	7,94	P	0,11

Всего . 99,44

Состав земной коры. В верхнюю, тонкую, оболочку земли входят: атмосфера, гидросфера и «кора». Под последним, в достаточной мере произвольным наименованием, мы подразумеваем породы, доступные непосредственному наблюдению путем проведения бурения или горных выработок, или же выведенные на доступные наблюдению горизонты процессами складкообразования, сбросами или эрозией. Мощность этой коры принимается за 10 миль, или 16 км.

При вычислении среднего состава земной коры необходимо рассмотреть отдельно изверженные породы от осадочных. Последние происходят из изверженных пород в результате действия процессов эрозии и последующего отложения и образуют в составе земной коры лишь тонкий слой. По подсчету Кларка (Clarke) кора до глубины 16 км состоит из 95% изверженных пород, 4% глинистых сланцев, 0,75% песчаников и 0,25% известняков и доломитов. Осадочные породы содержат кальций, магний и в особенности натрия в среднем в меньшем количестве, чем изверженные породы, т. е. в них наблюдается выщелачивание. Они также содержат больше калия и CO₂, но в общем, как и следует ожидать, их состав сходен с составом изверженных пород. Clarke и Washington произвели подсчет среднего состава изверженных пород из 5000 анализов образцов, взятых из всех стран света. Способ, которым они пользовались для получения среднего анализа, объясняется в вышеупомянутом труде³. Данные устанавливают, что в земной коре присутствуют все элементы, но, конечно, распределение их неравномерно; например, золото, серебро, медь, свинец и цинк присутствуют практически во всех породах, хотя для обнаружения их иногда приходится прибегать к особым методам. Те

же авторы произвели также приблизительные подсчеты большинства вероятно присутствующих редких элементов, хотя эти подсчеты не всегда имеют одинаковый вес. Clarke и Washington собранные данные представляют в следующих таблицах:

Средний состав изверженных пород (по элементам) коры мощностью в 16 км (10 миль)

Кислород	46,59	Никель	0,020
Кремний	27,72	Стронций	0,019
Алюминий	8,13	Ванадий	0,017
Железо	5,01	Церий и итрий	0,015
Кальций	3,63	Медь	0,010
Натрий	2,85	Уран	0,008
Калий	2,60	Вольфрам	0,005
Магний	2,9	Литий	0,004
Титан	0,63	Цинк	0,004
Фосфор	0,13	Колумбий и тантал	0,003
Водород	0,13	Гафний	0,003
Марганец	0,10	Торий	0,002
Сера	0,052	Свинец	0,002
Барий	0,050	Кобальт	0,001
Хлор	0,048	Бор	0,001
Хром	0,037	Бериллий	0,001
Углерод	0,032		
Фтор	0,030		
Цирконий	0,026		
		Всего	100,000

Приблизительное процентное содержание редких элементов в изверженных породах коры мощностью в 16 км (10 миль)

Молибден	} $n \times 10^{-6} = 0,000$ $n =$ от 1 000 до 9 000 мг/т
Рубидий	
Мышьяк	
Олово	
Бром	}

Цезий	} $n \times 10^{-7} = 0,0000$ $n =$ от 100 до 900 мг/т
Скандий	
Сурьма	
Кадмий	
Ртуть	
Иод	}

Висмут	} $n \times 10^{-8} = 0,00000$ $n =$ от 10 до 90 мг/т
Серебро	
Селен	
Платина	
Теллурий	} $n \times 10^{-9} = 0,000000$ $n =$ от 1 до 9 мг/т
Золото	

Иридий	} $n \times 10^{-10} = 0,0000000$ $n =$ от 0,1 до 0,9 мг/т
Осмий	
Таллий	

Индий	} $n \times 10^{-11} = 0,00000000$ $n =$ от 0,01 до 0,09 мг/т
Галлий	
Палладий	
Родий	
Рутений	
Германий	}

Радий	$n \times 10^{-12} = 0,000000000$ $n =$ от 0,001 до 0,009 мг/т
-----------------	--

Восемь элементов, поименованных выше первыми, составляют 98,62% изверженных пород. Из шести главнейших металлов, входящих в таблицу среднего состава, экономическое значение имеют только железо, магний и алюминий. Преобладают более легкие элементы; атомный вес каждого из них ниже 56 (Fe 55,9). В среднем составе представлены многие редкие элементы, но за исключением титана, количество которого достигает 0,63%, все эти металлы содержатся в среднем в количестве менее 0,1%. Платина, золото, серебро, медь, свинец, цинк, сурьма, мышьяк, олово, ртуть, молибден, вольфрам и пр. присутствуют в количестве менее 0,01%⁴.

Процентное отношение металлов в породах в вышеприведенных цифрах еще не означает количеств этих металлов, которое может быть использовано промышленностью. Количество это, действительно, настолько мало по сравнению с объемом земной коры, что выражение его в процентах ничего еще не говорит. Итак, металлы, присутствующие в месторождениях полезных ископаемых, представляют лишь самую незначительную долю количества металлов, присутствующих в земной коре, т. е. ту долю, которая путем того или другого процесса концентрации скопилась в отдельном пункте.

В общем изверженные породы содержат больше тяжелых металлов, чем осадочные, поэтому мы совершенно правильно рассматриваем первые как первоначальный источник этих металлов. Отложение осадков сопровождается рассеиванием (путем растворения), о чем свидетельствует факт присутствия следов многих металлов в морской воде. С другой стороны, некоторые виды отложения осадков бесспорно имеют своим следствием местную концентрацию металлов, например железа, цинка, кобальта, никеля и ванадия.

Минералы земной коры. Общая масса изверженных пород состоит из относительно немногочисленных минералов, преимущественно силикатов и окислов. Этими минералами главным образом являются кварц, полевой шпат, лейцит, нефелин, пироксен, амфибол, мусковит, биотит, оливин, гранат, магнетит, ильменит и хромит; к ним следует еще добавить всегда присутствующий апатит. Кристаллические сланцы, помимо вышеперечисленных минералов, содержат такие вторичные продукты, как гранат, ставролит, кианит и андалузит, а также кордиерит, хлорит и оттрелит. Известно более 1 200 минеральных видов, но большинство их присутствует в месторождениях, в которых протекали особые процессы.

Относительно формы, в какой входят в породы редкие элементы, мы не имеем исчерпывающих сведений. Золото, вероятно, всегда является самородным металлом. Многие металлы подобно хрому, никелю, ванадию, титану и меди могут содержаться в силикатах в качестве изоморфной примеси. Но медь может присутствовать в виде сульфида или силиката; хлор — в апатите или в силикатах; фтор — в виде флюорита или фтористого силиката; бор — обычно в виде боросиликата; олово — в виде окиси сульфида или силиката. Многое, что пока остается неизвестным относительно содержащихся в породах редких элементов, надо надеяться, будет открыто при помощи рентгеновского метода или спектроскопии. Согласно теории Goldschmidt ассоциация в широкой степени определяется изоморфностью элементов.

Старые издания настоящего труда содержат много данных относительно присутствия в породах золота, серебра, меди, свинца и цинка. Ввиду того что эти факты имеются в «Геохимии» Clarke и в «Profes-

sional Paper» 127, Clarke и Washington, автор решил не включать их в данный труд. Сведения относительно золота и серебра читатель найдет в труде Don⁵, он установил, что эти металлы легко привносятся в породы, залегающие вблизи месторождений благородных металлов. При помощи цианирования Luther Wagoner⁶ установил, что многие изверженные породы содержат золото в количестве примерно 100 мг на метрическую тонну, а серебро в количестве от 1 000 до 5 000 мг.

Всем известно, что некоторое количество золота и серебра содержится в морской воде; по имеющимся определениям метрическая тонна морской воды содержит от 5 до 65 мг золота. Серебро присутствует в более значительном количестве, а именно до 1 900 мг. Естественно, что образующаяся при испарении морской воды соль также содержит благородные металлы. В такой соли Wagoner обнаружил 457 мг золота и 54,4 г серебра на метрическую т; позже от него же поступили сведения о содержании значительных количеств этих же металлов в пробах, взятых из морских глубин. Позднее исследования⁷ установили, что количество золота в морской воде было преувеличено и в действительности приближается к 1 мг на тонну⁷.

Известно много случаев, когда золото было обнаружено в породах невооруженным глазом. Такими породами являлись пегматит, гранит, вулканическое стекло и различные порфиры. В Тасмании золото присутствует в перидотите. Видимое золото обнаружено также в некоторых кристаллических сланцах⁸ и, конечно, во многих обломочных породах. Из таблицы ясно, что некоторые металлы, считающиеся весьма редкими, например титан, хром, циркон, никель, ванадий и церий в действительности присутствуют в земной коре в большем количестве, чем такие промышленные металлы, как медь, свинец и цинк.

Washington делает различие между «петрогенетическими» элементами, т. е. теми, которые составляют главную массу пород, и «металлогенетическими» или «рудными» элементами, имеющими экономическое значение. Первые встречаются преимущественно в виде силикатов, окислов, флюоридов и хлоридов; вторые в виде сульфидов, арсенидов, селенидов и теллуридов. Первые присутствуют в земной коре в больших количествах, вторые в гораздо меньших и концентрируются в месторождениях.

Исходя из несколько иной точки зрения V. M. Goldschmidt делит элементы на три класса: 1) ассоциированные внутри земного ядра (сидерофильные), например Fe, Ni, Cr, P, C, Pt; 2) ассоциированные с серой или подобными ей элементами (халькофильные) S, Se, Te, Fe, Ni, Co; Cu, Zn, Cd, Pb; Sn, Ge, Mo; As, Sb, Bi; Ag, Au, Hg; Pd (Pt); Ga, In, Tl и 3) ассоциированные с силикатными расплавами (литофильные); O, (S), (P), (H); Si, Ti, Zr, Hf, Th; F, Cl, Br, I; B, Al, металлы цериевой группы; Li, Na, K, Pb, Cs; Be, Mg, Ca, Sr, Ba; Fe, V, Cr, Mn, Ni; Nb, Ta, W, U, Sn.

Внутри силикатовой зоны элементы даже проявляют явное предпочтение определенным породам. В основных породах мы видим фосфор, серу, никель, железо, хром, титан и платину. В кислых породах находим фтор, бор, литий, цирконий, олово, вольфрам, тантал, металлы цериевой группы, молибден, торий и бериллий. Барий и стронций часто концентрируются в сильно щелочных породах. Золото и серебро сопутствуют кислым или промежуточным породам, но незначительные количества Au и Ag могут встречаться и в более основных породах.

Медь, повидимому, встречается в основных породах в больших коли-

чествах, чем в кислых. В последних дифференциатах магм, а именно пегматитах, мы видим эти соотношения особенно ярко выраженными.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Тонкую верхнюю кору земли, доступную нам непосредственно или косвенно, мы определили как оболочку мощностью в 16 км (10 миль), тогда как радиус земли равен 6 400 км (4 000 миль). Самые глубокие шахты достигают лишь 7 000 фт., самые глубокие скважины — около 8 000 фт. Как сказано выше, эта кора состоит преимущественно из силикагных пород или их продуктов. Породы состоят из многочисленных минеральных агрегатов, образовавшихся в различные периоды и различными путями. Каждый отдельный массив минеральных агрегатов, например интрузивный массив, поток лавы, пласт, дайка, жила, линза носят название «формации», «члена» или, в общем, «геологического тела».

Геологические тела, состоящие из однородного полезного ископаемого (например пласт каменного угля или чистого гипса) или же из нескольких рассеянных в массе геологического тела или сосредоточенных в определенных его участках (например жилы с рассеянным золотом), которые можно с выгодой эксплуатировать, называются «минеральными месторождениями» или «рудными месторождениями».

Геологические тела, не разрабатываемые на какой-либо отдельный минерал или минералы, а на агрегат минералов — т. е. самую породу, — обычно называют месторождением той или другой породы. Так например пласт кровельных сланцев не называют рудным или минеральным месторождением, а месторождением *кровельного сланца*.

Экономическая геология рассматривает условия залегания, состав, структуру и генезис тех геологических тел, которые могут быть использованы промышленностью; она учит, как их надо искать и какими способами установить их ценность⁹.

Как сказано выше, все известные нам месторождения минералов залегают в земной коре. Почти все они образовались на глубине не более 16 км от поверхности, а громадное большинство — на глубине, не превышающей 8 км. Образовались они путем многих и разнообразных процессов, как-то: магматической дифференциации, отложения осадков, выветривания и обычно действием различного рода растворов на слагающие земную кору коренные породы.

Рудные месторождения являются местными скоплениями или концентрациями металлов или минералов, образовавшимися как следствие различных процессов. Наука о рудных месторождениях имеет своей целью проследить эти процессы и объяснить причины их возникновения. Они создаются отчасти вследствие предпочтения, оказываемого известными элементами определенным породам; например, олова, вольфрама и молибдена — кислым породам; платины, хрома, никеля, меди — основным породам. В основных породах бесполезно искать олово или в кислых платину.

Циркуляция элементов является весьма увлекательным предметом изучения. Например, фосфор из содержащегося в изверженных породах апатита, мы можем проследить до фосфата, содержащегося в организмах, и его же мы можем проследить от этих организмов до осадочных пластов фосфоритов. Некоторые элементы легко передвигаются на весьма значительные расстояния, другие не склонны к перемещению.

Процессы концентрации. 1. *Дифференциация путем фракционной кристаллизации и ликвации в остывающих магмах.* Здесь наиболее выдающаяся роль принадлежит фракционной дифференциации. В общем тяжелые металлы выделяются первыми. Так, путем осаждения кристаллов могут образоваться скопления магнетита, хромита, ильменита; хромит иногда уносит с собою алмазы и платину. В другом случае растворенные в магмах сульфиды могут выделиться путем ликвации, т. е. могут оставаться жидкой несмешивающейся частью магмы и унести с собою Ni, Cu, Au, Ag, Pt и Pd. Примеры таких месторождений мы видим в Sudbury (Онтарио), Kiruna (Швеция) и во всех месторождениях хромита. Эти месторождения не так многочисленны, но часто представляют большой экономический интерес.

К счастью человечества существует еще другой процесс дифференциации в магмах, протекающий в ином направлении. Салическая часть магмы выносится кверху вместе с восходящими газовыми продуктами дифференциации.

2. *Салические экстракты, преимущественно представленные пегматитовыми дайками.* Щелочной полевой шпат и кварц стремятся отделиться в верхней части расплавленной магмы, унося с собою олово, вольфрам, бериллий, колумбий, редкоземельные металлы, радий, уран, фосфор, фтор, бор, реже сульфиды, чаще арсениды. Для многих металлов салические экстракты являются единственными месторождениями.

3. *Газофлюсующие компоненты магмы — минерализаторы, — проникающие в более отдаленные зоны по сравнению с салическим экстрактом.* В этих продуктах опять хорошо представлен кремнезем, содержащий значительные количества летучего или растворимого материала. Пересыщенные кремнеземом воды поднимаются кверху, неся с собою CO₂, азот, сернистые соединения, далее, флюориды, хлориды, фосфаты, мышьяковые и сурьмяные соединения, селениды и теллуриды. Металлами здесь являются золото, серебро, железо, медь, свинец, цинк, висмут, олово и вольфрам, ртуть, марганец, никель, кобальт, радий и уран.

Газофлюсующие соединения представляются в виде сублиматов в вулканических излияниях близ поверхности и в жилах и месторождениях замещения над изверженными интрузивами и близ них. Значительная часть месторождений образуется именно этим путем.

4. *Концентрация под действием подземных вод.* Поверхностные воды, просачиваясь сквозь породы, непрерывно отлагают и непрерывно же растворяют. Спускаясь, они могут захватить с собою железо, а поднимаясь вновь его отложить. Производительность этого процесса обуславливается растворимостью пород. Таким способом могут образоваться месторождения железа, меди, свинца, цинка и даже урана и ванадия. В этом классе месторождений золото, серебро, мышьяк, сурьма, олово и ртуть обычно отсутствуют. Считают, что этим путем образовались свинцово-цинковые месторождения в долине Миссури, а также медно-ванадиевые месторождения западных штатов.

5. *Концентрация поверхностными водами в зоне окисления.* Близ поверхности воды содержат большое количество кислорода и поэтому склонны разрушать породы и превращать их в почву. Однако, некоторые, трудно растворимые, минералы остаются, и таким образом могут образоваться значительные концентрации, как например месторождения лимонита, остаточные после известняка и серпентина (в южных штатах и

на о. Куба), или остаточные после тощих железистых осадков (район Верхнего Озера). Значительные концентрации имеют место в верхней части других рудных месторождений, образующих обогащенные зоны в свинцовых, цинковых и медных месторождениях, когда из просачивающихся вниз растворов осаждаются вторичные сульфиды, в особенности халькозин и ковеллин, обуславливающие ценность месторождения. Могут иметь место концентрации фосфатов и марганцевых минералов. Большое значение имеют коллоидальные процессы. В зоне выветривания могут жить растения и животные.

Этот процесс сопровождается сложными циклами растворения и отложения кальция, железа, кремнезема, азота, серы, фосфора, иода, натрия и калия.

6. Концентрация путем отложения осадков. Отложение осадков является следствием процессов выветривания и эрозии пород с последующим переносом. Из изверженных пород выщелачиваются такие элементы, как натрий и кальций, а другие элементы концентрируются. Для человечества эти процессы имеют первостепенное значение, так как во время именно этого процесса сортировки имеют место химические и биохимические реакции, следствием которых является образование залежей железа, марганца, фосфоритов, углекислых кальция и магния, гипса и щелочных хлоридов. Из 100 г изверженной породы 97 г идут в осадки, остальные 3 г попадают в море и обогащают его солями. Значительную роль играло различие удельных весов, вследствие которого образуются россыпные месторождения тяжелых металлов, а также пласты каолина и кварцевого песка.

7. Концентрация под действием биохимических процессов. В концентрации некоторых элементов значительная роль принадлежит растениям и животным, начиная от крупнейших и до микроскопических. Вспомним, что каменный уголь концентрируется растениями из содержащейся в атмосфере CO_2 , что нефть концентрируется из скопленных остатков животных и растений. Пройдя приблизительно через шесть превращений, фосфор, первоначально содержащийся в морской воде, наконец, приходит в неподвижное состояние в отложениях гуано и залежах фосфоритов. Содержащийся в водорослях углекислый кальций и кремнезем, присутствующий в диатомеях, могут концентрироваться в значительные залежи. Железные и магниезиальные бактерии могут образовать болотные руды; серные бактерии могут вызвать скопления серы. Многие животные накапливают медь, цинк, мышьяк, иод и ванадий и даже барий и стронций. Многие из этих концентраций могут снова вернуться в морскую воду, из которой они произошли, но если бы их быстро покрыли осадки, они могли бы послужить источником вторичной концентрации и в результате обусловили бы образование рудного месторождения.

ТЕХНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Промышленная ценность. Минеральными или рудными месторождениями мы называем такие геологические тела, которые могут быть с выгодой промышленно использованы. Конечно, это определение не следует принимать слишком дословно, в особенности в тех случаях, когда дело касается генезиса месторождений, так как здесь, как и во многих других фазах изучения предмета, некоторые вопросы прикладной геологии пере-

ходят в область теоретической. Кроме того, нередко то, что еще только вчера считалось бесполезным, сегодня становится полезным. Примеры привести нетрудно. Еще в 1900 г. медьсодержащий монзонит в Bingham (Utah), дающий выход 30 центов золота и 14 центов серебра на тонну и 1% меди, вероятно, не считали бы рудой, но при современных методах добычи и обработки он становится ценной медной рудой.

Цинковые минералы в рудах западных штатов, не представлявшие ценности сами по себе и даже снижавшие качество руды, в настоящее время выгодно разрабатываются. Вольфрамовые и ванадиевые руды, еще не так давно поступающие в отвалы, в наше время ценны. Низкосортные золотые руды, например руды Меркур (Utah), которые до 1900 г. считались безнадежно упорными, со введением цианирования приобрели большую ценность. Многие из железных руд с высоким содержанием фосфора оставались без внимания пока Томас-процесс не представил возможности рентабельной обработки. Монацит, содержащий торий, стал ценным сырьем с тех пор, как были изобретены калильные колпачки для газовых горелок. Новые процессы обработки, повышение цен на тот или другой продукт промышленности, изобретения, требующие для своего осуществления редких металлов, — все это может внезапно сделать ценным геологическое тело, считавшееся раньше бесполезным.

Титанистые железные руды образуют обширные залежи, которые в настоящее время не эксплуатируются ввиду трудностей, сопряженных с их металлургической обработкой, без всякого сомнения, в более или менее отдаленном будущем они будут использованы*.

Этот принцип может быть обратным. Снижение цен может сделать эксплуатацию того или другого месторождения невыгодной; именно это и случилось в отношении некоторых серебряных рудников, когда в 1980 г. цены на серебро стали падать. Громадные изменения, преимущественно в смысле повышения цен, были результатом мировой войны (начиная с 1914 г.). Цена на многие металлы удвоилась; в этом отношении можно упомянуть о серебре, платине, меди, свинце, цинке, олове, сурьме и алюминии. Одно только золото осталось в прежней цене будучи мировым стандартом измерения ценностей.

Со времени окончания войны имели место многие коренные изменения, которые трудно было предугадать. Медь понизилась в цене, тогда как цены на свинец и цинк остались на прежней высоте или даже повысились. Непрерывные завоевания техники снижают производственные расходы. Например селективная флотация сделала выгодными многие рудные тела, которые раньше нельзя было эксплуатировать.

Руда (ore) и рудная порода (gangue). Слово «руда» употребляют различно. «Рудный минерал» — это такой, который может быть использован для извлечения одного или более металлов. «Руда» в том смысле, как это слово употребляется в настоящем труде, есть часть геологического тела, из которой содержащиеся в ней металл или металлы могут выгодно извлекаться. Так, галенит и малахит являются рудными минералами. Руда почти всегда представляет смесь минералов. Взамен слова «руда» имеется много местных терминов. В области Миссури, где расположены

* Титано-магнетиты в СССР благодаря научным работам академиков Э. В. Брицке, Павлова и др. уже учитываются как промышленные руды, на сырьевой базе которых с 1932 г. строятся металлургические заводы.

свинцово-цинковые рудники, сырая руда носит название dirt (грязь), рудой же (ore) называют концентраты. В штате Мичиган руда называется «породой» (rock), а концентраты — «минерал» (mineral). Золотоносные пески обычно не называют рудой. Употребление слова «руда» (ore) не совсем основательно. Обычно она подразумевает металл, но иногда встречается выражение «серная руда» (sulphur ore), означающее пирит; в других случаях встречаем выражение «сапфировая руда». Встречающиеся в руде минералы, не представляющие ценности, называются пустой, рудной или жильной породой (gangue). Так, золотая руда может состоять из кварца, кальцита, сидерита, самородного золота, золотосодержащего пирита и галенита. Первые три минерала будут называться «пустой (gangue mineral) или жильной породой». Эти термины нельзя считать твердыми, например, сидерит в иных условиях может использоваться в качестве железной руды. Помимо этого, как уже упоминалось выше, то, что вчера было «пустой породой», может завтра стать ценной рудой. Поэтому предпочтительно, чтобы слово «руда» понималась несколько шире, чем это принято в настоящее время¹⁰.

Вряд ли приходится говорить о разнице в цене на различные металлы, являющейся причиной того, что не для всех металлов количество должно быть одинаково, чтобы материал мог называться рудой. Железная руда обычно должна содержать не менее 30% Fe, обычно гораздо больше. Эффузивная порода, содержащая 15% железа, далеко не может называться железной рудой, между тем как кварц с содержанием всего 0,05% золота представляет богатую золотую руду и расценивается по 330 долл. за метрическую тонну. В действительности, если руда содержит всего 0,0001% золота, что равняется 1 г на метрическую тонну, или 66 центов на тонну, она все же сбывается плавильным заводам при том условии, если она содержит какой-либо другой полезный минерал.

Содержание металла в рудах. Хотя и не представляется возможным сообщить точных данных относительно минимального содержания ценного минерала, которое руды различных металлов должны иметь для выгодного извлечения, все же даже некоторые приблизительные указания могут быть полезными¹¹. Местные условия, цены на металлы, характер руд и сопровождающие минералы — все это, конечно, должно учитываться.

Железо. Железные руды области Верхнего Озера обычно содержат от 50 до 60% Fe, но руды с более низким содержанием его также могут использоваться, в особенности в тех случаях, когда остальные условия благоприятны. Руды Clinton в штате Alabama содержат не более 30% металлического железа; некоторые типы магнетита, легко поддающиеся концентрации, могут содержать всего 25%, и все же обработка их может быть выгодной.

Медь. Медные руды из области Верхнего Озера при соответствующих условиях можно выгодно перерабатывать даже в том случае, когда они содержат всего 0,5% металлической меди (хотя обычно содержание в среднем выше). Сульфидные медные руды обыкновенного типа редко могут идти в производство, если содержание в них меди ниже 1,5%, за исключением, однако, тех случаев, когда в них присутствуют золото и серебро; во многих местностях содержание металла в таких рудах выше. Руды, на которых работают предприятия Utah Copper Company, содержат около 1,0% Cu, кроме того, золото и серебро на сумму 40 центов на тонну.

Свинец. Свинцовые руды северного Idaho содержат от 5 до 6% Pb и 3 унции Ag на тонну, и эксплуатация их выгодна. В юго-восточном Миссури используются руды с 5—7% свинца, в которых серебро отсутствует.

Цинк. Цинковые руды значительно варьируют в зависимости от местности. В Joplin (Миссури) значительная доля извлекаемого из рудников материала дает всего 3% сульфидного цинка и незначительное количество свинца. Этот материал подвергается концентрации до 60% цинка. В местностях, расположенных вдали от сбыта, как например Colorado, Utah и Idaho, можно добывать и сбывать цинковые руды только высокого содержания.

Серебро. С повышением цен на металл, чистые серебряные руды снова привлекли к себе внимание. Кварцитовые руды должны содержать металл в количестве не менее 15 унций на тонну. Обычно руды, помимо серебра, содержат свинец, медь или золото, иногда и все эти три металла. Если завод покупает комплексную руду, он редко платит менее чем за 2 унции серебра и 0,01 унции золота на тонну. Золото и серебро отделяются от веркблея или меди путем процесса обессеребрения цинком или же электролиза, и стоимость этих процессов, разумеется, требует определенного минимального содержания золота и серебра, иначе извлечение станет невыгодным. Однако, на многих заводах, хотя золото и серебро и присутствуют в меньшем, чем это допустимо, количестве, все же они извлекаются в качестве побочных продуктов, ввиду необходимости удаления из веркблея каких-либо компонентов, например мышьяка.

Золото. Золото можно выгодно извлекать из руд с выходом менее 1 долл. на тонну, но обычные золото-кварцевые руды, например калифорнийские, дают выход около 5 долл. на тонну; руды Невады, Колорадо и некоторых других штатов обычно имеют более высокое содержание. Обработка золотых руд может проводиться на материале, содержащем 2,5—3 долл. и даже меньше; примером служат рудники Tradwell на Аляске. В россыпных месторождениях, разрабатываемых гидравлическим способом, выгодно добывать материал, содержащий от 4 до 5 центов на куб. ярд. В Калифорнии драгированием эксплуатируются месторождения, содержащие от 8 до 15 центов на куб. ярд, на Аляске же россыпи должны содержать от 50 центов до 1 долл. на куб. ярд.

За последние годы разработка золотых россыпей при помощи драг стала обходиться всего около 4 центов за куб. ярд.

Олово и пр. Оловянные руды содержат от 1,5 до 5% олова, но в россыпных месторождениях содержание касситерита в количестве 1 фунта на куб. ярд (600 г на метрическую т) уже дает некоторую выгоду. Руды ртути содержат этот металл в количестве не менее 0,3%, алюминиевые руды — не менее 30% алюминия. Никель должен присутствовать в количестве 2% и больше, иначе эксплуатация будет невыгодна; от марганцевой руды требуется содержание 50% Mn, но в присутствии железа допустимо меньшее количество марганца. Хромовая руда должна содержать около 50% окиси хрома. Если руды хорошо поддаются концентрации, то они могут быть и менее богаты.

ЦЕНА НА МЕТАЛЛЫ

Цена на различные металлы обуславливается обилием последних, спросом и стоимостью добычи и обработки руд. Цена на золото устанавли-

вається міжнародним соглашением, поэтому оно и служит стандартом, по которому расцениваются все прочие товары. Алюминий, несмотря на то, что он является наиболее распространенным металлом, дорог по той причине, что его можно извлекать лишь из немногих содержащих его минералов.

Нижче помещается таблица, первая графа которой дает так называемые «нормальные» цены на металлы. Конечно, даже в нормальное время цены несколько колеблются; цены на некоторые металлы, как например медь, железо и олово, особенно сильно реагируют на изменения экономических условий. Начиная с 1914 г., мировая война стала оказывать сильнейшее влияние на цены; из второй графы таблицы видно, что в 1918 г. цены на большинство металлов выросли вдвое. При возвращении к нормальным условиям цены на металлы должны бы упасть, конечно, за исключением золота. В 1917 г. цены на многие металлы, используемые военной промышленностью, также ненормально повысились. Высокосортная марганцевая руда продавалась по 1 долл. за единицу, почти в той же цене стоял хромит. Вольфрамовая руда покупалась по цене 20—26 долл. за единицу WO₃, а молибден по цене свыше 2 долл. за фунт.

Приводим сравнение цен на наиболее употребительные металлы в 1914, 1918 и 1927 гг.

	Март 1914 г.	Февраль 1918 г.	Май 1927 г.
Платина	44 долл. за унцию	106 долл. за унцию	86 долл. за унцию
Золото	20,67 " " "	20,67 " " "	20,67 " " "
Серебро	0,57 " " "	0,87 " " "	0,56 " " "
Ртуть	0,52 " " фунт	0,71 " " фунт	1,66 " " фунт
Никель	0,45 " " "	0,50 " " "	0,35 " " "
Олово	0,37 " " "	0,85 " " "	0,65 " " "
Алюминий	0,19 " " "	0,37 " " "	0,26 " " "
Медь	0,14 " " "	0,23 " " "	0,128 " " "
Сурьма	0,07 " " "	0,14 " " "	0,18 " " "
Цинк	0,05 " " "	0,08 " " "	0,061 " " "
Свинец	0,04 " " "	0,07 " " "	0,067 " " "
Чугун	0,006 " " "	0,015 " " "	0,008 " " "

Много интересных данных относительно общей мировой добычи металлов и наибольших количеств, добытых в каком-либо отдельном месторождении, можно найти у J. H. Vogt¹²

ПРОДУКЦИЯ РУДЫ И МЕТАЛЛА

В «Mineral Resources»¹³ можно найти интересные таблицы, представляющие продукцию металлов в США в коротких тоннах¹⁴. Из этих таблиц можно видеть, что, например, в 1925 г. было получено 36 800 000 т чугуна, почти 837 000 т меди, 655 000 т свинца, 566 000 т цинка, 2 750 т серебра и 100 т золота. Чугун в длинных тоннах, остальные металлы в коротких. За тот же год руд было получено: железной 64 000 000, медной — 50 000 000, свинцовой 8 600 000, цинковой 16 500 000, золотой и серебряной — 9 000 000 (все цифры округлены).

ВЕС И МЕРЫ

Прежде чем закончить эту часть, необходимо сказать несколько слов о весе и мерах. Содержание руд основных металлов, таких как железо, свинец, цинк и медь, измеряется в процентах. Для свинца и меди цифры часто означают неточное содержание по мокрому анализу, а по сухому, который дает содержание на 1½ или более процента ниже действительного. В некоторых случаях содержание свинца определяется путем мокрого опробования королька из тигельной пробы; такой анализ еще сильнее расходится с действительностью. Плавильные заводы платят за руду за «единицу», что означает 1% или 20 фунтов на тонну, или же по «основной цене» за определенный процент металла, например 55% за железные руды, идущие в бессемерование, или 65% за цинковые концентраты Jorlin. Вольфрамовая руда продается за единицу присутствующей триоксида вольфрама, если руда содержит 60 или более процентов W_2O_3 . Цена варьирует в связи с присутствием или отсутствием определенных элементов¹⁴, в зависимости от которых наблюдается понижение или повышение цен.

В Англии и ее колониях благородные металлы определяются в «тройских» унциях и пеннивейтах на длинную и короткую тонну. В США вместо пеннивейтов пользуются десятичными дроблями. Что касается золота, то о нем часто говорят в долларах и центах, причем 1 долл. почти равняется 1 пеннивейту. Серебро измеряется в унциях, пеннивейты скидываются. Пользуются короткими тоннами. Почти все прочие страны измеряют эти металлы в граммах на метрическую тонну, что гораздо проще. В целях сравнения приводятся данные, составленные W. J. Sharwood¹⁵.

Таблицы для переводов мер. Грамм принято считать равным 15,4320 грана. Одну унцию (тройскую) чистого золота считают равной 20 долл. 67 центам вместо 20 долл. 6 718 346¹⁶ центов (ошибка менее 1 на 10 000). Ценность английской монеты основана на том, что 1 унцию

Объем и вес чистого золота и серебра

	1 см ³	1 куб. дюйм	1 куб. фут
Чистое серебро			
Вес: граммы	10,57	173,21	299307,00
унции (Tr)	0,339825	5,5687	9622,72
Чистое золото			
Вес: граммы	19,3	316,269	549,513
„ унции (Tr)	0,6205	10,1680	17570,39
Ценность: в долл. США §	12,8257	210,17	363,180
в английских фунтах (£)	2,647	43,214	74,674

Золотопробышностью США, Англии и английских колоний при обозначении содержания приняты унции (Tr) troy = 31,103 г. В тех случаях, когда содержание почему-либо было взято в унциях (avois) avoirdupois = 28,349 г, дается соответствующее обозначение. *Прим. ред.*

Перечисление содержания и стоимости

	Одна часть в	Процент	В метрической тонне			В длинной тонне в 2 240 фунт.					В короткой тонне в 2 000 фунт.	
			Унции (Tr)	Доллары США (золот.)	Граммы	Унции (Tr)	Унции	Пенни- вейты	Граммы	Долл. США (золот.)	Унции (Tr)	Долл. США (золот.)
Один процент. . . .	100	1	321,50	0,645,40 ⁶	10,000	326,666	326	13	8	6,752,20	291,666	6,028,75
Один грамм на метри- ческую тонну—од- ной части на мил- лион	1 000 000	0,0001	0,03215	0,6645	1	0,03266	—	—	15,68	0,67 ⁵	0,029166	0,60 ²⁹
Одна унция. (Tr) на короткую <i>m</i>	29 166,66	$0,00342857 =$ $= \frac{24}{7\ 000}$	1,1023	22,7845	34,2857	1,120	1	2	9,6	23,15	1	20,67
Одна унция (Tr) на длинную <i>m</i>	32 666,66	$0,0030612 =$ $= \frac{3}{980}$	0,9842	20,3434	30,612	1	1	—	—	20,67	0,892857	18,45 ⁸
Одна унция (Tr) на ме- трическую унцию .	32,150	0,0031104	1	20,67	31,104	1,016	1	—	7,7	21,00	0,90720	18,75 ³
Один долл. золотом на короткую <i>m</i> . . .	602 875	0,00016587	0,533285	1,1023	1,6587	0,054185	—	1	2	1,12	0,048379	1

06 Таблица веса

	Граны	Пеннивейты	Унции Трой (Tr)	Унции Avoirdupois (Avoi)	Фунты Avoirdupois (Avoi)	Граммы	Стоимость чистой пробы	
							США	Англия
Один гран	1	0,041666	0,0020833	0,00228571	0,000142857	0,0648	4,306 ц.	2,125 пенс.
Один пеннивейт .	24	1	0,0500	0,0548571	0,00342857	1,5552	\$ 1,0335	2,24 шилл.
	480	20	1	1,0971428	0,0685714	31,104	\$ 20,67	85 „
	5 760	240	12	13,165714	0,822857	373,248	\$ 248,04	£ 51
	437,50	18,22917	0,911458	1	0,06250	28,35	\$ 18,84	77,474 шилл.
	7 000	291,666	14,58333	16	1	453,60	\$ 301,4375	£ 61,97
Один миллиграмм . .	0,015432	0,000643	0,00003215	0,000035274	0,0000022046	0,0010	0,06645 ц.	0,033 пенс.
Один грамм	15,432	0,643	0,03215	0,035274	0,0022046	1	36,45 ц.	2,73275 шилл.
Один килограмм . .	15 432	643	32,15	35,274	2,2046	1 000	\$ 664,54	£ 136,64

чистого золота принимают за 4,25 фн. стерлингов, т. е. 85 шиллингов или 1 020 пенсов. Фактическая ценность унции равняется 1 019,45 пенса. Для практических целей нет никакого смысла изыскивать большую точность по той простой причине, что пробы лигатуры обычно даются с приближением в $\frac{1}{2}$ миллема, или 1 части на 2 000.

Один доллар \$ 1 принято считать за 4,11224 шиллинга, а один фунт стерлингов за 4,86353 долл. (\$ 4,86353).

¹ F. W. Clarke. *Geochemistry*. „Bull.“ 770, U. S. Geol. Survey, 1924, pp. 12—44.
F. W. Clarke and H. S. Washington. *Composition of the earth's crust*. „Prof. Paper“ 127, U. S. Geol. Survey, 1924.

H. S. Washington. *The chemical composition of the earth*. „Am. Jour. Sci.“ 5th, ser. 9, 1925, pp. 351—378.

V. M. Goldschmidt. *Der Stoffwechsel der Erde*: „Videnskapsselsk. Skr. Math. Nat.“ Kl. 11, 1922.

Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente. I—V. Idem, 4—5, 1924; 7, 1925.

W. Lindgren. *Concentration and circulation of the elements from the standpoint of economic geology*: „Econ. Geol.“ 18, 1923, pp. 419—442.

L. H. Barnett. *The chemistry of the earth's core*. „Jour. Geol.“ 32, 1924, pp. 615—635.

J. H. L. Vogt. *Ueber die relative Verbreitung der Elemente*, etc. „Zeitschr. Prakt. Geol.“ 1898, pp. 225—238; 314—325.

² Эти обозначения в общем соответствуют наименованиям Suess для центра земли *nife* (никель-железо) и для внешних оболочек *simä* — силикат магния и *sial* — силикат алюминия.

³ „Prof. Paper“, 127, U. S. Geol. Surv., 1924, pp. 10—12. Метод пересчета подвергся в свое время некоторой критике; полагают, что слишком большое место уделяется более редким породам и что в действительности состав должен быть более кислотным. Как бы то ни было вышеприведенные данные есть лучшее, что мы в настоящее время имеем.

⁴ В недавнем вышедшем труде G. Berg'a, „Zeitschr. prakt. Geol.“, 1925, стр. 73—79, находим критику данных, представленных Clarke and Washington. Его подсчет приблизительно следующий:

Zn — 0,006; Pb — 0,0008; Mo — 0,0006; Sn — 0,0005; As — 0,00045;

Sb — 0,000025; Cd — 0,000,01; Ag — 0,000,004; Bi — 0,000,003;

Hg — 0,000,002,5; Au — 0,0000001; Pt $n \times 10^{-11}$, Pd $n \times 10^{-13}$, Ra $n \times 10^{-14}$.

⁵ J. R. Don. *The genesis of certain auriferous lodes*: „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 27, 1898, p. 564.

⁶ „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 31, 1901, pp. 798—810; 38, 1907, p. 704.

⁷ F. Haber and J. Jaenicke. „Zeitschr. f. Anorg. Chemic.“ 147, 1925, pp. 156—170.

⁸ J. E. Spurr. „Eng. and Min. Jour. Press.“ 76, 1903, p. 500.

A. Lacroix. *Sur l'origine de l'or de Madagascar*. „Compt. Ren.“ 132, 1901, pp. 180—182.

⁹ Stelzner and Bergeat. *Die Erzlagerstätten*. 1, 1904, p. 1.

¹⁰ Подробности смотри у J. F. Kemp. *What is an ore?* „Jour. Canadian Min. Inst.“ 12, 1910, pp. 356—367. Также „Min. and Sci. Press“ Marc 20, 1909.

¹¹ J. E. Kemp. *Problem of the metalliferous veins*. „Econ. Geol.“ 1, 1905, pp. 207—232.

¹² Beyschlag, Krusch and Vogt. *Die Lagerstätten*, etc. 1, 1909, pp. 187—200.

¹³ J. P. Dunlop. *Metals and ores in 1914 and 1915*. „Mineral Resources“, U. S. Geol. Survey, pt. 1, 1915.

¹⁴ C. H. Fulton. *The buying and selling of ores and metallurgical products*. „Tech. Paper“ 83, U. S. Bureau of Mines, 1915.

¹⁵ *Conversion tables for assay valuations*. „Mines and Minerals“, January, 1909, p. 250.

¹⁶ The United States Min. Bureau and the United States Geological Survey пользуются таблицами, составленными исходя из \$ 20 · 67183462323.

ОБРАЗОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ

Растворение и осаждение

Общий характер. Минерал есть неорганическое тело определенного химического состава, которое мы находим в земной коре. Твердые минералы¹ образуются путем изменения химической энергии в системах, содержащих одну жидкую или парообразную фазу, поэтому их образование обычно свидетельствует о переходе материи из подвижной в менее подвижную форму. В громадном большинстве случаев минералы в природе образуются путем осаждения из растворов², поэтому это осаждение является процессом, играющим первенствующую роль в генезисе минералов.

Пересыщение, а следовательно, и осаждение управляются термодинамическими условиями системы.

Температура и давление являются главнейшими факторами, хотя иногда активными факторами также могут быть электрическая энергия и свет.

Минералы могут образоваться различно:

- 1) пересыщением в растворе;
- 2) путем реакций между жидкостями или жидкими растворами;
- 3) путем реакции между газами или газообразными растворами;
- 4) путем реакции между жидкостями или жидкими растворами и газами;
- 5) путем реакций между твердыми телами и жидкостями или жидкими растворами и газами.

Лишь немногие минералы образуются при температуре ниже точки замерзания воды. Верхняя граница их развития отмечается температурой, при которой они делаются нестойкими или расплавляются.

После начала образования минерала может иметь место концентрация в более крупные массивы или месторождения, путем продолжения тех же процессов или реакций; однако, весьма часто в образовании месторождений участвуют и другие факторы воздействия; под влиянием тяжести тяжелые минералы могут опуститься в более легкой среде по примеру того, как в морской воде падают на дно кристаллы ангидрита, или как магнетит садится вниз в остаточном расплаве пород. Известную роль могут играть процессы выветривания и разрушения, как например, когда самородное золото освобождается из кварцевой породы и концентрируется под влиянием силы тяжести в промышленное месторождение зо-

лота или когда в породе, состоящей из кальцита и фосфорнокислого кальция, первый растворяется, оставляя месторождение фосфоритов, представляющее экономическую ценность.

Влияние давления. Влияние изменения давления по закону Ле-Шателье выражается в следующем: когда давление в системе, находящейся в равновесии, увеличивается, возникают реакции, сопровождаемые сокращением объема, а когда давление уменьшается, происходит реакция, сопровождаемая увеличением объема. Направление, в котором будет иметь место концентрация при изменении давления, может быть предугадано в том случае, когда известно, сопровождается ли растворение увеличением или сокращением общего объема. Если при растворении имеет место уменьшение общего объема системы (как это бывает в большинстве случаев), увеличение давления повысит растворимость; в противоположном случае возрастание давления понизит растворимость³. В общем уменьшение давления, имеющее место, когда растворы переходят в верхнюю часть земной коры, будет благоприятствовать осаждению. Однако, в большинстве случаев влияние давления незначительно. Например, растворимость хлористого натрия (в граммах соли на 1 г раствора) под давлением одной атмосферы составляет 0,264, а под давлением 500 ат — 0,270. В системах, в числе компонентов которых один или два летучи, влияние давления может быть весьма значительным; например, CO_2 , которая удерживается давлением в воде, может вследствие образования бикарбоната повысить растворимость углекислого кальция.

Влияние равномерного, или гидростатического, давления гораздо более слабое, чем влияние напряжения или неравномерного давления. При условии существования одностороннего давления температура расплавления понизится гораздо быстрее, чем в случае давления равномерного, со всех сторон⁴.

Влияние температуры. В водном растворе различных солей или в силикатовом расплаве перемены температуры гораздо более эффективны в смысле вызывания осаждения, чем изменение давления. По закону Ван-Гоффа (Van-Hoff): «Когда температура находящейся в равновесии системы повышается, то возникает реакция, сопровождаемая поглощением тепла; и, наоборот, когда температура понижается, возникает реакция, сопровождаемая выделением тепла⁵. В громадном большинстве случаев повышение температуры способствует растворимости солей, а понижение температуры, скажем, путем охлаждения восходящих термальных вод или магмы способствует осаждению. Общим правилом для солей (которое имеет много исключений) является, что растворимость повышается до температур 75 или 150° С; выше этого предела часто может наблюдаться уменьшение растворившегося количества. Разрывы кривой растворимости обычно свидетельствуют о достижении предела стойкости для данной соли и формы; соли, содержащие меньшее количество конституционной воды, при более высоких температурах выпадают. Во всяком встречающемся в природе горячем сложном растворе понижение температуры обычно вызовет осаждение какого-либо минерала; при непрерывном охлаждении может осадиться целый ряд других минералов, по мере того как будет достигаться предел растворимости каждого из них. Ввиду того, что при изменяющихся условиях, господствующих в земной коре, ни одно соединение не может остаться абсолютно стойким, следует, что раз образовавшиеся минералы могут в дальнейшем вновь перейти в раствор, пере-

несть, вновь отложиться и даже полностью разрушиться, так что составляющие их элементы могут войти в новые соединения.

Осаждение путем испарения растворителя. Содержащиеся в растворе соли, естественно, осаждаются, когда испарение близ поверхности настолько сокращает количество растворителя, что имеет место пересыщение. Результатами такого процесса, как всем известно, являются залежи в различных формациях гипса и соли. В некоторых случаях растворителем могут являться CO_2 или другие газы; например, осаждение углекислого кальция имеет место в источниках в том месте, где они выходят на поверхность, в том случае, если выделяется CO_2 , удерживающая соль в растворе в виде бикарбоната.

Осаждение путем реакций между растворами. Смешивание различных растворов является одним из наиболее обычных явлений природы, как например, когда воды рек вливаются в море, или когда восходящие горячие воды встречаются с поверхностными водами иного состава, или когда различные растворы сталкиваются в клетках организмов. Осажденные химических соединений имеет место в тех случаях, когда определенные сочетания различных ионов в растворе могут образоваться в достаточном количестве, чтобы быть нерастворимыми в присутствующей жидкости. В природе растворы обычно сложные и сопровождаются сталкиванием различных реакций. В общем, согласно закону Nernst, растворимость отдельной соли понижается от присутствия в растворе другой соли, имеющей одинаковый с ней ион, и повышается в присутствии другой соли, обладающей иным ионом. Например, растворимость хлористого свинца понижается в присутствии хлористого кальция или магния. Присутствие щелочных карбонатов понижает растворимость FeCO_3 ; растворимость NaCl понижается в присутствии CaCl_2 ; тогда как растворимость CaSO_4 (гипс) повышается в растворе NaCl . Если кальцит обрабатывается насыщенным раствором FeCO_3 , ZnCO_3 , MgCO_3 , то часть кальцита растворится, тогда как соответствующая часть других карбонатов выпадет из раствора; растворимость CaCO_3 в воде повышается в присутствии N_2SO_4 или NaCl , но понижается в присутствии MgCO_3 .

В смешанных растворах осаждение часто задерживается, что видно, например, из замедленного осаждения BaSO_4 , приписываемого присутствию хлористых натрия и магния в некоторых рудничных водах, состоящих из соляных растворов. Закон Nernst объясняет эти аномалии.

Медленное осаждение жидких растворов обычно имеет следствием образование крупных кристаллов, тогда как быстрое осаждение имеет результатом образование коллоидов и тонких порошков.

Осаждение путем реакции между водными растворами и твердыми телами. В природе растворы непрерывно воздействуют на твердый минерал. На поверхности все породы и месторождения минералов смачиваются дождевой водой, которая при наличии пористости, трещиноватости или раздробленности может также спускаться до значительной глубины. Восходящие горячие воды просачиваются в породу через трещины, по которым они выходят на поверхность. Эти различного рода воды в большей или меньшей степени воздействуют на минералы; последние разлагаются и частично или полностью переходят в растворы. Из этих растворов в открытых пространствах (в пустотах) отлагаются новые минералы, что и является весьма обычным способом образования минералов. Но изменения продолжают также протекать и в самих корен-

ных породах, и такие процессы, посредством которых новые минералы могут занять место старых, называются метасоматизмом или замещением. Вода проникает в породу по капиллярным трещинам, как результат известного явления — адсорбции; пленка жидкости на коренных породах содержит более чем среднее количество материала в растворе, и эти пленки, перенасыщаясь раньше остального раствора, способствуют ускорению химических реакций. Таким образом, может иметь место изменение минералогического характера и структуры пород: хлорит может заместить авгит, а серицит и кварц — полевые шпаты.

Путем замещений часто образуются металлургические руды. Известняк может, например, оказаться насыщенным раствором серноокислого цинка, в результате чего углекислый кальций заместится углекислым цинком, причем структура известняка останется неизменной, между тем как серноокислый кальций окажется вынесенным из раствора. Замещающий материал не должен непременно содержать тот самый элемент, который входит в состав замещаемой породы. Пирит или галенит могут заместить полевые шпаты или зерна кальцита. Замещающий минерал может также развиваться в более старом минерале в виде совершенных кристаллов. Явления замещения играют весьма крупную роль в генезисе месторождений.

Осаждение путем реакций между газами или между газами и растворами. Газы могут вызывать осаждение из растворов. В некоторых рудничных водах присутствующий сероводород осаждает полусернистую медь из серноокислой. Насколько меньшее значение имеет действие, происходящее между газами: в вулканических областях самородная сера может осаждаться смесью сероводорода и двуокиси серы.

Кристаллические минералы. Минералы могут осаждаться в виде кристаллоидов или в виде коллоидов. В месторождениях, образующихся на значительной глубине и при температурах более высоких, чем те, которые преобладают на поверхности, присутствуют почти исключительно кристаллоиды, так же как и в изверженных и метаморфических породах. Молекулы распределяются по законам симметрии одной из шести кристаллических сингоний, образуя гомогенные зерна или кристаллы какого-либо минерала. Кристаллические минералы развиваются всего лучше путем осаждения в растворах, содержащихся в открытых пространствах; при таких условиях свободные кристаллы могут образоваться в силикатных расплавах или магмах и в водных растворах. Там, где кристаллы прилипают к бокам заполненных водой трещин, могут образоваться корочки минералов, что мы часто и видим в жилах. Первый толчок к кристаллизации, быть может, дается адсорбцией и перенасыщением вдоль боков. Раз кристаллизация уже началась, крупные кристаллы растут вследствие того, что мелкие кристаллы растворяются быстрее, чем крупные, и жидкость остается пересыщенной по отношению к крупным кристаллам⁶. Когда кристаллизация протекает в растворе от многих точек, образуется зернистая текстура, вследствие того что кристаллы мешают взаимному росту. В минеральных месторождениях текстура обычно довольно крупная; лишь весьма редко мы видим мелкозернистые агрегаты, по размерам приближающиеся к плотной общей массе изверженных порфиритовых пород. Значительное разнообразие текстур получается путем замещения плотной породы; такие текстуры в общем аналогичны текстурам метаморфических пород.

Коллоиды⁷. Вместо того чтобы принимать кристаллическую форму, многие минералы отлагаются в виде постепенно затвердевающих желатиновидных или хлопьевидных масс. Такие массы называются коллоидальными минералами или коллоидами. Коллоиды состоят из частиц различной степени дисперсии, по размеру варьирующих от сравнительно крупных суспензий до почти молекулярных подразделений. Коллоидальная смесь представляет гетерогенную двухфазовую систему, в которой одна фаза, делящаяся на мелкие отдельные объемы, известна под названием *дисперсной фазы*, а другая — под названием *дисперсной среды*. В рассматриваемом здесь случае дисперсной фазой может быть жидкость или кристаллоид; дисперсная среда — жидкая, обычно вода. Дисперсная система этого рода часто на вид гомогенна и прозрачна, иногда переливчатая; она обычно носит название золя.

Дисперсная фаза может отделиться от смеси в желатиновидной или хлопковидной форме, удерживая в себе некоторое количество среды. Золи бывают двух родов, а именно:

Суспензии. В этих золях дисперсной фазой является твердое тело. Вязкость — низкая; они не принимают желатинообразного вида, но при добавлении электролита выпадает хлопьевидный осадок, который весьма трудно вернуть в состояние золя. Примером могут служить пурпуровые или красные золи золота и золи многих других металлов; также золи сульфидов, например сульфидного мышьяка. Последний золь образуется в виде желтой жидкости, когда к раствору закиси мышьяка добавляется сероводород. Небольшое количество переходящего в желатиновидное состояние коллоида препятствует коагуляции коллоидальных суспензий электролитами. Так например желатин или золь кремнезема, будучи в коллоидальной суспензии, может сохранить хлористое серебро на неопределенно продолжительное время.

Эмульсии. Полагают, что в этих золях дисперсной фазой является жидкость. По охлаждению или испарении образуется желатиновидная масса, или гель. Эмульсии обладают высокой вязкостью и не всегда коагулируют с электролитами, хотя некоторые электролиты вызывают внезапное схватывание золя в желатиновидную массу, которую в свою очередь можно вновь перевести в раствор. Примерами эмульсий могут служить золи желатина, альбумина, кремнезема и водной окиси церия. Золи водных окислов, например, олова, железа, хрома и алюминия обладают некоторыми свойствами, которые, повидимому, ставят их в связь с эмульсионными золями.

Золи с трудом проходят через мембраны, например пергамент или пузырь; это, повидимому, объясняется тем, что частицы крупнее, чем поры мембран. Электролиты же, с другой стороны, легко проходят через такие мембраны.

В золях важнейшими факторами являются поверхность и поверхностное натяжение. Реакции, имеющие место между золями, сильно отличаются от тех, которые происходят между электролитами. В природе гель и коллоидные осадки часто затвердевают в округленные почкообразные массы, о которых говорят, что они «коллоформные» (colloform). Отвердевшие коллоиды стремятся приобрести кристаллический характер и могут превращаться в волокнистые или крупнокристаллические агрегаты. Такие выкристаллизовавшиеся коллоиды можно назвать «метаколлоидами»⁸. Состав коллоидальных минералов весьма разнообразен;

это объясняется особым свойством коллоидов поглощать посторонние вещества. Они часто содержат воду.

Коллоидные минералы образуются в изобилии в открытых пространствах внутри окисленной зоны или вблизи поверхности, но до известной степени они могут развиваться и при более высоких температурах. В сплошных породах коллоидные минералы могут замещать более старые минералы сначала в качестве гелей; в дальнейшем они выкристаллизовываются до метаколлоидов.

Из аморфных гелей, составляющих распространенные в природе минералы, можно упомянуть опал, лимонит, галлоизит и гарниерит. Примеры выкристаллизовавшихся коллоидов (метаколлоидов) многочисленны. Пирит, марказит, вурцит, малахит, смитсонит, псиломелан и хризоколла часто коллоидного происхождения⁹.

¹ К жидким минералам относятся только вода, ртуть и некоторые гидрокарбонаты. Последние, так же как и некоторые быстро остывшие жидкости, например обсидиан (стекло), не принято, однако, считать минералами, так как они не имеют определенного состава, который может быть выражен химической формулой.

² Некоторые химические реакции, участвующие в образовании новых минералов, видимо, могут возникнуть при взаимодействии твердых веществ под действием высокой температуры и давления, но возможно так же, что и в этой системе присутствует парообразная или текучая фазы.

В минералах, подвергающихся полиморфизму, при определенных критических температурах расположение молекул может изменяться. Для этих продуктов во многих случаях отдельных названий не дается, как-то: α -кварц и β -кварц, халькозин изометрической и ромбической сингоний. В других случаях даются новые названия, как-то: сфалерит и вурцит— ZnS ,— изометрической и ромбической сингоний.

³ Alexander Findlay. The Phase Rule. 1923, p. 87.

⁴ John Johnston and Paul Niggli. The general principles underlying metamorphic processes. „*Jour. Geol.*“ 21, 1913, pp. 481—516; 588—624.

John Johnston. Pressure as a factor in the formation of rocks and minerals. „*Jour. Geol.*“ 23, 1915, pp. 730—747.

⁵ Alexander Findlay. The phase rule. 1923, p. 46.

⁶ W. Ostwald. The scientific foundations of analytical chemistry. 1900, p. 22.

⁷ Emil Hatschek. An introduction to the physics and chemistry of colloids. London and Philadelphia, 1922. Особо рекомендуется вследствие своей краткости и ясности.

W. Ostwald. Handbook of colloid chemistry. 1915.

⁸ E. T. Wherry, „*Jour. Washington. Acad. Sci.*“, 4, 1914, p. 112.

⁹ W. Lindgren. The colloidal chemistry of minerals and ore deposits, in Theory and Application of Colloidal Behavior. R. H. Bogue, Editor, New York, 1924.

H. C. Boydell. Role of colloidal solutions in the formation of mineral deposits. „*Trans. Institution of Min. and Met.*“ (London), Dec., 1924.

W. Lindgren. Metasomatism. „*Bull. Geol. Soc. Am.*“ 36, 1925, pp. 247—261.

АТМОСФЕРА, ГИДРОСФЕРА И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду того, что минералы образуются преимущественно в жидкой фазе, необходимо рассмотреть различные среды жидкостей и газов: 1) атмосферу; 2) гидросферу, в которую входят океаны, озера и реки, и 3) подземные воды.

АТМОСФЕРА

Объемный состав атмосферы дается в помещаемой ниже таблице. Исключая пыль и коллоидальные дисперсии, в ней не содержится посторонних веществ. Для генезиса месторождений минералов атмосфера имеет большое значение, так как вода, углерод, уголекислоты и кислород способствуют окислению пород и образованию рудных месторождений в зоне выветривания. Фиксация азота организмами и электричеством может иметь геологическое значение. Галоидные соли переносятся в виде присутствующей в атмосфере пыли из солончаков и океанов или из вулканических излияний, и в окисленных зонах рудных месторождений образуются хлористые или бромистые соединения. Как следствие вулканических извержений или индустриальных процессов в атмосфере может оказаться и некоторое количество двуокиси серы и сероводорода.

Состав атмосферы и гидросферы * (в процентах)

Объемный состав атмосферы		Средний состав воды в океане	
Азот	78,03	Кислород	85,79
Кислород	20,99	Водород	10,67
Аргон	0,94	Хлор	2,07
Водяные пары различно		Натрий	1,14
Уголекислота	0,03	Магний	0,14
Водород	0,01	Кальций	0,05
Неон	0,00123	Калий	0,04
Гелий	0,0004	Сера	0,09
Криптон	0,00005	Бром	0,008
Ксенон	0,000006	Углерод **	0,002
		Средняя соленость	3,5

Итого . 100,00

* F. W. Clarke and H. S. Washington. The composition of the earth's crust. „Prof. Paper“ 127, U. S. Geol. Survey, 1924, p. 33.

** В карбонатах и органических веществах.

ГИДРОСФЕРА

Океан. В вышеприведенной таблице средний состав воды в океане по элементам заимствован у Clarke и Washington из приведенного выше труда. В согласии с тем же источником состав присутствующих в океане солей (в %) следующий:

NaCl	77,76
MgCl ₂	10,88
MgSO ₄	4,74
CaSO ₄	3,60
K ₂ SO ₄	2,46
MgBr ₂	0,22
CaCO ₃	0,34
	100,00

Вещества, присутствующие в морской воде в небольшом количестве, можно свести в следующую таблицу, данные для которой заимствованы из K o t h «Allgemeine und Chemische Geologie», т. I; K r u m m e l «Handbuch der Oceanographie» и C l a r k e «Geochemistry». Все цифры даются в миллиграммах на литр.

Алюминий присутствует в количестве не более нескольких мг		Железо присутствует ** в количестве нескольких мг	
Аммоний (NH ₃)	0,13—1,34	Свинец присутствует ***	
Мышьяк	0,01—0,08	Литий	
Бор присутствует в небольшом количестве		Марганец	
Барий присутствует		Никель и кобальт ****	
Цезий		Фосфор менее	1,0
Медь *		Рубидий	15,0
Фтор	0,3—0,8	Кремнезем присут. в среднем	1,0
Золото присутствует	—	Серебро присутствует (см. стр. 10)	—
Иод	0,05—2,38	Стронций присутствует	—
		Ванадий *****	—
		Цинк	0,002

Морская вода содержит также около 45 мг CO₂ на литр и водород, азот и другие инертные газы, количество которых обуславливается температурой. W. Ditmar¹ установил, что в одном литре морской воды воздух присутствует в количестве 14—28 см³; этот воздух содержит 35,01 и 33,11% кислорода. Таким образом, растворенный воздух более богат кислородом, чем обыкновенный воздух. Количество свободной CO₂ и HCO₃ изменяется, но в действительности CO₂ в морской воде присутствует в количестве в 27 раз большем, чем в воздухе. Между свободным CO₂ и CO₃, связанным в бикарбонатах в виде HCO₃, существует неустойчивое равновесие. Океан может рассматриваться как великий регулятор содержания CO₂ в воздухе.

В замкнутых или плохо вентилируемых бассейнах морская вода мо-

* В моллюсках и водорослях; Dieulafait говорит, что также в морской воде.

** В большом количестве в золе организмов.

*** В золе водорослей.

**** В золе водорослей.

***** В голотуриях.

жет содержать сероводород; например, в самых глубоких слоях Черного моря этот газ содержится в количестве 600—700 см³/л. Близ берегов, в присутствии большого количества органических веществ, могут местами образоваться газообразные углеводы.

В литторальных и неритовых зонах океанов могут образовываться различные месторождения минералов, как например минеральные соли, железные руды, марганцевые руды, фосфориты, глины, известняки; образуются эти месторождения преимущественно путем разнообразных химических и биохимических реакций, имеющих место между морской водой и организмами, между морской водой и породами, между морской водой и пресной водой и, наконец, путем испарения.

Соотношение, существующее между компонентами вод в океане, всегда следующее: $Cl > SO_4 > CO_3$; $Na > Mg > Ca$.

Озера и реки ². Вода рек и проточных озер часто очень чиста, так как ее непосредственным источником является падающий на землю дождь. Это в особенности относится к водам, текущим в ледниковых областях по кристаллическим породам. Соленость таких вод может быть не более 14 частей на миллион. Почти всегда преобладает соотношение $CO_3 > SO_4 > Cl$ и $Ca > Na > Mg$. Содержание кремнезема разное, но часто высоко и доходит до 20% растворенного материала. Железо в виде Fe_2O_3 и глинозем Al_2O_3 часто присутствуют в количестве свыше 1%.

В водах чрезвычайно засушливых местностей и в осадочных породах соленость быстро возрастает, доходя часто до нескольких сот частей на миллион. Радикал SO_4 также повышается, точно так же и хлор, в некоторых местах до такой степени, что вышеупомянутое соотношение изменяется до $SO_4 > CO_3 > Cl$. В тропических странах, где растительность чрезвычайно богата, количество органического вещества может составлять до 50% общего остатка. В таких случаях количество кремнезема также может весьма возрастать, и этому возрастанию обычно сопутствует значительное количество Fe_2O_3 и Al_2O_3 ; последние, вероятно, оба присутствуют в виде коллоидов. Некоторые реки бассейна Амазонки содержат до 13% $Al_2O_3 + Fe_2O_3$. Марганец, по всей вероятности, постоянно присутствует в пресных водах.

Состав речных вод прежде всего зависит от характера геологических образований, по которым течет река. Различного рода химические реакции обуславливают и непрерывно изменяющийся неустойчивый характер речных вод. Во многих местах наблюдается загрязнение, объясняемое близостью жилья или заводов.

Некоторые месторождения минералов образуются в озерах и реках. Среди таких назовем глины, железные руды, марганцевые руды, инфузорию и соли; однако, по своему значению они вряд ли сравнимы с теми, которые образуются на океанском побережье.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

Метеорные воды. Из вод этого рода наиболее обильны воды атмосферного или метеорного происхождения, из дождя, который падает на поверхность воды рек и ручьев, озер и современных океанов. Эти воды просачиваются в землю по трещинам и капиллярным пустоткам. Часть этих вод остается в породах, часть же под действием гидростатического

давления поднимается вверх и вновь присоединяется к гидросфере или атмосфере³. Газы частично растворяются в воде, в частности кислород, азот, аргон, гелий, CO₂ и метан. Частично эти же газы образуются вследствие подземных реакций.

Магматические или ювенильные воды. Вода магматического происхождения существовала в расплавленном силикатовом растворе, представляющем собою магму. Это — наиболее обильный из летучих компонентов; многие из последних увлекаются ею в момент освобождения воды при кристаллизации или при извержении магмы в более высокие горизонты земной коры. Из магматических газов назовем азот, аргон, двуокись углерода, сероводород и пр. Часть их находится в воде в растворенном состоянии, часть же в свободном состоянии. Часть газов присоединяется к атмосфере и к гидросфере.

Скрытые воды. Небольшое количество метеорных или атмосферных растворов или газов могут навсегда или на время выводиться из циркуляции, оставаясь в капиллярных трещинах или включениях в минералах или входя в их химический состав. Под влиянием тепла, давления и химического действия часть этих скрытых вод может вернуться в свободное состояние, когда породы опускаются в перегретые зоны или когда их поглощает поднимающаяся магма. Хотя никто не сомневается в том, что магма содержит первичную воду, некоторое небольшое количество последней может в нее вводиться из погруженных в магму расплавляющихся пород⁴. Вода⁵, сингенетичная породам (connate water), есть морская вода из древних океанов, которая в течение геологических периодов оставалась скрытой в осадках этих морей. Не имеется ни физического, ни химического критерия, при помощи которого можно было бы твердо установить происхождение той или иной воды. Все эти воды в действительности являются растворами иногда жидкими, в других случаях сильно сконцентрированными. Дождевая вода, конечно, наиболее чиста, за ней следуют речная, ручьевая и вода океана. Если бы можно было сделать различие между поверхностными водами и магматическими, то все же данные были бы слишком гадательными и обуславливались бы геологической структурой, литологической историей, выпадением осадков и дренирующими бассейнами. Естественно, что магматические растворы, поднимаясь, разбавляются водами метеорного происхождения.

¹ Challenger Repts., I, 1884, p. 203.

² E. W. Clarke. Data of geochemistry. „Bull.“ 770, U. S. Geol. Survey, 1924 Chap. 3.

³ Reginald A. Daly. Genetic classification of underground volatile agents. „Econ. Geol.“ 12, 1917, pp. 487—504.

Daly говорит, что термином „vadose“ (vadus — неглубокий) Poserпу пользуется в отношении нисходящих вод выше уровня грунтовых вод, т. е. водосборной зоны (гл. III). В литературе им пользуются в различных смыслах, причем в каждом отдельном случае подразумевается и определенная часть атмосферных вод. Казалось бы, что наука может обойтись и без термина „vadose“. Следуя примеру Archibald Geikie, Daly предлагает термин „apigene“, который охватил бы грунтовую деятельность как пресных, так и морских вод. Термин „phreatic“, который Daubr e дает какой-то неопределенной части метеорных вод, также излишен.

⁴ R. A. Daly. „Am. Journ. Sci.“ 4th, ser. 26, 1908, p. 48. Igneous rocks and their origin. New York, 1914, p. 249. Daly называет такие воды resurgent.

⁵ A. C. Lane. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 19, 1908, p. 502.

ЦИРКУЛЯЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Общая часть¹. Значительная часть дождевой воды стекает в поверхностные стоки; некоторая часть испаряется, но определенное количество просачивается в почву и в пористые и трещиноватые породы. Эта часть осадков пополняет почвенную воду, и, если осадки выпадают в достаточном количестве, вода насыщает материал до определенной (различной) глубины. Верхняя граница насыщенности зоны, которая узнается по глубине, на которой вода стоит в колодцах и шахтах, называется горизонтом воды, горизонтом грунтовых вод или гидростатическим горизонтом. По существу этот горизонт имеет неровную поверхность, которая лишь слабо отражает на себе топографические особенности (рис. 1). Вода может проникать до значительных глубин, в особенности по трещинам; сила тяжести и теплота часто определяют циркуляцию грунтовой воды таким образом, что она после продолжительного пребывания под землей вновь может выйти на поверхность. Грунтовые воды выполняют весьма значительную геологическую работу, вызывая растворение и осаждение, следствием которых является концентрация полезных ископаемых. Отрасль геологии, имеющая дело с подземными водами, называется гидрогеологией.

В земной коре присутствуют также и другие воды. Временами морская вода может проникать в породу, или может оставаться в скрытом состоянии в древних осадках. Существует небольшой класс горячих вод, восходящих из больших глубин, которым многие геологи приписывают магматическое происхождение, т. е. считают, что они выделились из остывающих магм. Какое бы значение ни имели эти воды в образовании некоторых видов минеральных месторождений, количество их весьма невелико по сравнению с водой атмосферного происхождения, содержащейся в породах.

Поры и трещины в породах. Все породы в той или иной степени пористы и могут впитывать воду. Под словом «пористые» подразумевается процентное отношение пространства, занимаемого порами, к общему объему породы. Относительная абсорбция определяется отношением между весом абсорбированной воды и весом исследуемой породы. Когда поры совершенно наполнятся, про породу говорят, что она насыщена, но насыщенность породы, после того как она отдаст свою воду, все же сохраняет часть ее в стенках пор. Пространства, занимаемые порами, колеблются от доли процента до 40%. В свежих гранитах и подобных им компактных породах пористость колеблется между 0,2 и 0,5,

в известняках — между 0,53 и 13,36, а в песчаниках — между 5 и 28%.

Если предположить, что песок состоит из круглых зерен, слежавшихся насколько возможно компактно, пространство между зернами, или пористость, выразится в 25,95%.

Пористость наибольшая — в рыхлом песке и гравии, где она колеблется между 32 и 40%. Абсорбированную воду можно назвать «свободной водой» в отличие от той, которая существует в химическом соединении в минералах и породах. Вся свободная вода не может называться продуктивной (например в колодцах), ввиду того, что некоторые породы, как например глина, имеют свойство удерживать в своих порах довольно значительное количество воды.

Пути циркуляции подземных вод в породах можно подразделить на следующие виды: 1) трещины, размер которых более капиллярных, называемые сверхкапиллярными, 2) капиллярные трещины и 3) субкапиллярные трещины. Для воды трещины более крупные, чем капиллярные, можно представить себе в виде трубок круглого сечения, диаметр которых превышает 0,058 мм, или же отверстий, которые мы видим в сбросах, спайностях и пр. и ширина коих превышает 0,254 мм. Капиллярными путями, или отверстиями, называются те, размер которых меньше вышеупомянутых, но которые все же больше отверстия, где молекулярное натяжение пленки жидкости преобладает в плоскости сечения капиллярного отверстия; к таким отверстиям приложимы законы капиллярного движения вод. В субкапиллярных отверстиях молекулярное натяжение распространяется от одной стенки к другой, и к этому классу можно отнести трубки диаметром меньше 0,0002 мм и открытые пустоты шириной меньше 0,0001 мм. Сферы молекулярного притяжения по G. Bakker² лишь в 6 или 7 раз больше диаметра молекулы и, следовательно, если это так, капиллярное движение может иметь место в трубках значительно меньшего размера, чем 0,0002 мм.

Движение воды через сверхкапиллярные отверстия почти следует обычным законам гидростатики, но вследствие трения может иметь место некоторое замедление. Сверхкапиллярными отверстиями могут быть названы многие сбросы, трещины спайности, отдельности, наслоения и пустоты в грубых осадочных породах. В капиллярных отверстиях движение действительно чрезвычайно медленно, так что многие породы,

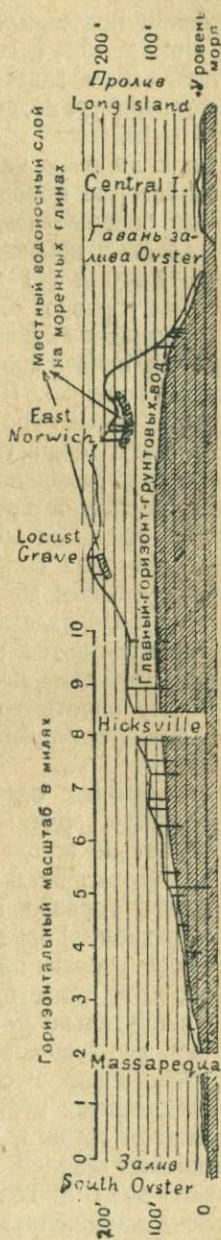


Рис. 1. Разрез через Long Island (Лонг Айланд), показывающий положение уровня грунтовых вод. Верхняя часть разреза показывает зону накопления с местными уровнями грунтовых вод, обусловливаемыми присутствием водонепроницаемых пород. Зона стока между уровнями грунтовых вод и уровнем моря. Статическая зона ниже уровня моря (заимствовано из ("Prof. Paper" 44, U. S. Geol. Surv.).

в которых они присутствуют, как например глинистые сланцы и глины, считаются непроницаемыми. В субкапиллярных отверстиях вода удерживается в виде пленки, прилипшей к их стенкам; свободная вода и движение отсутствуют.

В движении подземных вод капиллярные силы играют значительную роль, но они не могут создать непрерывного течения, и по сравнению с гидростатическим давлением их значение второстепенное. При более высоких температурах действие уменьшается и на критических точках доходит до нуля.

Пустоты в породах не могут существовать до бесконечной глубины, хотя очень твердые породы, подобно граниту, могут выдержать на глубине гораздо большее давление, чем на поверхности. Опыты, проведенные F. D. Adams³, показали, что в граните пустоты могут существовать на глубине 17 600 м (11 миль). Большинство же пород становятся пластическими на гораздо меньшей глубине и деформируются без разрыва. При таких условиях активная циркуляция воды затрудняется.

Позднее на основе широко проведенных опытов Bridgmann⁴ пришел к тому же заключению. По его мнению весьма вероятно, что мельчайшие трещины, по крайней мере достаточно крупные для того, чтобы они могли пропускать воду, существуют в более крепких породах на глубинах, соответствующих давлению от 6 000 до 7 000 кг/см².

Воды в песках и гравиях. В рыхлых породах, подобных песку и гравии, столь обильных вблизи поверхности, вода спускается до глубины, на которой материал оказывается насыщенным; эта глубина и является горизонтом грунтовых вод. В долинах горизонт воды находится близ поверхности, на водоразделах он несколько повышается. Грунтовые воды медленно передвигаются от водоразделов по направлению к долинам; значительные движения продолжаются и под долинами и над последними вниз по уклону вплоть до озер и морей. Такое движение доказывается введением флюоресцирующих и других индикаторов в колодцы и скважины.

Воды в породах однородной текстуры. В однородных породах, подобных граниту, вода не только присутствует в порах, но довольно легко протекает по всегда присутствующим трещинам. Значительное количество воды может оставаться в породе, хотя на единицу объема породы это количество гораздо менее значительно по сравнению с рыхлыми песками и гравием. Горизонт грунтовых вод здесь также представляет неровную поверхность, приблизительно воспроизводящую топографический рельеф, хотя менее ярко выраженную. Высота горизонта грунтовых вод может значительно колебаться в зависимости от выпадения осадков. Выше уровня грунтовых вод обычно наблюдается на несколько метров вечно влажная зона. Это поднятие воды объясняется существованием в породе капиллярных пустот.

В упомянутом труде J. W. Finch толщу пород над горизонтом грунтовых вод называет «зоной водосбора» или «зоной просачивания». В ней присутствуют вода и воздух, перемещающиеся вниз к «насыщенному поясу». «Зона насыщения» существует даже в самых безводных местностях. Однако, «пояс насыщения» может и отсутствовать, и тогда вода будет просто просачиваться вниз, постепенно уменьшаясь в количестве, пока не исчезнет вовсе.

В насыщенном поясе можно различить «зону течения», в которой

вода движется в горизонтальном направлении от водоразделов к долинам благодаря силе тяжести⁶. В этой верхней части зоны движение воды обычно бывает быстрее, чем в нижней, где оно замедляется возрастающим давлением и плотностью пород. При некоторых условиях часть воды может испаряться и часть химически связываться в виде гидратов.

Еще ниже располагается (Finch) «статическая зона». Она залегает ниже самого низкого уровня истечения (т. е. уровня стоячих вод в данной местности) и содержит воду перемещающуюся. Количество воды в этой зоне книзу постепенно уменьшается, если нет водоупорных пород, над которыми может скопиться значительное количество воды. Отсутствие воды на значительных глубинах ниже зоны стоячих вод подтверждается наблюдением в горных выработках. В некоторых местах на глубине 450 м (1500') можно наблюдать нижнюю границу этой зоны. Однако, нет

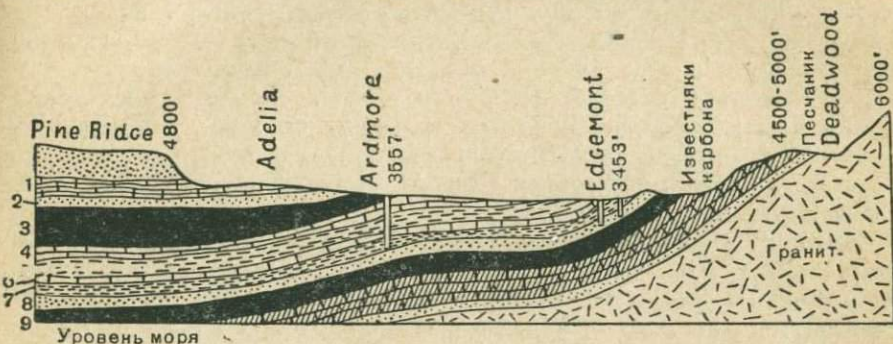


Рис. 2. Разрез от Black Hills (Блэк Хилс, Южная Дакота) до Pine Ridge через провинцию Tall River, показывающий отношение водоносных песчаников Дакота к вмещающим породам. Вертикальный масштаб преувеличен (заимствовано у Н. К. Darton, U. S. Geol. Surv.).

1—глины Брюл; 2—пески Чадрон; 3—сланцы Пирра; 4—мел Ниобрара; 5—сланцы Карлайл; 6—известняки Гринхори; 7—сланцы Гранерос; 8—песчаники Дакота; 9—юра-триас.

никакого сомнения в том, что некоторое количество «горной влажности» можно наблюдать и на больших глубинах.

Воды в пластовых осадочных породах. Среди осадочных пород имеются водонепроницаемые породы, подобно глине и глинистым сланцам, которые чередуются с породами более пористыми, как песчаники и известняки. При таких условиях распределение просачивающихся с поверхности вод может быть *неравномерным*. Вблизи поверхности может существовать местный горизонт воды, книзу же водоносные пласты могут чередоваться с почти сухими. Каждый пласт или однородная свита могут иметь свои отдельные зоны «просачивания», «течения» и «статическую». Ярким примером является меловой песчаник Дакота, пористый по текстуре, в котором собирается значительное количество грунтовых вод. На всей площади Great Plains (Великих равнин) эти резервуары воды доступны для эксплуатации артезианскими колодцами на расстоянии 300 миль от выхода на поверхность пород водоносного горизонта; колодцы проходятся иногда до глубины 1 000 м (3 000') (рис. 2). Kemp и Fuller указывают, что глубокие толщи осадочных пород часто являются сухими. Колодец в Wheeling (Зап. Вирджиния) глубиной 4 262' — ниже 1 500' шел по совершенно сухим породам. В Northhampton (Massachu-

setts) и в New Haven (Connecticut) скважины, опущенные на глубину 3 800', не достигли воды

В Goff и Lake (Зап. Вирджиния), а также в Geary (Пенсильвания) буровые скважины на воду имеют глубину 7 386', 7 579' и 7 248'. Все три скважины прошли в осадочных породах. В скважине Goff ниже 2 307' вода не появилась, а в скважине Lake она не появилась на глубине ниже 2 118'. В скважине Geary из некоторых пластов ниже 6 045' появилось значительное количество самоизливающейся соленой воды. Однако, возможно, что хотя в первых двух скважинах глубокие пласты в общем не были пористы, они все же могли содержать некоторое количество влаги⁶.

Влияние трещин. Описанные выше несложные условия в значительной мере нарушаются, когда имеет место широкое развитие трещин и создаются пути, по которым вода может передвигаться при относительно нормальных гидростатических условиях. Уходя сравнительно медленно вглубь, по серии тонких извилистых трещин, вода может встретить открытые пути в виде крупных сбросов и трещин, по которым может быстро подняться до гидростатического уровня. Трение во время спуска значительно уменьшает, теоретически, напор, но ясно, что в областях с сильно нарушенным геологическим строением, например в Альпах или в Скалистых горах, при этих условиях могут возникнуть мощные восходящие ключи.

При выходе на поверхность они могут быть горячими и в местностях, где в недалеком прошлом отсутствовали молодые интрузии, их температура может служить критерием той глубины, с которой поднялась вода. Температура таких ключей редко превышает 65° С и состав содержащихся в них солей соответствует характеру пластов, через которые они проходят. Если мы предположим (а этому имеются основания), что за время восхождения вод они теряют лишь незначительную часть тепла, то вода, обладающая вышеупомянутой температурой, должна иметь своим источником глубину приблизительно 5 500'. Обширные области земного шара, как например Скандинавский полуостров, вовсе лишены горячих ключей; в восточной части континента Америки их весьма мало. Fuller говорит следующее: «Результаты бурения в осадочных и кристаллических породах, так же как и исследование глубоких рудников, показывают, что вода, по всей вероятности, обычно не присутствует в породах под большим давлением, хотя таковое и может иметь место в отдельных трещинах. Полагают, что, за исключением редких случаев, гидростатические воды отсутствуют на глубине, превышающей 10 000', и что в действительности предполагаемая глубина 6 520 м или 20 000' в качестве границы зоны открытых пустот близка к истине...»

Если бы воды свободно циркулировали на больших глубинах внутри зон разломов, то горячие ключи были бы гораздо более обычным явлением по многочисленным сбросам в областях Piedmont, Appalachian и др.⁷

Van Hise полагает, что понижение плотности и вязкости воды при высоких температурах может ослабить напор, необходимый для того, чтобы ключи могли подниматься к поверхности, но можно сомневаться, чтобы эти факторы могли уравновесить весьма значительное трение, имеющее место при проникании вод в глубину. Образование сбросов и горообразующие процессы вызывают развитие тепла, а это нарушение условий температуры может иметь следствием активизацию циркуляции присутствующей в породах воды.

Роль вулканизма. Когда магмы внедряются в зону разлома, условия циркуляции вод становятся более сложными. Некоторые полагают, что атмосферные воды могут спускаться до глубин и там поглощаться магмами, но эта точка зрения представляется невероятной. До своего вторжения в зону разлома магма находится на несравненно большей глубине, чем та, которая доступна проникновению вод с поверхности. Часто приводят известный опыт Daubrée, в котором показывается, как вода может пройти сквозь диск песчаника под определенным противодавлением пара. Сущность этого опыта была не так давно критически исследована⁸, и было установлено, что в опыте имеется крупная ошибка. Выявилось, что «вероятности говорят против того, чтобы сколько-нибудь значительное количество метеорных вод могло проникать в глубоко залегающие и сильно раскаленные массивы пород». Несмотря на это, весьма вероятно, что в некоторых вулканах, где имеется обилие поверхностных вод, последние могут достигнуть горячих лав и повысить их активность и температуру⁹.

Присутствие нагретого магматического тела в зоне разлома, несомненно, должно ускорить циркуляцию воды, так как создаются конвекционные токи и имеет место возгон воды из места ее скопления. Сомнительно, чтобы этого действия было достаточно для объяснения многочисленности и большего объема горячих ключей, восходящих в вулканических областях; полагают, что магма сама выделяет большую часть своей конституционной воды, частично при своем передвижении в более высокие горизонты, частично же при кристаллизации в массивные породы.

Выводы. В заключение следует сказать, что вода, в количестве достаточном для того, чтобы могла иметь место восходящая циркуляция, только в исключительных случаях достигает глубины 10 000' и что, за исключением тех областей, где имеют место большие тектонические нарушения, активная циркуляция ограничивается верхней зоной мощностью в несколько тысяч метров. Глубина деятельной циркуляции чаще отвечает уровню, на котором вода выходит на поверхность; ниже этого уровня воды практические стоячие; таким образом, нижняя граница бассейна стоячих вод представляет неправильную поверхность, которая по трещинам лежит глубже по сравнению с участками залегания массивных пород.

Примеры движения вод. Согласно Fuller в скважинах, пройденных в кристаллических породах, воду обычно встречают на глубине, не превышающей 200—300' от поверхности; бурить глубже обычно бесполезно (рис. 3). По словам Fuller нередко бывают случаи, когда при углубке встречают породы, способные удерживать в себе большие количества воды. При исследовании трещин отдельностей в кристаллических породах Connecticut он нашел, что вода присутствует преимущественно в вертикальных трещинах отдельности, которые близ поверхности расположены в среднем на расстоянии 3—7' друг от друга. На глубине трещины быстро уменьшаются или вовсе смыкаются, и поэтому в поисках воды не рекомендуется углубляться свыше 250'. По подсчету E. E. Ellis вода, присутствующая в верхних 2 100' кристаллических пород, составляет лишь 16% ее запаса, или 0,000007 объема породы.

Данные наблюдений, проводимых во многих горных округах, имеют большое значение. В Sierra Nevada (Калифорния) глубокие каньоны разделяются широкими краями, на которых лежат третичные конгломераты и андезитовые туфы. Горизонтом стока вод для всей Sierra служит

Great Valley (Калифорния). В западной части кряжа горячие ключи отсутствуют, и мощных ключей мало, несмотря на большую трещиноватость пород и присутствие многочисленных отдельностей. Горячие ключи встречаются исключительно на восточном склоне кряжа, т. е. района, который в поздний третичный и четвертичный периоды был ареной больших дислокаций и вулканической деятельности. В золотоносных кварцевых жилах, залегающих в древних породах западного склона, в трещинах присутствует большое количество воды до глубины 800 или 1 000'. Ниже воду встречают лишь в незначительном количестве, и многие забои и штреки совершенно сухи; это относится одинаково как к рудникам, расположенным вверх склонов, как например в Nevada City и в Grass Valley, так и к расположенным у подножия холмов, как Mother Lode.

Вторым интересным примером является Cripple Creek (Колорадо). Здесь мы имеем гранитное плато, лежащее на 9 000' от уровня моря; на этом плато имеется вулканический кратер диаметром около 2 миль, в значительной степени заполненный пористыми брекчиями и туфами. Вулканические породы насыщены водой подобно губке, поэтому горные

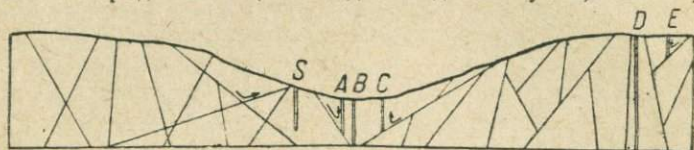


Рис. 3. Разрез, иллюстрирующий продвижение воды по трещинам отдельностей в кристаллических породах.

А, С—колодцы, питаемые трещинными водами; В—промежуточный, более глубокий колодец, сухой; D—глубокий колодец, не встретивший трещины отдельностей; E—колодец с насосом, расположенный недалеко от D, вода в нем стоит на незначительной глубине; S—сухая скважина в непосредственной близости к источникам. (Займствовано у M. L. Fuller, U. S. Geol. Surv.).

разработки на глубине 1 500' часто затоплялись. Но даже и в сильно насыщенном водою массиве встречаются массивно-пластовые интрузивные тела, как например в руднике Vindicator (на глубине 1 000'), которые настолько сухи, что для бурения приходится подводить воду с поверхности. По имеющимся данным Ransome пришел к заключению, что даже в Cripple Creek количество воды значительно уменьшается по мере углубления. Гранит, который окружает насыщенный водой кратер, содержит весьма мало воды и почти везде практически безводен, несмотря на сильное гидростатическое давление. Конечным горизонтом истечения должна быть долина Arkansas, расположенная на расстоянии многих миль и на 2 500' ниже, но весьма сомнительно, чтобы вода из рудников Cripple Creek могла бы когда бы то ни было проложить себе путь к этому выходу через гранитный массив¹⁰.

В медных рудниках Butte (Монтана) где в гранитных породах имеется много сбросов, воды чрезвычайно много, даже на самом низшем горизонте работ. С востока к рудникам подходит высокий хребет, и условия должны бы быть благоприятными для глубокой циркуляции, однако, воды здесь, вероятно, почти стоячие, Weed упоминает о присутствии крупных массивов пород, в которых вода отсутствует¹¹. По словам Kemp в руднике Butte с площадью, занимающей 2 кв. мили, и из глубины от 2 200 до 2 800' вода откачивается лишь в количестве 15 750 л/мин (3 500 галлонов в минуту).

В руднике United Verde (Аризона) из горизонта, расположенного на глубине 3 000', вода откачивается в количестве 50 галлонов в минуту. В руднике Morning (район Coeur d'Alene, Idaho) с самого низкого горизонта, расположенного на глубине 2 200' от главной штольни, выкачивается 73 галлона воды в минуту.

Другой местностью, где имеются многочисленные и относительно молодые сбросы, является Leadville (Колорадо). На глубине 1 500' (наинищий горизонт) воды очень много, преимущественно по сбросам.

По мнению Bernard McDonald в Rossland¹² (Британская Колумбия) горизонт воды находится на глубине 40', и количество ее продолжает возрастать до глубины 200—300'. Ниже она начинает убывать, сначала медленно, а затем быстрее, и на глубине 900' наблюдается лишь незначительное просачивание; на глубине, превышающей 1 000', рудничная вода вовсе отсутствует¹³. По словам Weed в медном руднике Ely (Vermont) наклонная шахта имеет длину 3 600', что по вертикали равняется глубине 1 700'. Ниже 600' (по вертикали) вода здесь отсутствует. В Przi Bram (Богемия) на глубине 3 000' выработки совершенно сухи и пыльны. В Cornwall и Newfoundland имеются рудники, в которых работы ведутся под морским дном, часто весьма даже близко к последнему, и все же морская вода не прорывается в рудник¹⁴. Однако, в присутствии трещин такие вторжения возможны. Можно привести пример рудника Alaska-Treadwell. В 1917 г. работы здесь велись на глубине 2 400' ниже уровня моря; рудники были затоплены прорывом морской воды, и их пришлось бросить.

Одним из наиболее убедительных примеров являются медные рудники в Мичигане (Michigan), о которых говорит А. С. Lane¹⁵. По его словам, воды на поверхности совершенно нормальны и годны для питья и проникают на глубину всего 1 000 или 1 500' от поверхности. Ниже влага присутствует в очень ограниченном количестве, но там, где она есть, она появляется в виде капель крепкого рассола хлористого кальция; присутствие последнего никак нельзя объяснить его происхождением из поверхностной воды. На многих горизонтах вода полностью отсутствует и для бурения ее приходится подводить с поверхности. Этот случай особенно убедителен, так как здесь мы имеем много особенностей, говорящих в пользу сильной циркуляции; эти особенности — влажный климат, наклонное залегание пластов и значительная их проницаемость.

Глубина горизонта грунтовых вод. В странах с влажным климатом горизонт грунтовых вод обычно находится на глубине не более 50' от поверхности, но в местностях, где выпадение осадков не столь значительно, верхняя граница зоны насыщения может сильно колебаться. В еще более безводных местностях воду обычно встречают на глубине 300—400' от поверхности. В золотом руднике Abe Lincoln (New Mexico), небольшое количество воды стало показываться на глубине 1 300'. В богатых месторождениях района Tintic (Utah) горизонт воды в известняке лежит на глубине 1 700—2 000; в том же районе другие рудники расположены в андезите и порфире, и там воду встречают на значительно меньшей глубине.

Когда воду из рудника дренируют или откачивают, горизонт воды искусственно понижается и принимает вид плоской воронки. В этом случае воду выкачивают не только с нижнего горизонта, но также и с других, отстоящих значительно дальше от шахты. Об этом не следует забывать ввиду того, что состав воды, полученной с самого нижнего го-

ризонта рудника, иногда бывает иным, чем состав воды, первоначально присутствовавшей на том же горизонте.

Общее количество свободной воды в земной коре. Имеется несколько приблизительных подсчетов количества несвязанной воды, содержащейся в верхней коре. По старым подсчетам Delesse, Dana и Slichter это количество было очень велико. Подсчет Van Hise¹⁶ дает гораздо более низкую цифру; по его подсчету количество несвязанной воды эквивалентно сплошному слою, покрывающему всю поверхность земли, мощностью 69 м.

После тщательного изучения этой проблемы Fuller¹⁷ нашел, что общее количество воды будет эквивалентно слою по всей поверхности земли мощностью 96'.

¹ C. R. Van Hise. A treatise on metamorphism. „Mon.“ 47, U. S. Geol. Survey, 1894, pp. 123—191 and 657—670.

L. M. Hoskins. Flow and fracture of rocks as related to structure. „Sixteenth Ann. Rept.“, U. S. Geol. Survey, pt. 1, 1896, pp. 845—875.

C. S. Slichter. The motion of ground waters. „Nineteenth Ann. Rept.“, U. S. Geol. Survey, pt. 2, 1898, pp. 295—384; также „Water-Supply Paper“ 67, U. S. Geol. Survey, 1902, p. 106.

F. H. King. Principles and conditions of the movements of groundwater. „Nineteenth Ann. Rept.“, U. S. Geol. Survey, pt. 2, 1898, pp. 59—294.

J. F. Kemp. Igneous rocks and circulating waters, etc. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 33, 1903, pp. 707—711.

J. F. Kemp. The problem of metalliferous veins. „Econ. Geol.“ 1, 1906, pp. 207—262.

J. W. Finch. The circulation of underground aqueous solutions and the deposition of lode ores. „Proc.“ Colo. Sci. Soc., 7, 1904, pp. 193—1252.

M. L. Fuller. Total amount of free water in the earth's crust. „Water-Supply Paper“ 160, U. S. Geol. Survey, 1906, pp. 59—72.

T. A. Rickard. „Eng. and Min. Jour.“, March 14, 1903; „Min. and Sci. Press“, June 27, 1908.

K. Keilhack. Lehrbuch der Grundwasser und Quellenkunde. Berlin, 1917.

O. E. Meinzer. The occurrence of groundwater in the United States. „Water-Supply Paper“ 489, U. S. Geol. Survey, 1923.

² „Zeitschr. f. Phys. Chem.“, 80, 1912, p. 129. См. также J. Johnston and L. H. Adams, „Jour. Geol.“ 22, 1914, p. 13.

³ „Jour. Geol.“, 20, 1912, pp. 97—118.

⁴ P. W. Bridgman. „Am. Jour. Sci.“, 4th. ser., 45, 1918, pp. 243—280.

⁵ „Proc.“, Colorado Sci. Soc., 7, 1904, p. 202.

⁶ O. E. Meinzer. „Water-Supply Paper“ 489, U. S. Geol. Survey, 1923, p. 44. E. W. Shaw, „Econ. Geol.“, 12, 1917, p. 610.

⁷ „Water-Supply Paper“ 160, U. S. Geol. Survey, 1906, p. 64.

⁸ John Johnston and L. D. Adams. Observations on the Daubrée experiment, etc., „Jour. Geol.“ 22, 1914, pp. 1—15.

⁹ E. T. Allen. The volcanic activity and hot springs of Lassen Peak. Washington, 1925.

¹⁰ Lindgren and Ransome. „Prof. Paper“ 54, U. S. Geol. Survey, 1906, pp. 233—251.

J. W. Finch. „Proc.“, Colo. Sci. Soc. 7, 1904, p. 204.

¹¹ M. L. Fuller. „Water-Supply Paper“ 160, U. S. Geol. Survey, 1906, p. 65.

¹² T. A. Rickard. „Min. and Sci. Press“, June 27, 1908.

¹³ M. L. Fuller. „Water-Supply Paper“ 160, U. S. Geol. Survey, 1906, p. 65.

¹⁴ Другие примеры читатель найдет у J. F. Kemp. The ground waters. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 45, 1914, pp. 3—5.

¹⁵ Mine waters, „Trans.“, Lake Superior Min. Inst., 12, 1908, pp. 154—163.

¹⁶ A treatise on metamorphism. „Mon.“ 47, U. S. Geol. Survey, 1904, pp. 128, 129, 570—571.

¹⁷ M. L. Fuller. Op. cit., p. 72.

СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ВВЕДЕНИЕ

Из моря и с суши вода непрерывно испаряется. Атмосферные осадки в виде чистой дождевой воды, как только насыщаются кислородом и углекислотой, немедленно начинают свою работу по разрушению пород. Реки уносят в море находящиеся во взвешенном состоянии частицы и растворенные соли. Реки образуются как за счет сточных, так и за счет грунтовых вод, выходящих на поверхность в виде ключей и источников, которые при продолжительном контакте с породами в той или иной степени минерализовались. Этот, казалось бы, мало заметный процесс разрушения пород и растворения солей представляет огромное геологическое значение. Так, по наблюдениям F. W. Clarke¹, р. Миссисипи ежегодно уносит в море до 108 метрических т солей с каждой кв. мили дренируемой площади; р. Колорадо уносит до 51 т с каждой кв. мили.

Меньшая часть грунтовых вод уходит вглубь, увеличивая массу стоячих вод и здесь значительно насыщаясь солями. Еще меньшая часть воды теряется, входя в состав водных соединений подобных каолину.

Для полноты картины следует также упомянуть о восходящих из большой глубины горячих источниках, представляющих, по крайней мере частично, ювенильные воды.

Ввиду того, что большинство месторождений полезных ископаемых образуется из водных растворов, состав воды в реках, озерах и морях требует подробного изучения. Еще большее значение имеет состав подземных вод (колодцев и ключей). С химической точки зрения нет надобности различать холодные и горячие воды, минерализованные и неминерализованные. Присутствие в подземных водах тех или других растворенных веществ обуславливается химическим составом этих вод. Непосредственно на поверхности на составе вод отражается влияние органической жизни. Вообще говоря, каждая формация отдает просачивающейся сквозь нее воде характерные для нее соли. Природная вода представляет химическую систему уравновешенных компонентов или в большей или меньшей мере диссоциированных электролитов, коллоидов или газов.

КАРБОНАТНЫЕ ВОДЫ В ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОДАХ

Изверженные породы глубинного происхождения, а также и кристаллические сланцы содержат лишь незначительные количества растворимых

солей. Проникающие в них поверхностные воды содержат большее или меньшее количество углекислоты, которая при обыкновенной температуре постепенно разрушает силикаты, в особенности пироксен, амфибол, биотиты и кальциевые полевые шпаты; щелочные полевые шпаты разрушаются медленнее. Вследствие этого в местностях, сложенных этими породами, источники не содержат значительного количества солей (редко выше 1 000 частей на миллион); в них преимущественно содержится углекислый кальций с большим или меньшим количеством соответствующего углекислого магния, примерно то же количество углекислого натрия и гораздо меньше углекислого калия. Радикалы хлора и серной кислоты будут присутствовать в незначительном количестве. Содержание SiO_2 относительно высоко. Такие воды, содержащие преимущественно углекислый кальций, характерны не только для источников на поверхности, но и для более глубоких зон циркуляции в местностях, сложенных из кристаллических пород; в последнем случае воды могут быть и теплыми, хотя обычно они холодные. Реки, текущие по таким местностям, имеют воду подобного же состава. Там, где много магнезиальных пород, подобных базальту и змеевику, подземные воды содержат окись магния в количестве больше обыкновенного; это количество может даже равняться количеству кальция. Карбонатные воды весьма распространены и обыкновенно являются водами вадозными.

Воды описанного выше типа обычно бедны редкими минералами. В некоторых случаях присутствует небольшое количество мышьяка; иногда встречаем упоминания о следах бария, стронция, лития, бора и фосфора. Протекая по месторождению полезных ископаемых, воды могут растворять рудные минералы и элементы. Ключи и источники иногда откладывают корки углекислого кальция и водной окиси железа, но обычно воды их не обладают большой способностью к растворению и отложению. Где в породах содержится много пирита, воды содержат значительное количества сульфатов, в особенности сульфата кальция.

КАРБОНАТНЫЕ ВОДЫ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ

Карбонатные воды связаны также и с осадочными породами — песчаниками, известняками и доломитами. В них часто содержится сероводород и углекислота. В некоторых случаях углекислота может выделяться из глубинной магмы, но чаще образуется от разложения карбонатов. Примером таких вод служит холодный ключ Cresson (Пенсильвания), выходящий из свиты глинистого сланца и зажатый между песчаниками, залегающими в 3 000-футовой толще каменноугольных отложений, в которых известняк практически отсутствует. Вода эта очень чистая; ее соленость всего 442 части на миллион, и из них 272 можно отнести на счет углекислого кальция, 76 на счет сернокислых натрия, магния и кальция и 11 на счет хлористого натрия. По анализу Genth, произведенному с большой тщательностью, эта вода содержит следы никеля, кобальта, железа, марганца, меди, стронция, бария и фтора; последний элемент присутствует в количестве 0,17 части на миллион. Приводим несколько анализов хорошо известных вод этого типа (см. стр. 44).

Эти воды часто образуют восходящие ключи, но они обычно метеороного происхождения. Не подлежит сомнению, что углекислые воды играют значительную роль в растворении и отложении в верхней части земной

коры, в особенности же при выветривании. Они могут отлагать известковый туф и обуславливать концентрации железа и марганца. С ними могут также быть генетически связаны некоторые месторождения свинца и цинка в известняках. Их способность к растворению и отложению более редких металлов, видимо, незначительна, за исключением тех случаев, когда они содержат CO_2 и сероводород. В Kansas, Missouri и Kentucky в таких водах находят цинк, возможно также свинец и медь. Соли этих вод выщелочены из пород, по которым они протекают.

ХЛОРИСТЫЕ ВОДЫ

Инфильтрация из современных океанов. В прибрежных источниках и колодцах соль обычно содержится в большем количестве, чем в глубине материков. Это, возможно, объясняется инфильтрацией морских вод в осадочные или пористые изверженные породы; соль может приноситься ветром из брызг морской воды.

Растворение соляных отложений. В отложениях древних геологических эпох встречаются отложения морских солей, особенно хлористого натрия, приуроченные главным образом к эпиконтинентальным бассейнам. Встречая на своем пути такие соляные отложения, поверхностные воды легко растворяют хлористый натрий. Во многих местностях воды колодцев и ключей содержат значительное количество солей NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 и бедны кремнеземом и калием. Характерно присутствие брома, иногда следов иода. Почти всегда присутствуют барий и стронций, первый нередко в значительных количествах. Иногда обнаруживается свободная CO_2 и сероводород, последний преимущественно в случаях обилия сернокислого кальция. Воды этого общего типа характерны для некоторых палеозойских пластов в восточных шахтах, как например в силурийских породах штата Нью-Йорк и Мичиган и кое-где в пластах карбона в штате Мичиган. В западных штатах «красноцветная толща» (Red beds) обычно пермского и триасового возраста, иногда богата солью и гипсом и обогащает ими грунтовые воды. Аналогичные воды часто встречаются в Пенсильвании, собственно говоря, и во всем внутреннем палеозойском бассейне от штата Арканзас до Канады. Надо думать, что к этому классу принадлежат и минеральные источники Saratoga в штате Нью-Йорк, выходящие из силурских известняков. Их температура равняется почти 50°F ; присутствие твердых веществ в общей сложности достигает 11 000 частей на миллион, причем большая часть приходится на хлористый натрий. В некоторых анализах присутствует в незначительном количестве барий, вплоть до 34 частей на миллион, и бром в количестве приблизительно 1,20 частей на миллион. Иногда в анализах фигурируют небольшие количества SiO_2 , железа и лития, также следы бора, иода и фтора. Относительно происхождения столь обильной в источниках Saratoga углекислоты нельзя сказать ничего определенного. Кемп говорит о магматическом ее происхождении. Примеры таких вод даются в приводимой ниже таблице.

Некоторые из них чрезвычайно богаты хлористым кальцием, т. е. той чрезвычайно легко растворимой солью, которая остается последней в растворе при испарении остаточных рассолов в изолированных палеозойских бассейнах². В южной части полуострова Мичиган в породах карбона и силура ряд скважин дают растворы, в которых общее количество

Состав солей и общая соленость вод, содержащих углекислый кальций
(в осадочных и кристаллических породах)

	A	B	C	D	E	F
CO ₃	47,14	57,80	38,46	40,02	41,47	48,64 *
SO ₄	6,67	3,10	15,35	21,73	3,93	6,30
Cl	4,18	1,30	2,81	0,64	1,27	5,40
S	—	0,50	—	—	—	—
PO ₄	—	—	—	—	0,03	—
NO ₃	—	—	—	—	0,23	—
Ca	22,27	13,90	13,24	23,35	23,54	16,56
Mg	6,7	2,30	4,32	5,82	2,56	7,64
Mn	—	0,10	—	—	0,17	—
Na	} 5,32	{ 5,50	12,86	1,81	2,38	10,36
K			0,40	3,76	2,04	0,80
(AlFe) ₂ O ₃	—	1,70	—	0,58	0,10	0,60
NH ₄	—	—	—	—	0,03	—
SiO ₂	7,85	13,40	9,19	4,01	22,85	4,50
BO ₂	—	—	—	—	0,64	—
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Соленость в частях на миллион	280	245	282	563	199	222

* HCO₃

- A — ключ Aztec, 4 мили к востоку от Santa Fé, New Mexico. В сланце и граните. Холодный. Анализ F. W. Clarke „Geochemistry“, p. 64.
- B — холодный ключ в руднике Federal Loan, в граните и сланце, Nevada City, Калифорния. Предварительный анализ W. F. Hillebrand; содержит немного марганца и следы свинца. Отлагает углекислый кальций, лимонит и некоторое количество мышьяка. Сера, вероятно, вследствие восстановления небольшого количества H₂S после разлива в бутылки. „Seventeenth Ann. Rept.“, U. S. Geol. Surv., pt. 2, 1896, p. 121.
- C — холодная вода с горизонта 500', рудник Geysler, Silver Cliff (Колорадо). Анализ W. F. Hillebrand. В „The mines of Custer County, Colorado“, S. F. Emmons, „Seventeenth Ann. Rept.“, U. S. Geol. Surv., pt. 2, 1896, p. 461. Свободная и полусвязанная CO₂ 38,8 частей на миллион.
- D — горячие ключи Virginia, штат того же имени. Анализ F. W. Clarke „Geochemistry“, p. 193. Температура — чуть теплая. Выходит из палеозойских осадков. См. также „Bull.“ 32, U. S. Geol. Surv., 1886, p. 61.
- E — горячие ключи Arkansas. Ключ № 16. Температура 62° C. Выходит из сильно смятых складок силурского песчаника и глинистого сланца. CO₂ из бикарбонатов в количестве 28,34 см³/л; азот 8,39 см³/л; кислород 2,49 см³/л; H₂S отсутствует. Мышьяк отсутствует; следы иода и брома. Анализ J. K. Haywood, The Hot Springs of Arkansas, Senate. Doc. 282, Fifty-Seventh congress, First Session, 1902, p. 94. Пересчитан F. W. Clarke „Geochemistry“, 1916, p. 195.
- F — холодная вода из скважин Missouri Lead and Zinc Co, Joplin Missouri. Глубина 1387'. В палеозойском известняке. Анализ пересчитан Cleveland and Millar Laboratory, „Water-Supply Paper“ 195, U. S. Geol. Surv., 1907, p. 137.

твердых достигает 12 000 частей на миллион, из которых 6 000 приходится на NaCl, 1 600 на MgCl₂ и 4 100 на CaCl₂.

Проведенные А. С. Lane исследования показали, что воды, присутствующие в небольшом количестве в глубоких горизонтах медных рудников Мичигана, имеют приблизительно такой же состав, за исключением явного преобладания хлористого кальция.

В нефтеносных местностях соленые воды встречаются весьма часто. Они богаты хлористым натрием и часто содержат хлористый кальций и магний, а также то или другое количество бикарбонатов; всегда бедны сульфатами, быть может, вследствие их восстановления углеводами. Происхождение этих соляных растворов объясняется различно: как остаточные

Состав солей и общая соленость хлористых вод
(заимствовано у F. W. Clarke, „Geochemistry“, 1924, pp. 184—187).

	A	B	C	D	E	F
Cl	55,83	58,79	42,00	62,31	63,55	56,58
Br	0,04	Следы	1,13	0,53	—	0,04
J	0,03	—	0,02	0,01	—	Следы
SO ₄	3,12	0,94	0,08	0,03	0,01	0,78
CO ₃	2,63	0,61	18,59	0,27	0,01	3,13
B ₄ O ₇	—	—	—	—	—	0,01
Na	33,09	30,38	27,62	18,35	5,63	32,60
K	0,27	3,76	0,78	1,55	—	1,16
Li	—	—	0,08	0,04	—	0,04
NH ₄	—	—	—	0,23	—	0,07
Ca	3,72	4,90	6,03	13,86	30,78	4,05
Ba	—	—	0,09	—	—	0,01
Sr	—	—	—	—	—	0,12
Mg	1,13	0,40	3,41	2,53	0,01	0,61
Al ₂ O ₃	—	0,02	—	0,02	—	—
Fe ₂ O ₃	0,06	—	0,03	—	—	—
Fe	—	—	—	0,25	—	0,04
SiO ₂	0,08	0,20	0,14	0,02	0,01	0,76
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Соленость в частях на миллион	10 589	23 309	12 022	309 175	212 300	8 241

A — артезианский колодец Цинцинати в горах того же имени в штате Ohio. Анализ E. S. Wayne, приводимый А. С. Peale, „Bull.“ 32, U. S. Geol. Surv., 1886, p. 133. Эта вода содержит значительные количества свободных H₂S и CO₂.

B — горячие источники Utah на 8 миль к северу от Ogden (Utah). Температура 55° С. Анализ F. W. Clarke, „Bull.“ 9, U. S. Geol. Surv., 1884, p. 30.

C — источник Congress, Saratoga штат Нью-Йорк. Анализ C. F. Chandler, приводится А. С. Peale в „Bull.“ 32, U. S. Geol. Surv., 1886, pp. 38—39. Следы F, P, B, Sr и Al. Содержит значительное количество свободной CO₂.

D — рассол из скважины (глубина 2,667') в Conneatville, Pennsylvania. Анализ A. E. Robinson и C. F. Meberg, „Journ. Am. Chem. Soc.“ 18, 1896, p. 1915. Присутствует небольшое количество H₂S.

E — вода из глубоких горизонтов рудника Quincy, Hancock, Michigan. Анализ George Steiger. Kochbrunnen, Wiesbaden, Германия. Анализ С. К. Fresenius.

F — эта вода содержит также следы J, P и As.

воды и как растворы из отложении соли, а иногда им приписывают магматическое происхождение³.

В западных штатах воды в «красноцветной толще» богаты серноокислым кальцием. В качестве примера можно привести теплый источник *Quelites* в Новой Мексике⁴, который, поднимаясь через красноцветную толщу, содержит около 2,6% твердого остатка; половина этого количества приходится на хлористый натрий, а большая часть второй половины на серноокислый кальций. Присутствуют бром, бор и барий.

Триасовые пласты во французских Альпах и Пиренеях богаты аналогичными по составу теплыми ключами. Сочетание минералов представляет характерную смесь хлоридов и сульфатов; несомненно, что все компоненты выщелочены из вышеупомянутых осадочных пород. Знаменитая группа таких хлористых источников имеется в Германии по обе стороны Рейна. Из них упомянем воды *Soden*, *Homburg*, *Wiesbaden*, *Kreutznach*, *Kissingen* и *Nauheim*. Многие из них выходят из солесодержащих пластов пермского и триасового возраста и по составу мало отличаются друг от друга. Источники *Kreutznach* особенно богаты хлористым кальцием. Некоторые из вышеперечисленных источников горячие, другие холодные, некоторые богаты CO_2 . Относительно источников *Kreutznach* и *Wiesbaden* существует разногласие, ввиду того, что первые тесно связаны с эруптивными породами, тогда как последние выходят из гнейса, и некоторые ученые приписывают им ювенильный характер. Во всяком случае большинство из них обогатилось солями за счет осадочных образований.

Описанные выше хлористые воды способны растворять и отлагать многие металлы и обладают значительной способностью к дегидратации. Их отношение к месторождениям полезных ископаемых будет описано ниже.

ХЛОРИСТЫЕ ВОДЫ В ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОДАХ

Богатые хлором воды часто встречаются в виде восходящих ключей в изверженных породах, но почти всегда близ областей, в которых еще сравнительно недавно имела место вулканическая деятельность. Состав их несколько иной по сравнению с продуктами растворения солей из осадочных пород. Бром присутствует редко, во всяком случае в самом незначительном количестве, между тем как бора много. Такого рода теплые соленые воды мы видим, например, в вулканической области окрестности *Clifton* (Аризона). По имеющимся сведениям палеозойские породы этой области не содержат ни соли, ни гипса. Другим примером служат горячие источники *Glenwood* в западном Колорадо. Здесь источники выходят из известняка, но соотношения структур свидетельствуют о том, что на некоторой глубине под этими известняками залегает гранит. Температура $49,5^\circ\text{C}$; вода содержит значительное количество хлористого натрия и относительно мало карбонатов и сульфатов. Присутствуют сероводород и свободная CO_2 . В качестве еще третьего примера можно назвать источники *Steamboat* (Невада), выходящие из гранодиорита близ восточного подножия *Sierra Nevada*, в области проявления третичного вулканизма.

Многие из этих источников содержат много сероводорода и CO_2 , а также и редкие элементы, что можно видеть из приводимых ниже анализов. Эти источники обычно встречаются в местностях, богатых руд-

ными месторождениями. Во многих случаях трудно с точностью сказать, откуда произошла соль, как например в источниках Kreutznach (Германия), выходящих из порфира, о которых Laspeyres говорит, что они содержат 0,001% хлористого натрия⁵. С другой стороны, Delkeskamp⁶ считает, что соль источника выщелочена из осадочных отложений. Daubrèe⁷ упоминает о хлористых источниках этого класса в провинциях Antioquia и Cauca в Колумбии, где они в изобилии вытекают из гранита, кристаллического сланца и молодых вулканических пород. Очень трудно считать за источник содержащегося в этих водах хлористого натрия окружающие породы даже в том случае, если предположить, что следы этой соли содержатся в граните и кристаллических породах. В месте выхода этих источников на поверхность часто наблюдаются образования известковых и кремнистых туфов.

Состав солей и общая соленость вод, содержащих хлористый натрий и водный кремнезем

(Займствованно у Clarke, „Geochemistry“, 1924, pp. 188 — 196)

	A	B	C	D	E
Cl	35,00	36,61	31,64	13,52	37,52
Br	—	—	0,25	—	—
SO ₄	4,58	1,84	1,30	9,01	4,96
S	0,22	—	—	0,32	—
CO ₃	5,08	0,15	8,78	10,16	—
PO ₄	0,03	0,08	—	—	—
AsO ₄	—	—	0,24	—	—
B ₄ O ₇	8,88	2,24	1,19	—	—
Na	30,35	21,44	26,42	19,71	24,22
K	3,79	4,45	1,93	1,88	0,36
Li	0,27	0,22	0,40	—	—
NH ₄	—	0,02	Следы	0,28	—
Ca	0,25	0,39	0,11	—	2,59
Mg	0,01	0,08	0,04	0,08	0,19
Fe	—	Следы	Следы	—	Следы
As	1,10	—	—	—	—
Sb	1,02	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	0,01	0,76	0,12	—	0,35
SiO ₂	11,41	31,72	27,58	45,04	29,81
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Соленость в частях на миллион	2 850	1 830	1 388	1 131	2 735

A — источники Steamboat (Невада). Анализ W. H. Melville, приводимый G. F. Becker, в „Моп.“ 13, U. S. Geol. Surv., 1888, p. 349. Бикарбонат восстановлен до нормальных солей. Температура 85° C. Содержит свободную CO₂ и сероводород. Следы железа и ртути. Отлагает киноварь и стибнит.

B — источник Coral, Norris Basin (Yellowstone National Park). Анализ F. A. Gooch и J. E. Whitfield, „Bull.“ 47, U. S. Geol. Surv., 1888. Температура 73° C. H₂S отсутствует. Свободная CO₂ — 42,5 части на миллион.

C — Old Faithful Geyser, там же, аналитик тот же. Температура 84 — 88° C. H₂S — 0,2 части на миллион.

D — Большой Гейзер, Исландия. Аналитик F. Sandberger.

E — вода „pink terrace“, гейзер Roturoa. Аналитик W. Skey.

С этой группой тесно связаны источники области гейзеров Yellowstone National Park, в Новой Зеландии и Исландии. Их воды содержат очень много SiO_2 , также свободной CO_2 и небольшое количество сероводорода. Присутствует большое количество бора, обычно пересчитываемое на бористый натрий, часто также мышьяк. Бром редко присутствует в количествах, приближающихся к тем, которые мы видим в рассолах, происходящих из осадочных формаций. Воды всегда горячие; они обычно поднимаются на поверхность через вулканические породы, преимущественно риолитовые; полагают, что SiO_2 получается из этих пород, но это вряд ли объяснит преобладание хлористого натрия и бора. В Yellowstone Park многие источники, выходящие на поверхность близ известняка, свидетельствуют о том, что в водах, просачивавшихся через них, присутствовали повышенные количества кальция и магния. Другие источники богаты сернокислым натрием и другими сульфатами; воды этих источников дают кислую реакцию, и присутствие сульфатов вероятно следует приписать окислению сероводорода.

СЕРНОКИСЛЫЕ ВОДЫ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ

Сульфатные воды в осадочных породах нередки, особенно в связи с гипсом и хлористонатриевыми водами, так как гипс обыкновенно сопровождает отложения. Взаимодействием сернокислого кальция и углекислого магния в пиритсодержащих доломитах может образоваться сернокислый магний.

В отложениях меловых пород Западных штатов США воды, содержащие сернокислый натрий, являются характерными для некоторых формаций. Эти формации состоят преимущественно из песчаников и пиритизированных угольных сланцев. Вся свита по фациальному составу — прибрежная. Окисление пирита приводит к образованию растворов со свободной серной кислотой, и реакции между последней и различными солями дают сернокислые кальций, магний и натрий. Самая нижняя свита этой формации, а именно дакотский песчаник, особенно водоносна и содержит в отдельных участках бассейны артезианских вод. Грунтовые воды этого горизонта на расстоянии нескольких миль от выхода его на дневную поверхность местами содержат так много сернокислого натрия, что вода из некоторых глубоких скважин не годится для поливки растений.

Процессы поверхностного выветривания в некоторых свитах осадочных пород приводят к образованию солей углекислого и сернокислого натрия при помощи достаточно установленных реакций; эти соли легко уносятся просачивающимися водами. В результате взаимодействия сернокислого кальция и углекислого натрия образуются сернокислый натрий и осадок углекислого кальция. В присутствии свободной CO_2 сернокислый натрий растворяет углекислый кальций, образует двууглекислый натрий и осаждает гипс⁸. Реакции между хлористым натрием и сернокислым кальцием, имеющие место, согласно Cameron, имеют своим следствием образование хлористого кальция и сернокислого натрия; подобного же рода реакции имеют место между хлористым натрием и углекислым кальцием.

Во многих водах из осадочных формаций хлориды и щелочноземельные карбонаты присутствуют вместе с сульфатами. В артезианском ко-

лodge Rosswell (Новая Мексика), глубина которого приблизительно 400', воды собираются из пермских известняков⁹. Температура этих вод между 64 и 70° F, и они содержат соли в количестве от 600 до 1 200 частей на миллион, из которых от 300 до 750 приходится на сернокислые кальций и магний, остальное на карбонаты и хлористый натрий. В областях развития дислокаций такие воды могут быть горячими, и в этом слу-

Состав (в процентах) и общее количество солей и кислот в сернокислых и кислых водах

	A	B	C	D	E	F	G
HCl своб.	—	—	—	—	0,18	5,60	—
H ₂ SO ₄ своб.	—	—	—	9,37	1,29	59,11	31,38
H ₃ BO ₃	—	—	—	—	2,73	—	—
Cl	0,48	11,10	—	0,32	—	—	0,81
S	—	—	—	—	—	—	0,04
SO ₄	66,28	59,68	76,57	68,21	67,66	20,21	40,95
CO ₃	0,60	1,67	—	—	—	—	—
NO ₃	—	—	—	—	—	—	0,02
Na	30,46	13,89	1,19	0,22	0,73	8,35	} 1,47
K	1,08	0,49	—	0,11	0,24	0,32	
Li	—	—	—	—	0,01	—	—
NH ₄	—	—	—	—	22,85	—	—
Ca	0,67	2,91	5,82	0,38	1,18	0,47	1,62
Mg	0,41	10,19	3,39	1,11	0,36	0,22	2,48
Fe ^{II}	—	—	4,28	1,19	Следы	—	5,74
Fe ^{III}	—	—	—	—	—	0,33	8,22
Al	—	—	7,36	11,08	0,10	Следы	Отсут.
SiO ₂	0,02	0,07	1,39	7,11	2,67	5,39	1,27
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Соленость в частях на миллион	74 733	15 682	3 303	464	3 365	1 862	9 760

A — колодец Abilena (Abilene, Канзас), глубина 130'. Аналитик E. H. S. Bailey. Geol. Surv. Kansas, 7, 1902, p. 166. В пермских пластах. Clarke, „Geochemistry“, 1924, p. 189.

B — минеральный источник Kuig близ Dallas, Indiana. Twenty-sixth Ann. Rept. Indiana Dept. Geol., 1901, p. 32. Следы Al, Fe, Ba, Sr, Li, Mn, Ni, Zn, Br., PO₄ и B₂O₃. Геологический горизонт. Палеозойский глинистый сланец.

C — колодец Alum, Versailles (Миссури). Аналитик P. Schweitzer. Geol. Surv. Missouri, 3, 1892, p. 131. В пенсильванском глинистом сланце.

D — источники Rockbridge Alum (Виргиния). Аналитик M. V. Hardin. Приводится, Clarke „Geochemistry“, p. 98. Из пиритового глинистого сланца. Содержит также 0,69% Mn; 0,01 Li; 0,05 CO; 0,07 Ni; 0,08 Zn; следы Cu, HNO₃ и PO₄.

E — Devil's Inkpot, Yellowstone National Park. Аналитики F. A. Gooch и J. E. Whitfield. „Bull.“ 47, U. S. Geol. Surv., 1886. p. 80. Содержит также 65 частей свободной CO₂ и 5 частей H₂S на миллион. Clarke „Geochemistry“, 1924, p. 200.

F — Cameron's Bath, область гейзеров Roturoa (Новая Зеландия). Аналитик W. Skey, „Trans. Newzealand Institute“ 10, 1877, p. 423. Содержит 6 частей H₂S на миллион. Приводится Clarke „Geochemistry“, 1924, p. 201.

G — вода из рудника Sulphur, Cove Creek, Beaver Valley (Utah). Аналитик W. M. Barr, „Water-Supply Paper“ 217, U. S. Geol. Surv., 1908, p. 20. Содержит также значительное количество свободной H₂S.

чае первоначально присутствовавшее небольшое количество SiO_2 может значительно увеличиться. Источник Arrowhead¹⁰ в долине San Bernardino (Южная Калифорния), выходящий из третичных осадочных пород, имеет температуру 184°F . Его воды содержат 1 086 частей твердых осадков на миллион, из которых 735 пересчитываются на сернокислый натрий, 69 на сернокислый калий, 23 на сернокислый кальций, 3 на сернокислый магний, 141 на хлористый натрий и 23 на углекислый кальций; 85 присутствуют в виде SiO_2 . В той же долине колодезные воды содержат твердого осадка в количестве от 191 до 260 частей на миллион со следующими соотношениями: $\text{CaCO}_3 > \text{MgCO}_3 = \text{NaSO}_4 > \text{NaCO}_3 > \text{NaCl}$. Количество SiO_2 выражается в 24—32 части на миллион.

Иногда воды, просачивающиеся сквозь пиритизированные сланцы, содержат весьма значительное количество сернокислого алюминия и закисного железа. Такие воды распространены в восточных и центральных штатах; они обычно содержат небольшие количества редких металлов; обычны следы никеля, цинка и мышьяка. Сернокислые воды, в особенности те из них, которые содержат значительные количества железа и алюминия, играют видную роль в генезисе месторождений вообще и окисленной зоны в частности. В том месте, где эти воды выходят на поверхность, могут образоваться значительные скопления охры. В Виргинии известно много таких источников, выходящих из пиритовых сланцев. Peale¹¹ приводит несколько интересных и достоверных анализов. Вода из источника Alleghany, в Montgomery, анализ которой был произведен Geuth, содержит твердого осадка 3 129 частей на миллион; компоненты были пересчитаны следующим образом: CaSO_4 , 1 955 частей, MgSO_4 , 255 частей, CaCO_3 , 61 часть. Обнаружено присутствие небольших количеств стронция, бария, фтора и окиси кремния, а также следы цинка, свинца, меди и кобальта. Присутствуют свободная CO_2 и следы сероводорода.

Источники Jordan Alum в Rockbridge (Virginia) содержат соли в количестве 306—935 частей на миллион. Из них большая часть представляет сернокислый алюминий, от 35 до 85 частей сернокислого железа и от 8 до 17 частей сернокислый марганец. Определены также небольшие количества меди, цинка, кадмия, никеля и кобальта, также следы фтора. Одна из подвергнутых анализу проб воды содержала 102 части меди и 9 частей цинка. Источники с подобным же составом воды имеются в Пенсильвании и других восточных штатах. Во всех этих кислых источниках мало окиси кремния и очень мало хлора.

КИСЛЫЕ, СЕРНОКИСЛЫЕ ВОДЫ В ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОДАХ

Сернокислые источники, связанные с изверженными породами и вулканической деятельностью, представляют результат окисления восходящих щелочных вод, содержащих свободный сероводород. В областях вулканической деятельности такое окисление проходит в широком масштабе. Эти кислые воды производят изменения пород, разрушая алюминиевый силикат и вызывая образование алунита. Разложение хлоридов свободной серной кислотой может дать HCl . Ясно, что развитие свободной кислоты нарушает равновесие, и окисленные воды могут сильно отличаться от материнских. Бывает, что один восходящий ключ, соединившись с другими водами и окислившись, образует несколько источников с разным составом и разными температурами.

В своей «Геохимии» Clarke приводит несколько анализов таких вод. Некоторые из них, особенно взятые из стоячих вод или озер, расположенных близ вулканов, чрезвычайно богаты соляной кислотой. Вода из источника Yellowstone Park, известного под названием Devil's Inkpot («Чортова чернильница»), помимо свободных кислот, содержит значительное количество сернокислого алюминия. Вода из Roturoa (Новая Зеландия), анализ которой приведен выше, представляет собой более характерный продукт окисления нормальных термальных вод. Гейзеры Sonoma (Калифорния)¹² представляют наиболее интересный пример окисления горячих вод. Здесь имеется множество источников различного состава и температуры; все они чрезвычайно сильно насыщены сероводородом. При температуре 110° F первичная вода, повидимому, содержит преимущественно углекислый магний и некоторое количество кальция. Содержание твердого осадка доходит до 568 частей на миллион; из них большая часть представляет вышеупомянутые карбонаты; SiO₂ присутствует в количестве 92 частей на миллион. Эта вода, надо думать, смешанного происхождения; карбонаты, без сомнения, взяты из соседних серпентиноидных пород (змеевиков), сероводород же, видимо, магматического происхождения. Окисление обуславливает возникновение вод иного состава, большинство которых богаты растворенными твердыми веществами и имеют высокую температуру.

Наконец, кислые воды могут образоваться непосредственно от окисления месторождений серы. W. I. Lee описывает такого рода воду в Beaver County (Utah).

СОДОВЫЕ ВОДЫ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ

Воды, содержащие значительное количество углекислого натрия, не обычны для осадочных пород, но все же кое-где встречаются минерализованные источники; они обычно холодные и часто содержат свободную CO₂ и сероводород. Как уже говорилось выше, щелочной карбонат получился как следствие реакции между сернокислым натрием и углекислым кальцием или же между хлористым натрием и углекислым натрием. Такого рода воды местами встречаются в восточных и центральных штатах. Прекрасный пример представляют некоторые воды Миссури, протекающие в известняках карбона; в приводимой ниже таблице анализ одной из этих вод дается под литерой E. Воды колодцев в La Junta, Denver и Greeley (Колорадо) носят приблизительно тот же характер. В Denver артезианские колодцы 1 200' глубины проходят в эоцене Aрапaho, а колодец Greeley (той же глубины) проходит в песчанике Ларами. Эти воды содержат в общем не больше 1 530 частей твердого остатка; из этого количества одна часть приходится на углекислый натрий, а другая — на хлористый. Присутствует некоторое количество CO₂. Воды многих артезианских колодцев в Новом Южном Уэльсе богаты углекислым натрием. Из осадочных пластов, содержащих вулканические туфы, часто выходят воды, содержащие углекислый натрий. Объяснение этому мы находим у В. С. Repoit¹³. Он установил, что воды, содержащие значительные количества углекислых и сернокислых кальция и магния, превращаются в углекислый натрий путем обмена основаниями, вызванного присутствием в осадочных туфовых породах определенных водных силикатов.

СОДОВЫЕ ВОДЫ В ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОДАХ

Восходящие источники, минерализованные углекислым натрием, чрезвычайно характерны для местностей, в которых постепенно прекращается вулканическая деятельность. В период излияния эффузий щелочные хлориды и карбонаты всегда появляются в качестве продуктов возгонки, и воды, протекающие в туфах, брекчиях и излияниях лавы, могут растворять эти соли вместе с прочими вулканическими сублиматами, например боратами. Однако, типичные содовые воды имеют глубинное происхождение и обычно прорываются сквозь древние изверженные или метаморфические породы, которые в местностях, где прекратилась вулканическая деятельность, залегают под лавами. Преобладает мнение, что эти воды с насыщающими их солями частично или полностью магматического происхождения. Они редко содержат значительное количество кальция и всегда мало SiO_2 , но CO_2 , а иногда и сероводород присутствуют в большом количестве. Почти всегда в них содержатся более редкие элементы, как-то: бор, фтор, иод, мышьяк и различные металлы.

Такие воды должны сильно разрушать силикаты, и предполагают, что содержащийся в них натрий выщелочился из стенок трещин, в то время как натриевые силикаты превращались в калиевые, как это бывает при столь обычном для жил процессе серицитизации. Не подлежит сомнению, что этим водам принадлежит громадная роль в генезисе рудных жил.

Прекрасным примером местности, где изобилуют такие воды, является вулканическая область центральной Франции¹⁴. В ниже приводимой таблице дается, между прочим, анализ знаменитых вод Виши, где преобладает двууглекислый натрий, но присутствуют также меньшие количества хлористого и сернокислого натрия. Во всей области Центрального плато изобилует CO_2 , которая наблюдается как в источниках, так и в выходах газа (например в свинцово-серебряных рудниках Pontgibaud). Какого бы мнения ни придерживались относительно происхождения воды, никто не сомневается в том, что источником газа является магма.

У подножья Erzgebirge, в районе третичного вулканизма северной Богемии на поверхность выходит целый ряд горячих источников от Teplitz до Carlsbad и Eger. Большинство этих источников относится к классу вод, содержащих углекислый натрий и свободную CO_2 . Они содержат очень много солей; в Teplitz и Bilin преобладает углекислый натрий. В Карлсбадском (анализ С) и Мариенбадском источниках обилен радикал серной кислоты; он должен присутствовать в большом количестве в сернокислом натрии. Карлсбадские источники содержат фтор и барий, а также следы многих редких элементов, о чем упоминается выше.

Кордильеры Северной и Южной Америки богаты водами, содержащими углекислый натрий, которые всегда тесно связаны с местностями третичной вулканической деятельности. Из источников Новой Мексики упомянем: Ojo Caliente (анализ В), Faywood и Las Vegas; в Colorado и Idaho источники Middle Park, Poncha и воды рудника Geysir (Silver Cliff); в Idaho горячие источники Boise. Калифорния особенно богата водами, содержащими углекислый натрий. Эти источники встречаются вдоль Coast Range (Прибрежного хребта) от San Diego до Mendocino; повидимому, они находятся в какой-то случайной связи с поздними третичными и четвертичными извержениями базальта. Некоторые воды содержат при-

Состав солей и общая соленость вод, содержащих углекислый натрий
(заимствовано у Clarke „Geochemistry“, 1924, pp. 192, 194 и 198)

	A	B	C	D	E	F
Cl	6,17	8,85	11,52	13,57	6,63	4,01
F	—	0,19	0,03	—	—	—
SO ₄	3,75	5,77	31,19	0,32	6,21	4,26
S	—	—	—	—	0,06	—
CO ₃	45,57	41,91	19,15	22,38	44,76	47,45
PO ₄	1,52	0,01	0,01	—	—	—
AsO ₄	0,04	—	—	—	—	—
B ₃ O ₇	—	0,16	—	27,98	—	—
Na	35,27	38,08	32,49	33,97	41,07	40,09
K	2,88	1,20	1,35	0,48	—	0,38
NH ₄	—	—	—	0,05	—	—
Li	—	0,12	—	—	—	—
Ca	2,29	0,87	2,23	0,41	0,30	0,27
Sr	0,04	0,05	0,01	—	—	—
Mg	1,11	0,41	0,65	0,11	0,12	0,15
Mn	—	—	0,01	—	—	—
Fe	—	—	0,02	—	—	0,14
Fe ₂ O ₃	0,04	0,06	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	—	0,02	—	—	—	0,20
SiO ₂	1,32	2,30	1,34	0,73	0,85	3,05
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Соленость в частях на миллион	5 249	2 614	5 431	5 096	2 069	1 668

- A — источник Grand-Grille, Виши (Франция). Аналитик J. Bouquet. Присутствует небольшое количество фтора. Температура 44° С. Выходит из третичных пластов.
- B — источник Ojo Caliente близ Taos (Новая Мексика). Аналитик W. F. Hillebrand. Следы бария и мышьяка. В озерных пластах и гнейсе.
- C — источник Sprudel, Carlsbad (Богемия). Аналитик F. Ragzsky. Содержит 0,76 г свободной или полусвязанной CO₂ на килограмм. Следы Br, J, Li, B, Rb и Cs. Температура 72° С. В граните.
- D — горячая вода из шахты Негманн, Sulphur Bank (Калифорния). Аналитик W. H. Melville. Немного H₂S и значительное количество CO₂. Температура 80° С. В базальте и песчанике.
- E — колодец McClelland Cass (Миссури); глубина 45', в известняке карбона. Аналитик P. Schweitzer. Содержит H₂S.
- F — артезианская вода La Junta (Колорадо). Глубина колодца 386'. Аналитик W. F. Hillebrand. В пластах карбона.

месь магния, несомненно, из серпентиноидных пород, через которые они проходили, но в общем они принадлежат к совершенно ясно выраженному типу. Помещаемые ниже данные заимствованы из A. C. Peale, U. S. Geol. Surv., «Bulletin» 32 (см. табл. на стр. 54).

Интересный тип таких вод представляет горячий источник Sulphur Bank (анализ D), содержащий бор и отлагающий киноварь. В общем эти воды богаты редкими компонентами и обладают чрезвычайно значительной способностью к растворению.

Источник	Температура, °C	Соленость в частях на миллион	Состав и количество преобладающих солей
San Juan Capistrano . .	50	290	$\text{HNaCO}_3 > \text{NaCl} > \text{SiO}_2$ 111 105 70
Skaggs Springs	54	2 556	$\text{HNaCO}_3 > \text{BO}_2 > \text{SiO}_2$ 2 083 176 151
Paso Robles Springs . .	42	1 581	$\text{HNaCO}_3 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$ 850 469 136
New Almaden Vichy . .	17	7 361	$\text{HNaCO}_3 > \text{CaSO}_4 > \text{CaCO}_3$ 3 400 680 544
Napa Soda	17	1 156	$\text{HNaCO}_3 > \text{MgCO}_3 > \text{NaCl}$ 561 187 85
Pacific Congress	10	5 678	$\text{HNaCO}_3 > \text{NaCl} > \text{CaCO}_3$ 2 091 1 923 280
Ukiah Vichy	34	4 624	$\text{HNaCO}_3 > \text{NaCl} > \text{MgCO}_3$ 3 369 459 374

ВОДЫ, СОДЕРЖАЩИЕ СЕРНИСТЫЙ НАТРИЙ

Считается, что в некоторых из уже упомянутых источников, например Steamboat Spring (Невада), присутствует сернистый натрий или тиосульфат натрия. В Пиренеях (как французских, так и испанских) имеется группа источников, в которых неизменно присутствует сернистый натрий. Эти источники очень горячие; соленость их небольшая: содержат соли в количестве от 250 до 350 частей на миллион. Выход их на поверхность приурочен к кристаллическим сланцам или к контакту этих сланцев с палеозойскими породами. Из источников, упоминаемых Jacquot и Willm¹⁵, характерен один, содержащий CO_2 — 52, S (в сульфидах) — 31, Na — 97, CO_3 — 26, Cl — 55 и SiO_2 — 93 части на миллион. Присутствует некоторое количество органических веществ и следы бора, мышьяка, меди и пр. Если предположить, что имело место выщелачивание из окружающей коренной породы, то эту комбинацию довольно трудно объяснить. Там, где эти источники имеют примесь поверхностной воды или выходы их приурочены к триасовым породам, заметно обогащение кальцием. При окислении осаждают гипосульфиты.

РЕЗЮМЕ

В породах осадочных, где не может проявляться влияние эруптивной деятельности, воды бывают самых разнообразных типов, зависящих в основном от состава проникаемых пород. Одни богаты преимущественно углекислым кальцием, другие хлоридами натрия и кальция, и очень обширный класс богат сернокислыми кальцием и натрием. Более редким является тип вод, содержащих углекислый натрий. Естественно, что многие воды представляют смешанные типы. Большинство этих вод холодные, многие теплые, немногие, наконец горячие. Независимо от того, теплый источник или холодный, в нем могут присутствовать сероводород и CO_2 .

В древних изверженных породах, где вулканическая деятельность прекратилась, типы менее разнообразны. Обыкновенные поверхностные воды, за исключением случаев нарушения, всегда принадлежат к типу углекислого кальция, часто с хлористым натрием, углекислыми железом и магнием и значительным количеством SiO_2 , но низкой солености. Эти воды иногда образуют теплые восходящие ключи. В том случае, если породы содержат двойной сульфид железа, в водах могут присутствовать свободная серная кислота, сернокислые кальций, алюминий и железо. Остальные классы вод в изверженных породах все поднимаются к поверхности и встречаются только в областях недавней или третичной вулканической деятельности. Они теплые или горячие, хотя иногда бывают и холодными. Их легко подразделить на два класса: 1) воды, содержащие хлористый натрий; подразделением этого класса являются кремнекислые «воды гейзеров», 2) содовые, обычно богатые свободной CO_2 . Между этими двумя классами имеются многочисленные переходы, и такие воды также могут содержать значительные количества сернокислого натрия; ярким примером этого класса являются Карлсбадские источники. Кислые воды могут образоваться от окисления пород, содержащих сульфиды или серу; они могут также образоваться от окисления поднимающихся к поверхности горячих вод, содержащих H_2S ; или же близ вулканов они могут развиться от примеси горячих кислотных паров к поверхностным водам. Естественно, что при циркуляции кислые воды не могут оставаться постоянно кислыми и обязательно перейдут в щелочные или нейтральные.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АНАЛИЗОВ ВОД

Анализы вод обычно выражаются в частях радикалов или металлов на миллион. Чтобы выяснить из этой формы, является ли вода щелочной или кислой, необходимо произвести перечисление.

Для этой цели Stabler¹⁶ предлагает помножать полученные количества на реакционный коэффициент (величина обратная эквиваленту). Произведение, называет реакционной ценностью. Если вода нейтральная, реакционные ценности кислых и основных радикалов должны балансироваться. В своем методе геологической интерпретации анализов вод Palmer¹⁷ считает удобным выражать реакционные ценности в процентах, избегая таким образом фактора концентрации. Классификация Пальмера особенно останавливается на том факте, что раствор, в котором крепкие кислоты полностью уравниваются крепкими основаниями, является относительно инертным, тогда как раствор, в котором одна из групп преобладает над другой, относительно активен. Это особенно важно при определении соотношений и характера химического действия в различных водах.

Основными свойствами являются щелочность и степень солености. Степень солености измеряется по радикалам сильных кислот (SO_4 , Cl). Если основными радикалами являются частично или полностью щелочные металлы, говорят, что их пропорция солености первичная. Остальная соленость, относящаяся к радикалам Ca , Mg , Fe , называется вторичной. Если кислые радикалы в избытке, то мы имеем третичную соленость, или кислотность. Мерилон первичной щелочности является избыток радикалов щелочного металла по сравнению с крепкими кислотами; слабокислотные радикалы CO_3 и HCO_3 , уравнивающие избыток щелочноземельных

металлов, по сравнению с более крепкими кислотами дают вторичную щелочность¹⁸. Несмотря на то, что терминология Пальмера далеко не совершенна, его метод дает в наше распоряжение основу для сравнительного изучения, но для классификации природных вод он не пригоден. Нельзя им руководствоваться и при определении геологической истории вод.

Константы, которыми пользуются для перевода гран на галлон, на части на миллион или наоборот, следующие:

1 гран на галлон (США)	=	17,138 частей на миллион
1 гран на империал-галлон	=	14,285 " " "
1 часть на миллион	=	0,0588 грана на галлон (США)
1 часть на миллион	=	0,07 грана на империал-галлон

РУДНИЧНЫЕ ВОДЫ¹⁹

Хлористые воды. Как правило, рудничные воды состоят из нормальных почвенных вод данного района, несколько измененных присутствием

Анализы рудничных вод из верхних и нижних горизонтов железных и медных рудников Мичигана

(в частях на миллион)

	1	2	3	4
Cl	3,5	6,00	25 360	176 027
Br	—	—	—	2 200
CO ₃	24,2	41,60	Не определялась	—
SO ₄	18,8	12,10	1 045	110
Ca	12,9	15,20	7 902	86 478
Mg	2,0	9,60	566	20
Na	11,3	4,00	7 290	15 188
K	—	1,50		
Al ₂ O ₃ }	4,0	0,60	700	10
Fe ₂ O ₃ }				
Mn	—	—	—	4
Cu	—	—	—	16
Ni	—	—	—	6
SiO ₂	14,5	8,43	—	20
Потеря	2,8	—	—	—
Всего	94,0	100,26	42 863	280 490

1 — медный рудник Mass, Michigan. Вода с верхних горизонтов. Аналитик Dearborn, Chemical Works, Chicago. A. C. Lane. „Mine Waters“, „Thirteenth Annual Meeting“, Lake Superior Mining Institute, June, 1903, p. 31.

2 — рудник Newport, округ Gogebic, Michigan. Вода с верхних горизонтов. Аналитик R. D. Hall; свободная CO₂ 18,0. Остаток, просушенный при 100°С, 108,30. Van Hise and Leith, „Mon.“ 52, U. S. Geol. Surv., 1911, p. 543.

3 — железный рудник Republic. Семнадцатый горизонт. 57° F. Аналитик G. Terpekes пересчитывает на NaCl 18 510 и CaCl₂ 21 800. A. C. Lane, *op. cit.*, p. 10.

4 — медный рудник Quincy. Вода, просачивающаяся на 55-м горизонте. Такие же воды из рудников Calumet и Hecla содержат также небольшое количество цинка. Аналитик G. Fernekes. Преимущественно хлористые кальций и натрий и бромистый натрий. *Op. cit.*, p. 48. Следы бора и стронция, барий и CO₂ отсутствуют.

в них солей, образующихся при разложении руд. Там, где отсутствуют сульфиды, рудничные воды верхних горизонтов обычно годны для питья (они содержат углекислый кальций), но по мере углубления они содержат все более и более хлоридов. Примеры таких вод мы видим в железных и медных рудниках Мичигана. В таблице, помещенной на стр. 56, анализы 1 и 2 представляют состав вод верхних горизонтов циркуляции; 3 и 4 дают состав вод на глубоких горизонтах того же района, которые весьма отличаются от первых и содержат чрезвычайно много хлористого кальция. В районе месторождений медных руд воды глубоких горизонтов содержат некоторое количество меди, цинка, никеля и следы бора.

По имеющимся сведениям воды из рудников Kalgoorlie (Западная Австралия) сильно соленые и содержат преимущественно хлористый натрий в количестве нескольких процентов; они появляются на горизонте прунтовых вод на глубине нескольких сот футов от поверхности. В Great Boulder Proprietary вода содержала 9% хлористого натрия и столько же хлористого магния²⁰. В настоящее время такие же воды начинают показываться на глубоких горизонтах рудников Bendigo²¹. В этих рудниках сульфидов относительно мало. Анализ пробы, взятой на глубине 4 280' от поверхности в кварцевой жиле Victoria Reef, где температура воды равняется 114° Ф, следующий (в частях на миллион):

NaCl_4 1 308,45; Na_2SO_4 75,79; NaCO_3 37,18; CaCO_3 124,41;
 SiO_2 21,45; MgCO_3 45,76; $(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_3$ 2,86, всего 1 615,90.

Согласно Т. А. Rickard²² рудничная вода в Mammoth Pinal County (Аризона) содержит хлористый натрий в количестве 86 частей на миллион, а в рудниках Stratton's Independence и Cripple Creek (Колорадо) 51 часть той же соли.

Карбонатные воды. В свинцовых рудниках Wardner (район Coeur d'Alene) воды богаты углекислым железом (из присутствующего в руде сидерита) и отлагают большое количество лимонита. В пробе, взятой с горизонта Reed, рудник Bunker Hill and Sullivan, установлено присутствие твердых в количестве 70 частей на миллион; это главным образом двууглекислый и серноокислый кальций²³.

Е. Buckley²⁴ дает многочисленные анализы вод из свинцовых рудников юго-восточного Миссури. Воды выходят из песчаника La Motte и доломита Bonneterre обычно на глубине нескольких сот футов. Твердые присутствуют в количестве не более 500 частей на миллион; из этого количества 200 или больше частей пересчитываются на углекислые кальций и магний. Пересчитываемые на магниевую соль сульфаты составляют не более 200 частей на миллион, а хлористый натрий всего 50. Содержание SiO_2 незначительно. Все эти воды содержат небольшое количество свинца (не более 1 части на миллион), пересчитываемого на серноокислый свинец, и обычно следы цинка. Эти воды слабокислые преимущественно ввиду присутствия в месторождении небольшого количества пирита.

Сульфатные воды. Окисление пирита. Там, где присутствует значительное количество пирита, его окисление существенно изменяет состав вод. Радикал серной кислоты быстро повышается и нарушает равновесие, так что нормальные воды, относящиеся к группе углекислого кальция, изменяются и содержат преимущественно серноокислый кальций. Там, где еще больше увеличивается количество серной кислоты, воды становятся

богаты сернокислыми алюминием (от разложения серицита и других силикатов) и железом, причем последнее присутствует как в закисном, так и в окисном виде. Иногда присутствует свободная соляная кислота. В водах выше или на самом горизонте грунтовых вод эти сульфаты могут присутствовать в весьма значительных количествах. Ниже уровня грунтовых вод свободная кислота встречается редко, а сернокислый алюминий отсутствует. Железо присутствует в качестве закисного сернокислого железа, и при углублении количество его уменьшается. Типичные воды с сернокислым кальцием занимают большие пространства вокруг пиритовых месторождений и также достигают значительных глубин. Помимо вышеупомянутых сульфатов, рудничные воды окисленной зоны содержат все присутствующие в месторождении металлы. Особенно обилён сернокислый цинк; обычно присутствует сернокислая медь, свинец — реже; мышьяк — обычен, сурьма встречается редко.

В водах угольных копей наблюдается обилие сернокислых солей, как результат окисления пирита и марказита. Они часто богаты сернокислым аммонием, кальцием, железом и алюминием и даже свободной серной кислотой.

В рудничных водах железо присутствует в виде закисного сернокислого железа, из которого путем окисления образуется окисное. По имеющимся сведениям, если довольно крупно дробленный каменный уголь промывают дистиллированной водой, то в фильтрате получают свободную серную кислоту. Рудничные воды из угольных копей иногда содержат цинк, медь, кобальт и никель. Вода из угольных копей фирмы Dravo-

Анализы рудничных вод из Comstock

(в частях на миллион)

	1	2	3
Cl	1,27	19,00	127,60
SO ₄	380,38	474,00	209 100,00
CO ₃	115,03	20,45	—
K	8,39	53,40	—
Na	57,13	132,00	535,00
Ca	148,10	100,10	1 286,00
Mg	154,03	5,88	6 590,00
Al	—	1,37	9 670,00
Mn	—	—	885,10
Cu	—	—	147,50
SiO ₂	30,50	133,40	616,00
Fe	—	6,33	5 025,02
H	—	—	2 575,00
Общая соленость .	764,40	965,60	110 958,30

1 — воды с горизонта 600' рудника Savage. G. F. Becker, Mon. 3, U. S. Geol. Surv., 1882, p. 152.

2 — воды из шахты С и С на горизонте 2 250'. John. A. Reid, Bull. California Univ. Dept. Geology², 4, 1905, pp. 177—199.

3 — поверхностная вода из центральной штольни. Idem.

Doyle Company (Pennsylvania) по данным анализа, произведенного в питсбургской лаборатории Bureau of Mines (Горного бюро), содержит:

Свободной H_2SO_4	117	частей на миллион
$Fe_2(SO_4)_3$	4 970	" " "
$Al_2(SO_4)_3$	140	" " "
$FeSO_4$	54	" " "

Обычно присутствуют также большие или меньшие количества сернокислого кальция и магния.

Примеры. J. A. Reid провел ряд анализов вод Comstock (Невада) которые прекрасно иллюстрируют, как и где встречаются сульфатные воды. Анализ 3 представляет концентрированную сульфатную воду из окисленной зоны; 1 и 2 представляют воды с более глубоких горизонтов, образующиеся вследствие реакции между поднимающейся к поверхности водой, содержащей углекислый натрий, и серной кислотой из верх-

Анализы рудничных вод

	1	2	3	4	5
Cl	2,7	12,4	6,8	13,0	0,8
HCO_3	—	—	13,5	—	210,0
SO_4	6 153,2	124,8	406,5	2 672,0	1 088,0
SiO_2	107,6	18,0	23,0	47,7	64,0
AsO_4	—	—	Следы	—	—
Ca	345,3	46,4	151,2	132,5	564,7
Mg	25,2	14,5	28,2	61,6	22,4
Na	49,9	—	16,2	39,6	51,2
K	0,5	—	7,1	13,1	7,1
Fe'	} 474,6	} 6,6	1,8	—	—
Fe''			—	159,8	—
Mn	1,7	—	0,5	12,0	—
Zn	2 412,0	8,9	0,3	852,0	—
Cd	9,0	—	—	41,1	—
Al	142,1	—	—	83,5	—
Cu	3,7	—	Следы	59,1	—
Co + Ni	—	—	—	0,5	—
Sn	—	—	—	17,0	—
Всего	9 727,5	231,6	655,1	4 204,5	2 308,8

1 — вода из рудника Alabama Coon, Joplin, Missouri. Аналитик H. N. Stokes.

2 — вода из Rothschnberger Stollen, Freiberg, Саксония, в месте ее выхода. Аналитик Frenzel. Пересчет T. W. Clarke, Data of Geochemistry, „Bull.“ 616, U. S. Geol. Surv., 1916, p. 632.

3 — вода с горизонта 2 200', рудник Green Mountain, Монтана, в отдалении от жилищ. Аналитик W. F. Hillebrand.

4 — вода с горизонта 1 200', квершлаг, St. Lawrence Butte (Монтана). Олово возможно попало случайно? Чуть кислотная. Аналитик W. F. Hillebrand. При соприкосновении с воздухом Fe'', вероятно, перешло в Fe'''.

5 — Cripple Creek (Колорадо); вода из штольни El Paso, служащей стоком для самых нижних выработок. Аналитик R. C. Wells, Fe + Al и пр. 0,6, следы свободной CO_2 .

них зон. Руды содержат преимущественно золото и серебро и относительно мало пирита.

Некоторые из рудничных вод района Joplin (месторождения цинка), где, помимо цинкового блеска и галенита, руды содержат также пирит и марказит, чрезвычайно богаты сернокислым цинком и содержат также сернокислые железо и алюминий (см. анализ 1 в таблице на стр. 59).

Вода в штольне Rothschönberger, дренирующей рудники в Freiberg (Саксония), представляет прекрасный пример разбавленной рудничной воды, прошедшей через старые выработки жил, содержащих пирит, галенит и цинковый блеск (см. анализ 2).

Тот же принцип иллюстрируется анализом двух вод из рудников Butte (Монтана). Вода для анализа 3 взята с глубокого горизонта, но довольно далеко от главной системы жил; для 4 — с горизонта 1 200' в одном из главных рудников; эта вода приобрела габитус воды верхней окисленной зоны, вследствие того что горизонт воды искусственно понизился и быстро протекает окисление пирита; вода для анализа 5 взята с глубокого горизонта Cripple Creek.

У А. С. Lawston²⁵ находим описание рудничной воды из рудника Ruth, глубина 335' от поверхности. Халькозиновый горизонт порфирировых руд

Анализы рудничных вод из Ducktown (Tennessee) и Cananea (Mexico). Аналитики G. W. Hawley (для Cananea) и R. C. Wells (для Ducktown)

(в частях на миллион)

	1	2	3	4
SO ₄	5 064	4 457	415,8	476,8
Cl	Не определялся	22	0,7	0,4
SiO ₂	76	56	47,0	49,9
Al	Не определялся	22	14,5	19,1
Fe''	305	524	71,4	89,2
Fe'''	—	—	20,3	55,9
Ca	436	753	19,7	30,4
Mg	61	86	5,2	6,2
Mn	236	153	0,2	0,1
Zn	Не определялся	252	2,4	2,9
Cu	1 659	60	28,1	11,0
K	Не определялись	198	2,7	2,2
Na			5,2	5,5
Кислотность (H ₂ SO ₄)	970	Отсутств.	210,2	97,5

1 — Cananea, горизонт 300'.

2 — Cananea, горизонт 900'.

3 — Шахта Calloway, Ducktown (Tennessee), (застойный горизонт вод (глубина 90' от поверхности).

4 — Шахта Calloway, Ducktown (Tennessee), стоячая вода на 37' ниже горизонта воды.

в Еу (Невада). Температура равнялась 16°C , т. е. была, бесспорно, выше средней годовой температуры для данного района. Содержание твердых, в целом, 1 094 части на миллион, из которых 359 частей пересчитаны на сернокислый кальций, 130 на сернокислый магний, 93 на щелочные хлориды, 160 на сернокислое закисное железо, 7 на сернокислое окисное железо. По четырем анализам рудничных вод из медных рудников Cananea (Мексика)²⁶ и Ducktown (Тэнэсси)²⁷ можно судить об изменении, имеющем место по мере углубления. Воды Cananea появляются на верхнем и самом низком горизонтах; они просочились сквозь серицитовую породу с значительным содержанием халькоцита и пирита. Воды Ducktown также кислые; пробы взяты из верхних почвенных вод.

На более значительной глубине воды содержат больше сернокислого кальция и сернокислого закисного железа, но значительно меньше меди. Сернокислое окисное железо восстанавливается в закисное, вероятно халькозином.

-
- ¹ F. W. Clarke. *Geochemistry*, „Bull.“ 770, U. S. Geol. Survey, 1924, p. 116.
R. W. Dole and H. Stabler. „Water-Supply Paper“ 234, U. S. Geol. Survey, 1909, p. 78.
- ² E. M. Shepard. *Underground waters of Missouri*. „Water-Supply Paper“ 195, U. S. Geol. Survey, 1907, p. 81.
- ³ C. W. Washburne. *Chlorides in oil field waters*. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 45, 1915, pp. 687—693. G. S. Rogers. *Chemical relations of the oil field waters in the San Joaquin Valley, California*. „Bull.“ 653, U. S. Geol. Survey, 1917.
- ⁴ F. A. Jones. *New Mexico mines and minerals*. 1904, p. 309.
- ⁵ „Zeitschr. Deutschl. geol. Gesell.“, 19, p. 854, und 20, p. 155.
- ⁶ Verhandl. Polytech. Gesell.“ Berlin, 1903, II, p. 161.
- ⁷ Les eaux souterraines, etc., II, 2, p. 106.
- ⁸ F. W. Clarke. *Geochemistry*. 1924, p. 241.
E. W. Hilgard. „Am. Jour. Sci.“ 4th ser., 2, 1896, p. 100.
Cameron and Bell. „Bull.“, 33, Bureau of Soils, 1906.
F. K. Cameron, „Bull.“ 17, Bureau of Soils.
- ⁹ C. A. Fisher. *Report on the Roswell artesian area*. „Water-Supply Paper“ 158, U. S. Geol. Survey, 1906.
- ¹⁰ W. C. Mendenhall. *Hydrology of San Bernardino Valley*, „Water-Supply Paper“ 142, U. S. Geol. Survey, 1905.
- ¹¹ A. C. Peale. *Lists and analyses of the mineral springs of the United States*. „Bull.“ 32, U. S. Geol. Survey, 1886, pp. 58—65.
- ¹² Winslow Anderson. *Mineral springs, etc., of California*. 1892, pp. 136—154.
G. A. Waring. *Springs of California*. „Water-Supply Paper“ 338, U. S. Geol. Survey, 1915, p. 109.
- ¹³ „Water-Supply Paper“ 530, U. S. Geol. Survey, 1925, pp. 53—72.
- ¹⁴ Jacquot and Willm. *Les eaux minérales de la France*. Paris, 1894.
- ¹⁵ *Les eaux minérales de la France*. Paris, 1894.
- ¹⁶ Herman Stabler. *The mineral analysis of water for industrial purposes and its interpretation by the engineer*. „Eng. News“ 60, 1908, p. 356. Также глава о промышленном применении анализов вод в „Water-Supply Paper“ 274, U. S. Geol. Survey, 1911, pp. 165—181.
- ¹⁷ Chase Palmer. *Geochemical interpretation of water analyses*. „Bull.“ 479, U. S. Geol. Survey, 1911.
- ¹⁸ Cf. F. W. Clarke. *Geochemistry*. 1916, p. 63.
G. S. Rogers. *The interpretation of water analyses by the geologist*. „Econ. Geol.“, 12, 1917, pp. 56—88.
- ¹⁹ W. H. Emmons and C. L. Harrington. *A comparison of the waters of mines and of hot springs*. „Econ. Geol.“, 8, 1913, 653—659.
E. T. Hodge. *The composition of waters of sulphide ores*. „Econ. Geol.“ 10, 1915, pp. 123—139.

W. H. Emmons. The enrichment of ore deposits. „Bull.“ 625, U. S. Geol. Survey, 1917, pp. 83—106.

²⁰ T. A. Rickard. Formation of bonanzas. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“, 31, 1901, pp. 198—220.

²¹ W. J. Rickard. Deep mining at Bendigo. „Mining Mag.“, 1910, p. 281.

²² „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“, 31, 1901, pp. 198—220.

²³ F. L. Ransome. „Prof. Paper“ 62, U. S. Geol. Survey, 1908.

²⁴ Missouri Bur. Geol. and Mines, 9, pt. 1, 1909, p. 249.

²⁵ „Bull. California Univ. Dept. Geol.“ 4, 1906, pp. 287—357.

²⁶ W. H. Emmons. Enrichment of ore deposits. „Bull.“ 625, U. S. Geol. Survey, 1917, p. 87.

²⁷ W. H. Emmons and F. B. Lancy. „Prof. Paper“ 139, idem, 1926, p. 69.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ОТЛОЖЕННЫЕ МИНЕРАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ НА ПОВЕРХНОСТИ

В подземных водах непрерывно протекают процессы растворения и осаждения. Большинство месторождений полезных ископаемых образовалось вследствие реакций, возникающих в подземных растворах, что подтверждается дальнейшим изложением. Однако, наблюдать ход этих химических изменений можно только на поверхности или в рудниках, поэтому величайший интерес представляют отложения, образуемые естественными водами в тех пунктах, где они выходят на поверхность в виде ключей. Осаждение, имеющее место в реках, озерах и морях, будет описываться в последующих главах настоящего труда.

В общем состав отлагаемого ключами материала несложен. Приняты следующие подразделения: месторождения лимонита (водная окись железа), углекислого кальция и кремнезема. Часто наблюдаются смеси двух из этих веществ. Такие месторождения носят названия: 1) охр, 2) туфов, травертиновых или известковых, и 3) кремнистых натеков.

Осаждение частично обусловлено окислением, остыванием или выделением CO_2 , но, помимо этого, способствуют осаждению водоросли и микроорганизмы, впитывающие в себя гели SiO_2 , углекислый кальций, коллоидальные водные окиси железа и двуокись марганца¹.

Отложения лимонита и углекислого кальция. Лимонит нередко отлагается поверхностными метеорными водами, содержащими углекислое и серноокислое закисное железо в виде охр. Многие из таких охр содержат небольшие количества марганца и следы меди, мышьяка, никеля и кобальта. Воды источников также отлагают некоторое количество лимонита, так что в туфах источников можно видеть налеты этих соединений. Анализы охр приводятся F. W. Clarke².

Наиболее обычным из отложений источников является, пожалуй, углекислый кальций; однако, обычные поверхностные воды, не содержащие больших количеств этого соединения, не способны образовать крупные отложения. Выходящие из известняков горячие воды часто отлагают значительные массивы таких туфов, захватывающие площади во много акров и образующие мощные ступенчатые пласты. Прекрасным примером такого туфа служит местность Mammoth Hot Springs, Yellowstone Park. Осадки представляют собой почти чистый углекислый кальций с небольшой примесью углекислого магния. Во многих из таких ключей углекислый кальций представляет собой наименее растворимый компонент, остающийся после

того, как остальные выщелачиваются. Так, ключи Glenwood (Колорадо), содержащие хлористый натрий, образуют значительное отложение, а в ключах Ojo Caliente (Новая Мексика), содержащих углекислый натрий, кальция мало, и у пункта, где они раньше выходили на поверхность, имеется отложение пористого туфа, содержащего свыше 90% углекислого кальция. Этот карбонат отлагается, без сомнения, в кристаллической форме, хотя он обычно мелкозернистый. Такие отложения не всегда представляют собой кальцит, так как во многих отложениях ключей обнаружено присутствие арагонита, как, например, у источников Hamman Meskoutine в Алжире и в Карлсбаде в Богемии³.

Отложения окиси кремния (кремнезема). Близ горячих источников, содержащих много SiO_2 водный кремнезем отлагается в большом количестве вследствие испарения, смешения с другими водами или, согласно W. H. Weed, под действием особого вида водорослей, живущих в горячих водах. Материал отлагается в виде коллоидального геля, который в дальнейшем кристаллизуется в опаловый или халцедоновый кремнезем. Скопления кремнезема образуют горячие источники Yellowstone Park; они содержат SiO_2 в количестве свыше 95%. Нередко присутствует натрий в качестве хлористого или углекислого соединения. Источники Steamboat (Невада)⁴ отлагают чистый кремнезем или смеси углекислого кальция с кремнеземом; последний присутствует в виде халцедона или мелких кристаллов кварца (рис. 4 в табл. 1 в конце книги). Этот туф содержит весомые количества сернистых ртути, свинца, меди, мышьяка и сурьмы. Анализ обнаружил также присутствие золота и серебра и следы марганца, цинка, кобальта и никеля. Сернистая сурьма (Sb_2S_3) отлагается в виде аморфного «метастибнита» в количестве, достаточном, чтобы местами придать отложению красный цвет. В шахте, пройденной в гравии в непосредственной близости к гравиевому холму, из которого вытекают источники, Lindgren⁵ нашел хрупкие кристаллы стибиита, покрывающие гальки и тонкие налеты черного опала и зерна пирита и марказита.

Опаловый туф (рис. 6 в табл. 1 в конце книги) из Yellowstone Park часто содержит мышьяк, в особенности в виде скородита ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); вблизи одного из источников, импрегнированного серебром, Weed⁶ отметил присутствие риолита со следами золота и серебра. В общем месторождения в Yellowstone, образовавшиеся отложением источников содержат лишь весьма малые количества более редких металлов. Weed и Pirsson⁷ упоминают о присутствии аурипигмента и реальгара вместе с самородной серой в кремнистом туфе из бассейна гейзера Norris. У De Launey находим упоминание о месторождении, содержащем аурипигмент в St. Nectaire Puy-de Dôme (Франция).

Анализ известкового туфа, отложенного восходящим источником, содержащим углекислый кальций (в руднике Geyser, Silver Cliff (Колорадо), на уровне 2 000', дает следы свинца, меди, никеля и кобальта. В Hamman Meskoutine (Алжир) такой же источник, по словам Daubrée, отлагает туфы и пизолитовые потоки, в которых (в концентрациях) скелеты углекислого кальция чередуются с пиритовыми; тот же источник отлагает стронцианит.

В месторождениях источников в области гейзеров Новой Зеландии обнаружены ртуть, золото и серебро. Натёки, отложившиеся из горячих источников Whakarewarewa, Roturoa (тип хлористый натрий — окись кремния)⁸, были подвергнуты анализу, причем было обнаружено присут-

стве серебра и золота, первого в количестве почти 5 унций, второго около 1 долл. на тонну.

В De Lamar, Idaho, Линдгрэн нашел отложения кремневого халцедона в риолите, в котором им было обнаружено присутствие остатков растений и следы золота и серебра⁹ (рис. 5).

Установлено, что источники, будь они горячие или холодные, могут отлагать значительное количество лимонита с мышьяком, марганцем и следами других металлов; одинаково доказано и то, что углекислые и кремнекислые отложения горячих источников, в особенности типов NaCl или Na_2CO_3 содержат небольшие количества более редких металлов, как-то: золота, серебра, меди, свинца, цинка, сурьмы, мышьяка, олова и ртути. Промышленная руда добывается из месторождений, образовавшихся на поверхности путем отложения из минеральных источников, лишь в исключительных случаях. В Новой Зеландии такое месторождение разрабатывают на ртуть; известны случаи эксплуатации железных и марганцевых руд.

Чрезвычайно малое количество металлов в отложениях источников Yellowstone National Park многие приводят как аргумент против гидротермальной теории генезиса рудных месторождений.

Отложения прочих жильных минералов¹⁰. Наиболее обычными продуктами отложения на поверхности являются кальцит, кварц, халцедон и опал; кроме этих минералов, в отложениях нередко встречаются такие минералы, как барит, анкерит, сидерит, флюорит, реже гипс, стронцианит, целестин и цеолиты. Следы фтора присутствуют во многих водах как поверхностных, так и глубинных, но в большом количестве этот элемент находят в водах типичных углекислым натрием. Мы имеем мало примеров отложения фтора источниками. В кристаллической форме этот элемент встречается редко; возможно, что при анализах туфов источников химики просто не делают исследования на фтор. Карлсбадские источники отлагают пизолитовый материал состоящий из арагонита и кальцита. По исследованиям Berzelius¹¹ и других более современных химиков, этот туфовый материал содержит довольно значительное количество фтористого кальция. Анализ лимонитовой разновидности отложения показал 0,272% мышьяка¹². Из помещаемого ниже анализа видно, что могут отлагаться различные фосфаты, так же как и карбонаты железа и стронция.

Состав отложений Карлсбадских источников
(аналитик Berzelius)

	A	B
Углекислое закисное железо	12,13	—
Окисное железо	19,35	0,43
Окись марганца	—	Следы
Углекислый кальций	53,20	96,47
Углекислый стронций	—	0,30
Основное фосфорнокислое железо	1,77	—
Фосфорнокислый алюминий	0,60	0,10
Фосфорнокислый кальций	—	0,06
Фтористокислый кальций	—	0,99
Окись кремния	3,95	—
Вода	9,00	1,59

В Plombières (Вогезы) из гранита выходят ключи с температурой 70° С. Соленость их незначительна (360 частей на миллион), и содержат

они преимущественно серноокислый натрий и окись кремния, следы мышьяка и фтора. Откуда произошли эти соли — не совсем ясно; источники, видимо, не находятся в непосредственной связи с вулканическими породами. Они выходят из ясно выраженных трещинных жил, содержащих кварц и флюорит; Daubr e¹³ установил, что эти воды действительно отлагают кальцит, арагонит и флюорит. Исследование кирпичей, которыми 2 000 лет назад римляне пользовались для сооружения бань в Plombi eres, установило, что эти кирпичи содержат цеолиты, преимущественно апофиллит (содержащий фтор) и кабацит с опалом и халцедоном. По словам Daubr e, кабацит отлагается также от источников в Luxeuil и Bourbonne-les-Bains, температура которых 46 и 68° С.

Кристаллы гипса весьма часто находят близ источников, воды которых насыщены серноокислым кальцием. У Weed¹⁴ мы можем найти описание отложения этого минерала в трещинах третичного источника вблизи горячих источников Hunter, Livingstone (Монтана); здесь образуется стильбит (вид цеолита) и гипс. Температура источников 64° С; они представляют собой слабо минеральные воды. Присутствие стильбита обнаружено Weed¹⁵ в жилородном месторождении, содержащем золото и серебро, отложившемся, как полагают, из современных горячих источников в Boulder (Монтана); стильбит встречается вместе с преобладающим кварцем, халцедоном и кальцитом.

Lindgren установил присутствие в материале некоторого количества адуляра. По его исследованиям¹⁶ одно отложение в Новой Мексике содержит около 89,60% углекислого кальция и 0,9% фтористого кальция. В настоящее время источников здесь нет, но возможно, что источник Ojo Caliente, протекающий несколько ниже по той же долине, раньше выходил здесь на поверхность. Как это можно видеть по анализу, помещенному на стр. 53, вода этого источника содержит значительное количество фтора. Близ известковых туфов шахтой вскрыта жила кристаллического флюорита; считают, что эта жила образовалась отложением из тех же вод. Как в туфе, так и в жилах, имеются следы золота и серебра, а в жильном материале наблюдалось некоторое количество кристаллов барита. W. H. Emmons и E. S. Larsen¹⁷ описывают подобный же случай, наблюдавшийся ими в Wagon Wheel Cap (Колорадо). Травертин содержит 0,22% F, 0,007% ZnO и 0,045% BaO. В реке, протекающей близ отложения источника, отлагаются барит, флюорит, пирит, опал и яшмы. Близ этого места в замещенной породе присутствуют в небольшом количестве золото и серебро.

J. E. Hibschi¹⁸ описывает жилы и замещения флюорита в кварц-порфире и меловом песчанике близ источников Teplitz, содержащих углекислый натрий; по имеющимся здесь признакам можно с уверенностью сказать, что флюорит отложился из термальных вод.

Барит отлагается в значительно большем количестве, чем флюорит. Как сказано выше, многие углекислые и даже серноокислые воды содержат небольшое количество бария. Доказано, что в присутствии избытка CO₂ щелочные бикарбонаты могут удерживать барий в растворе, не взирая на присутствие сульфатов; повидимому, образование серноокислого бария задерживается также присутствием хлористого натрия и других солей. Haidinger наблюдал в Карлсбаде¹⁹ отложение теплыми водами барита; то же самое Becke говорит о Теплице²⁰. В Idaho Springs (Колорадо) горячий источник, содержащий углекислый натрий, выходит из гранитных

пород; у устья этого источника, в ячеистой и разложившейся дайковой породе присутствуют в большом количестве кристаллы барита. Sprug²¹ установил, что барий содержится в этой дайковой породе; он заключает, что барит образовался вследствие воздействия вод на породу. Тем не менее, барит гораздо чаще встречается в хлористокальциевых водах, в особенности связанных с осадочными породами. Упоминание о такого рода отложении барита имеется у многих авторов; весьма вероятно, что везде, где этот минерал встречается в значительных количествах, он образовался именно из таких вод.

Прекрасный пример мы видим в одном руднике, расположенном близ Clausthal (Германия)²². Здесь на глубине 1 200' наткнулись на источник насыщенного рассола, без сомнения, получившего свои соли из осадочных пород. Этот рассол содержал хлористый натрий в количестве 67,555 г/л, хлористый кальций — 10,509 г, хлористый магний — 4,360 г, хлористый калий — 0,350 г, хлористый барий — 0,314 г и хлористый стронций — 0,854 г. Там, где воды этого подземного источника смешивались с обыкновенными рудничными водами, содержащими сульфаты, имело место осаждение большого количества бария и сернокислого стронция, так что через несколько лет трубы, по которым воды откачивались на поверхность, покрылись внутри толстым слоем осадка. Этот плотный материал содержал 92,44% сернокислого бария и 4,32% сернокислого стронция. Полагают, что реакция замедляется присутствием хлористых натрия и магния.

По словам P. Krusch²³, барит осаждается в насосах некоторых Вестфальских угольных копей, здесь происходит реакция между насыщенным рассолом из триасовых песчаников и питьевой водой с сульфатами; все они поднимаются к поверхности по отдельным сбросам и все получают свои соли из осадочных пластов. В карбоне и девоне встречаются жилы барита с небольшими количествами галенита, пирита и пр. На более низком горизонте залегают кварцевые жилы, содержащие галенит и цинковую обманку. По мнению Krusch, как то, так и другое месторождение образовались под действием этих соленых вод. По имеющимся сведениям такого же рода настилы барита образуются в трубах насосных установок в некоторых английских угольных копях²⁴.

Headen²⁵ описывает интересную группу источников на северном ответвлении р. Gunnison, Delta County (Колорадо). Эти источники холодные, но содержат свободную CO₂ и немного сероводорода и по типу являются хлористонатриевыми. В одном из источников содержится барит и во всех небольшое количество стронция. Источник Drinking содержит соли в общей сложности в количестве приблизительно 1 656 частей на миллион. Присутствуют (в нижеприводимом порядке) небольшие количества кальция, калия, магния, бария (0,0132 г/л), стронция (0,0066 г/л), лития, марганца, аммония, железа, алюминия, а также следы цинка; установлен также кислый радикал (0,6254 г/л), окись кремния, бор и бром (последние три в очень незначительных количествах). Источник отлагает туф, состоящий из углекислого кальция, содержащий 5,42% барита; гипс и сера отсутствуют.

Иногда наблюдается присутствие углекислого закисного железа, как например в Карлсбадском Sprudelstein и в месторождениях лимонита, образовавшихся в болотах. Отложения минералов магния встречаются нечасто. Н. Leitmeir²⁶ дает описание отложения водного углекислого

магния из источников Lohitsch (Штирия); многие из источников, в особенности же те из них, воды которых протекали по осадочным пластам, содержат органические вещества и, вероятно, могут отлагать углеводы.

В некоторых классах жил обычными жильными минералами являются только такие, которые способны отложиться из вод, богатых хлористым углекислым натрием. Конечно, имеется целый ряд минералов, которые не могут развиваться в воде при господствующих на поверхности условиях температуры и давления; к таким минералам принадлежат турмалин, гранат, полевые шпаты и тому подобные силикаты.

Резюме. Отложения, образующиеся из поднимающихся на поверхность вод метеорного происхождения, содержат опал, халцедон, углекислый кальций, лимонит, водную окись марганца, барит, сидерит и пирит. Путем окисления сероводорода часто отлагается сера. В месторождениях охры часто присутствуют малые количества мышьяка, меди, свинца, цинка, никеля и кобальта.

Источники типов углекислого кальция, хлористого натрия — кремнезема в вулканических областях часто образуют значительные отложения опала, халцедона, кварца, углекислого кальция, лимонита, барита, сидерита, иногда также пирита. Они также отлагают флюорит, который очень редко находят в отложениях метеорных вод; анализ обнаруживает присутствие небольших количеств ртути, сурьмы, мышьяка, свинца, меди, цинка, олова, серебра и золота.

Таким образом, более редкие металлы особенно обращают на себя внимание; воды характерны тем, что содержат довольно значительные количества боратов, арсенатов и флюоридов.

Список руководящих минералов: сера, кварц, опал, халцедон, лимонит, вад, псиломелан²⁷, кальцит, арагонит, сидерит, стронцианит, барит²⁸, гипс, целестин, флюорит, скородит, пирит, марказит, реальгар, аурипигмент, киноварь, стибнит, шабазит, апофиллит и стильбит.

¹ W. H. Weed. "Ninth Ann. Rept." U. S. Geol. Survey, 1889, pp. 613—676.
H. Molisch. Die Eisenbakterien. Jena, 1910. "Jour. Chem. Soc." 92, pt. 2, 1907, p. 888, abstract.

² Geochemistry, "Bull." 770, U. S. Geol. Survey, 1924, p. 206.

³ H. Vater. "Zeitschr. Kryst. u. Min." 35, 1902, p. 149.

⁴ G. F. Becker. The quicksilver deposits of the Pacific coast. "Mon." 13, U. S. Geol. Survey, 1888, p. 341.

⁵ W. Lindgren. "Trans. Am. Inst. Min. Eng.", 36, 1906, pp. 27—36.

⁶ Mineral vein formation at Boulder Hot Springs, Montana, "Twenty First Ann. Rept.", U. S. Geol. Survey, pt. 2, 1899—1900, pp. 223—255.

⁷ Occurrence of sulphur orpiment and realgar in the Yellowstone National Park, "Am. Jour. Sci.", 3d ser., 42, 1891, pp. 401—405.

⁸ J. M. Bell. "First Ann. Rept.", N. Z. Geol. Surv., 1907, p. 100.

⁹ The gold and silver veins of Silver City, etc., "Twentieth Ann. Rept.", U. S. Geol. Survey, pt. 3, 1898, p. 187.

¹⁰ Roth. Allgemeine und chemische Geologie, 1, 1899, pp. 564—596. В книге дана прекрасная сводка данных относительно отложения источников.

¹¹ Pogg. Ann." 74, 1823, p. 149.

¹² Blum and Leddin. "Am. chem. pharm." 73, 1950, p. 217.

¹³ Les eaux souterraines, 3, p. 31.

¹⁴ Economic value of hot springs at hot springs deposits. "Bull." 260, U. S. Geol. Survey, 1904, pp. 298—604.

¹⁵ Mineral vein formation at Boulder Hot Springs, Montana. "Twenty First Ann. Rept.", U. S. Geol. Survey, pt. 2, 1899—1900, pp. 233—255.

¹⁶ "Econ. Geol." 5, 1910, pp. 22—27.

- 17 „Econ. Geol.“ 8, 1913, pp. 235—246.
- 18 „Tsch. m. u. p. Mitt.“ 25, 1906, pp. 482—488.
- 19 „Jahrb.“ K. k. Reichsanstalt, 5, 1854, p. 142.
См. также Delkeskamp, R., Entstehung und Wegführung des Baryj. „Notizblatt d. Ver. f. Erdkunde (Darmstadt) (4), 21, 1900, pp. 55—83.
- 20 „Tsch. M. u. P. Mitt.“ 5, 1883, p. 115.
- 21 J. E. Spurr. „Prof. Paper“ 63, U. S. Geol. Survey, 1908, p. 165.
- 22 Lattermann. Die Lautenthaler Soolquelle und ihre Absätze. „Jahrb. Preuss. geol. Landesanstalt.“, 1888, pp. 259—283. Ref. in Stelzner and Bergeat, Die Erzlagerstätten, II, 1905—1906, p. 1218.
- 23 „Monatsberichte“. Deutsch. geol. Gesell.“, 1904, p. 36; Ref. in „Zeitschr. prakt Geol.“ 12, 1904, p. 252.
- 24 J. T. Dunn. „Chem. News“ 35, 1877, p. 140.
- 25 The Doughty Springs, etc., „Proc.“, Colo. Sci. Soc., 8, 1905, pp. 1—30.
- 26 „Zeitschr. Krystall. u. Min.“ 47, 1909, p. 104.
- 27 Иногда содержит вольфрам. См. W. Lindgren, „Econ. Geol.“ 17, 1922, pp. 201—206. Hewett нашел водный кальциево-марганцевый силикат, называемый ориентитом: он считает, что этот минерал был отложен горячими ключами. „Am. Jour. Sci.“ 5th ser., 1, 1921, p. 491.
- 28 Барит, содержащий свинец, изоморфная смесь барита с англезитом, найден R. Ohasi в виде отложения горячих источников (в Японии). „Mineralogical Mag.“, 19, 1920, pp. 73—76.
-

СВЯЗЬ, СУЩЕСТВУЮЩАЯ МЕЖДУ МИНЕРАЛЬНЫМИ МЕСТОРОЖДЕНИЯМИ И МИНЕРАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

В природе можно непосредственно наблюдать процесс отложения многих рудных минералов, например, лимонита из железосодержащих вод; серы путем разложения растворенного в воде сероводорода; образование остаточного лимонита, никелевых силикатов и пиролюзита при разложении соответствующих пород метеорными водами, поваренной соли или буры испарением воды из озер и т. д. Нельзя непосредственно наблюдать процессы образования таких месторождений, как например месторождений глубоких жильных зон или связанных с интрузивными контактами.

Восходящие минеральные источники нередко наблюдаются в некоторых месторождениях, в особенности тех, которые образовались в открытых трещинах, но приписывать этим источникам генетическую роль можно лишь с осторожностью. Наблюдая такой источник в контактово-метаморфическом месторождении или в жиле глубокой зоны, например жиле касситерита, трудно предположить какое-либо его участие в образовании месторождений. Циркуляция подземных вод вряд ли могла держиваться одного и того же пути в течение долгого периода глубокой эрозии, обнажившей породы с глубины многих тысяч футов от поверхности. Образование рудных месторождений обычно занимает сравнительно непродолжительные эпохи.

Среди довольно обширного класса жил, образование которых близ поверхности и в не столь отдаленную геологическую эпоху не вызывает сомнений, можно с уверенностью ожидать сохранения материнских растворов. Но даже и в этом случае подход должен быть весьма осторожным: может случиться, например, что источник насыщен водою верхней зоны циркуляции, которая проходит по той же трещине.

Выше уже упоминалось об источнике Plombières, и, кажется, не вызывает сомнения, что здесь кварцево-флюоритовые жилы отложились из тех же горячих вод, которые и поныне выходят здесь из трещин. Daubrée¹ говорит, что в триасовых отложениях Центрального плато и Вогез часто встречаются жилы и значительное окремнение подобно наблюдаемым в Plombières. Кварц сопровождается баритом, флюоритом и, иногда, галенитом.

Источники, содержащие преимущественно хлористый натрий (Bour-

bon-l'Archambault², в той же области), выходят на поверхность из трещины в триасовых отложениях, содержащих кварц с галенитом, баритом и флюоритом. Трещины идут параллельно дайкам слюдяного порфира (минетт?). Температура вод — 53° С и общее содержание солей 3 186 частей на миллион, из которых 1 770 частей падает на хлористый натрий. Присутствуют бром, иод, фтор, мышьяк и медь; соли, вероятно, произошли из триасовых и пермских пород. Отложения источников содержат щелочноземельные карбонаты и 0,07% окиси меди. Температура источников Lamou (близ Montpellier, юг Франции) 34—47° С; их воды содержат 1500 частей твердого осадка на миллион; преобладают щелочные карбонаты, но определены также углекислые кальций и магний, свидетельствующие о возможной примеси метеорных вод. Анализом обнаружены следы бария, мышьяка, меди, свинца, никеля и кобальта³. Полагают, что эти источники генетически связаны с излиянием базальтов соседних областей, а также с жилами, содержащими пирит, арсенопирит и халькопирит в жильной породе из кварца и барита. Полагают, что барит отлагается современными водами.

Источники Эмса⁴, содержащие преимущественно углекислый натрий, по мнению Delkeskamp, выходят из жильной трещины, представляющей собой продолжение кварцевой жилы и выполненной халькопиритом в соседстве с базальтами.

Sandberger и Delkeskamp установили, что горячие источники Висбадена, содержащие преимущественно хлористый натрий, тесно связаны с кварцевой жилой, содержащей тетраэдрит; обычны жилы барита и кальцита, так же как и вкрапленность барита, образование которого связывают с действием ранних (третичных) вод. О тесной связи вод с рудоносными жилами, согласно Delkeskamp, свидетельствуют также источники Kreutznach (содержащие преимущественно хлористый натрий), выходящие на поверхность вблизи многочисленных жил, минерализованных кальцитом, баритом и флюоритом с медными и ртутными минералами. Покрывающие третичные породы содержат вкрапленность барита, что свидетельствует о значительном возрасте источников, а также и о том, что когда-то они выходили на поверхность на более высокой отметке. Полагают, что содержащиеся в воде соли произошли из осадочных пород. Широкое распространение барита в тесной связи с источниками, содержащими в качестве главного компонента большое количество хлористого натрия, приводит к определенным заключениям.

В рудниках Freiberg (Саксония) во многих местах вскрыты подземные источники, температура которых равняется 26° С. Эти источники описывают Stelzner и Bergeat⁵, но вряд ли можно предполагать, чтобы они были генетически связаны с месторождениями. Горячие источники в рудниках Корнуэлл (близ Redruth) содержат значительное количество лития, что увязывается с обилием мусковита в породах этой области.

Трудно представить, что эти воды являются остатками тех самых вод, которые отложили жилы, характеризующиеся комплексом минералов, образованных на значительной глубине под большим давлением и при высокой температуре в весьма отдаленную геологическую эпоху.

В области Кордильер (США) примеры минеральных источников в жилах не так часты, несмотря на обилие термальных вод. Причину этого следует, вероятно, искать в тех больших физико-орографических изменениях, которые имели место почти по всей этой области и не

в столь отдаленное время и вызвали понижение или отклонение выхода этих источников на поверхность. В Silver Cliff на горизонте 2 000' в руднике Geysers S. F. Emmons⁶ обнаружил высоконапорный клоч, содержащий преимущественно содовые воды. В воде установлено присутствие свободной CO_2 и небольших количеств меди, свинца и цинка; температура $26,5^\circ \text{C}$. Шахта заложена в риолитовом туфе до глубины 1 850'; на этой глубине, на контакте между туфом и докембрийским гнейсом, обнаружена жила с галенитом, цинковой обманкой, тетраэдритом, аргентитом и др. в жильной породе, состоящей из кальцита, барита и кварца. Туфовые выносы источника состоят преимущественно из углекислого кальция со следами свинца, цинка, меди, никеля и кобальта. Возможно, что в данном случае восходящие воды могли быть генетически связаны с месторождением.

В жиле Comstock⁷ горячие воды были обнаружены в самом начале эксплуатации. Вряд ли можно сомневаться, что рудное тело отложено именно этими водами; Reid считает, что и в настоящее время эти воды растворяют и отлагают золото, серебро и пирит. Becker установил, что господствующую в этой жиле высокую температуру можно приписать только восходящим водам. Reid⁸ произвел исследование остатка после испарения воды, взятой им с горизонта 2 250' от шахты C и G. Он обнаружил присутствие 2,92 мг серебра и 0,298 мг золота на тонну раствора. Эта вода, температура которой $46-81^\circ \text{C}$, содержит твердые соли в количестве 965 частей на миллион, состоящие преимущественно из сульфатов кальция и натрия, а также 133 частей кремнезема. Воды, без сомнения, не принадлежат к чистому типу восходящих вод; состав в общем тот же, что и обыкновенных рудничных вод; возможно, что имеет место смешения метеорных рудничных вод с чрезвычайно горячей восходящей водой. Горячие воды этого же типа (сернокислого кальция), с некоторой примесью SiO_2 и углекислого натрия, имеются в руднике Tonopah (Невада), но анализ их не обнаружил присутствия сульфидов, и Bastin считает недоказанным, что именно эти воды способствовали образованию месторождения.

Особенно убедительные данные относительно способности восходящих эффузивных источников к отложению золото-сереброносных жил приводятся в отношении источников Ojo Caliente в Новой Мексике и источников Wagon Wheel Gap в Колорадо. К этому нужно добавить также и данные относительно золото- и сереброносных туфовых образований Новой Зеландии и источников Steamboat в Неваде.

Часто приводимый пример Sulphur Bank в провинции Lake (Калифорния)⁹ считают доказательством отложения киновари горячими водами, содержащими преимущественно хлористый натрий и значительное количество бора (анализ на стр. 53). Источники поднимаются к поверхности через четвертичный базальт, в котором киноварь вместе с опалом отложилась в виде налетов по трещинам, иногда в виде хрупких кристаллов, слегка приросших к стенкам, или же в виде вкрапленностей в пористом базальте; пирит и марказит присутствуют в породе главным образом в качестве мелких вкраплений, но также и в виде налетов, чередуясь с опалом и киноварью. На поверхности присутствия киновари не наблюдалось, но обнаружена сера, результат окисления H_2S . Несколько футов ниже поверхности появляется киноварь и идет до глубины 300', постепенно переходя в песчаник, поверх которого залегает базальт. Ртуть

в воде отсутствует, но относительно киновари, пирита и опала все исследовавшие это месторождение согласны, что они осадились из воды, которая и в наше время продолжает подниматься к поверхности по этим протокам. Растворенные в воде газы состоят преимущественно из CO_2 с сероводородом, углеводами и некоторым количеством аммония. Данные становятся еще более убедительными, если мы учтем, что сочетание минералов и общий способ залегания характерны для месторождений ртути в Coast Range. В главе I, выпуск III приводится много других интересных случаев отложения киновари восходящими водами.

Резюме. Итак, имеются неопровержимые доказательства того, что месторождения ртути, сурьмы, мышьяка, золота и серебра могут образовываться вблизи поверхности под действием горячих восходящих вод, связанных с явлениями вулканизма.

Весьма вероятно, что большинство трещинных жил, содержащих значительные количества золота и серебра вместе с сульфидами простых металлов, образовались под действием этих растворов. Об этом свидетельствуют многочисленные жилы, которые так часто как бы ореолом окружают площади, сложенные изверженными интрузивными породами.

С другой стороны, несомненно, что теплые или даже холодные геотерные воды в невулканических областях также могут образовать месторождения простых металлов, содержащие окислы и карбонаты железа и марганца и сульфиды меди, свинца и цинка с небольшими количествами золота и серебра. Имеются также данные, свидетельствующие о том, что такие воды могут образовать месторождения минералов ванадия и урана с радием (глава VI, выпуск II). Повидимому, наиболее способными к образованию таких месторождений водами являются несущие в растворе углекислый кальций и хлористый натрий, CO_2 и сероводород¹⁰.

¹ Les eaux souterraines aux époques anciennes, p. 151.

² Jacquot et Willm. Les eaux minérales de la France. Paris, 1894, p. 107.

³ L. de Launay. Recherche, etc., des sources thermominérales. 1892.

⁴ Verhandl. Gesell. deutscher Nat. u. Aerzte, 1903, 2, first part.

⁵ Die Erzlagerstätten, 2, 1905—1906, p. 1227.

⁶ The mines of Custer County, Colorado, „Seventeenth Ann. Rept.“ U. S. Geol. Survey, pt. 2, 1896, p. 461.

⁷ G. F. Becker. Geology of the Comstock lode. „Mon.“ 3, U. S. Geol. Survey, 1882, p. 230.

⁸ John A. Reid. The structure and genesis of the Comstock Lode. „Bull.“ 4, California Univ. Dept. Geology, 1905, pp. 177—191.

E. S. Bastion. Bonanza ores of the Comstock Lode. „Bull.“ 735, U. S. Geol. Survey, 1923, pp. 57—63; Genesis of the ores at Tonopah, Nev., „Prof. Paper“, 104, U. S. Geol. Survey, 1918, pp. 26—30.

⁹ G. F. Becker. Geology of the quicksilver deposits of the Pacific slope. „Mon.“ 13, U. S. Geol. Survey, 1888, pp. 251—268.

Joseph Le Conte and W. B. Rising. The phenomena of metalliferous vein formation now in progress at Sulphur Bank. „Am. Jour. Sci.“, 3d ser., 24, 1882, pp. 23—33.

F. Posepny. The genesis of ore deposits. 2-е издание, Pub. by the Am. Inst. Min. Eng., 1902, pp. 32—36.

¹⁰ C. E. Siebenthal. Zinc and lead deposits of the Joplin region. „Bull.“, 606, U. S. Geol. Survey, 1915, p. 154.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ МЕТЕОРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Предварительное подразделение подземных текучих вод дано в гл. III. Установлено, что большая часть содержащихся в породах вод носит метеорный характер, т. е. их происхождение обусловлено инфильтрацией дождевых вод или вод современных рек, озер и морей.

В осадочных породах большие или меньшие количества этих вод содержатся в течение долгого времени, насыщая все поры и пустоты в породе, или образуя включения, или входя в состав новообразующихся водных минералов.

Такую потерянную для циркуляции воду содержат также и изверженные породы, обычно в незначительных количествах. В областях проявления динамометаморфизма значительное количество вод того или другого источника связывается в водные силикаты, в частности в сериците и хлорите. В рудных месторождениях большое количество воды содержится в таких минералах, как слюда и хлорит.

В местностях, где нет вулканической деятельности, воды из зоны циркуляции или из статической зоны представляют собою слабые, средние и крепкие растворы различных солей, растворяющихся из пород. Содержащиеся в породах минералы отчасти растворяются непосредственно, большая же их часть разлагается водами, и следствием этого является образование нерастворимого остатка и различных растворимых солей.

В метеорных водах присутствует много веществ, которые могут снова осаждаться и образовать месторождения минералов. Отложения в морях, озерах и реках упоминались выше.

В подземных водах растворимыми элементами являются железо, марганец, сера, медь, никель, кобальт, цинк, кадмий, свинец, барий, стронций, мышьяк, бром, фосфор; бор, иод и фтор встречаются реже и лишь в самом незначительном количестве. В процессе окисления рудных месторождений подземные воды этой зоны могут обнаружить присутствие редких веществ. Воды, содержащие лишь весьма незначительное количество металлов, могут явиться источником образования месторождений. Например, источник Steamboat в Неваде содержит Sb_2O_3 в количестве 0,5 части на миллион, однако как в туфовом выносе, так и на некоторой глубине от поверхности отлагается значительное количество сурьмы¹. Конечно, эти воды иного рода, но суть та же. Многие глубокие и, несомненно, метеорные воды долины Миссисипи содержат цинк примерно в таком же коли-

честве. Источники, отлагающие железо и водную окись марганца, бесспорно содержат чрезвычайно малые количества этих металлов, примерно 1 или 2 части на миллион. Из этого следует, что при благоприятных для отложения нерастворимого соединения условиях даже очень малое его количество достаточно для образования значительного скопления.

В метеорных водах нередко присутствуют CO_2 , сероводород, а также углеводы. Это понятно, если учесть, что многие осадочные породы содержат пирит, различные виды углерода и органические вещества и что путем различного рода реакций эти газы могут притти в свободное состояние.

Другими компонентами вод, не связанными с вулканической деятельностью, являются газы: азот, кислород, аргон, гелий и углеводы. Последние представляют большое значение в качестве горючего. Из подобного рода газов извлекается значительное количество гелия, используемого в воздухоплавании. В штатах Kansas и Texas содержание гелия в газах достигает 1,84%². Азот может присутствовать из воздуха, когда кислород удален процессами окисления. Гелий может образоваться из радиоактивных минералов, например карнотита, который, как известно, присутствует во многих отложениях. Углеводы возгоняются из присутствующих в осадках органических веществ.

Другим возможным источником CO_2 является реакция кислых вод (каковые присутствуют во многих рудниках) с соседними известняками. Известно также, что многие зернистые породы, например гранит, содержат мельчайшие включения CO_2 . Lespeyres высчитал, что один куб. километр гранита содержит достаточное количество CO_2 , чтобы снабжать этим газом источники Nauheim (Германия) в продолжение 273 000 лет; однако, подобного рода вычисления мало убедительны для тех, кто понимает, что просачивающиеся воды могут впитывать в себя лишь чрезвычайно малые количества этого газа.

Возможно, что газы получаются также посредством медленной возгонки из массивов пород, которые в нижней части земной коры подвергаются действию высокой температуры. Это, конечно, подразумевает наличие трещин, через которые могли бы проходить подобного рода возгоняющиеся газы, что, конечно, остается в большей или меньшей степени под знаком вопроса. Многие авторы, включая F. W. Clarke³ и F. L. Ransome⁴, описывают интереснейшие опыты, проделанные A. Saugier и другими над газами, включенными или абсорбированными в минералах, при нагревании переходящими в свободное состояние. Многочисленные и точные анализы этих газов были произведены R. T. Chamberlain⁵, установившим, что различные растертые в порошок породы выделяют общий объем газов (при температуре 0°C и под давлением 760 мм), начиная от доли единицы объема породы и кончая объемом, превышающим эту единицу в 30 раз. По его определению, этими газами являются H_2S , CO_2 , CO , CH_4 , H_2 и N_2 , среди которых всегда преобладают CO_2 и H_2 . Полагают, что CO_2 получается от разложения небольших количеств вторичных карбонатов, часть же, может быть, из включений. Наличие углеводов и прочих соединений углерода объясняется реакциями, имеющими место между водяными парами и CO_2 и некоторыми из содержащихся в породе веществами, в особенности железистыми соединениями. Возможно, что некоторая часть присутствующей в глубинных водах CO_2 получилась именно таким путем. Вряд ли, однако, вполне сознают, что между нагреванием в воздухе небольшого количества растертой в поро-

шок породы и образованием такого же количества газов из сплошной массы и на значительной глубине существует громадная разница. Казалось бы вероятным, что давление будет препятствовать выходу этих газов, а если вся масса породы нагреется до точки плавления, она, несомненно, приобретет способность к абсорбции несравненно большего количества газов, чем то, которое возгоняется нагреванием порошка до-красна.

МАГМАТИЧЕСКИЕ ИЛИ ЮВЕНИЛЬНЫЕ ВОДЫ

Вулканические явления почти всегда сопровождаются выделением значительного количества водяного пара и прочих летучих веществ. Геологи считают, что часть этой воды происходит из магмы. Day и Shepherd⁶ подвергли тщательному исследованию газы из кратера Kilauea (остров Гавай) и убедились в том, что, когда в этих газах не содержится примеси воздуха, они состоят из азота, водяного пара, двуокиси углерода, двуокиси серы и водорода. Они пришли к заключению, что вода, выделяющаяся из жидкой лавы, когда последняя достигает поверхности, должна рассматриваться, как первоначальный компонент лавы, так же как сера или углерод. Из этого логически следует, что некоторая часть этой воды из застывающей лавы с сопровождающими ее газами должна смешиваться с водами метеорного происхождения.

Относительно глубинных пород непосредственных доказательств не имеется, но к кое-каким выводам можно прийти по наличию включений водных растворов, столь часто находимых в зернистых породах, а также по присутствию таких минералов, как слюда и амфибол, содержащих гидроксильную молекулу.

Общее доказательство существования ювенильных вод мы найдем не путем наблюдения над современными источниками, а изучением древних интрузивных областей. Гранит переходит в пегматитовые дайки, последние — в кварц-пегматиты, даже в жилы, состоящие из кварца и металлических руд касситерита и вольфрамита. Имеются весьма трудно опровержимые данные, что отвердевшие из магмы дайки постепенно переходят в месторождения, структура и минералы которых свидетельствуют о чисто водном отложении; если это так, то трудно себе представить, что бы могло помешать таким водам достигнуть поверхности в виде восходящих ключей.

Эта точка зрения впервые была полностью выражена Elie de Beaumont⁷. По его мнению, существует два класса горячих источников: первый (наиболее обычный) тесно связан с вулканической деятельностью и получает из вулканических лав свои воды и растворенные соли; второй, и более редкий, класс получает свою воду путем инфильтрации. С этим взглядом соглашался Lapparent, но Daubrée пришел к противоположному заключению, т. е. что все термальные источники являются результатом инфильтрации воды с поверхности. Fouqué соглашался с последним мнением, его же придерживается и Launey⁸. Точка зрения Daubrée была принята и в других странах; в США ее придерживались Le Conte, Van Hise и др. Все воды, появляющиеся на поверхности, считались атмосферного происхождения и содержащиеся в них соли отложившимися из проходивших водами пород.

Примерно около 1900 г. роль магматических испарений в образовании месторождений полезных ископаемых стали признавать многие из гео-

логов, среди них Vogt в Норвегии и Spurr, Kemp, Weed и Lindgren в США. В 1902 г. выдающийся австрийский геолог Suess⁹ высказал мнение, что многие из источников районов вулканической деятельности имеют «ювенильное» происхождение, т. е. что они впервые достигают поверхности и несут с собою воду и соли из магмы, остывающей на большой глубине. В качестве примера он приводит Карлсбадские источники.

Вопрос заключается в том, возможно ли установить какой-либо критерий, по которому магматические воды можно было бы отличать от метеорных. Этот вопрос пытается разрешить Delkeskamp (Германия) в целом ряде статей¹⁰. Он считает, и совершенно правильно, что температура не может служить ценным критерием, и указывает, что многие источники метеорного происхождения весьма горячи, в то время как воды предположительно магматического происхождения, наоборот, холодные. Другое затруднение заключается в том, что воды магматического происхождения непрерывно смешиваются с метеорными, но этим, с другой стороны, можно объяснить тот факт, что каждый источник глубинного происхождения обладает индивидуальным характером. Доказательством поверхностного происхождения служат изменения в температуре источников, их солёности и количества в них воды в зависимости от времени года. Практическое постоянство солёности, температура и количество воды считаются признаками магматического происхождения. Из источников магматического происхождения упомянем Карлсбадские, Эмские и Висбаденские. Однако, нельзя согласиться с тем, чтобы критерий был исчерпывающим.

Примеры источников в областях вулканической деятельности. Как уже говорилось выше (стр. 55), имеется два типа восходящих горячих вод, которые оба имеют ювенильное происхождение. Это типы, содержащие преимущественно: один — углекислый натрий, другой — хлористый натрий и окись кремния, как тот, так и другой весьма обычны для областей угасающей вулканической деятельности.

Первый из этих типов, видим, например, в центральной Германии, центральной Франции, в Калифорнии и многих других районах западных штатов. Второй тип характерен для обширных областей гейзеров в Yellowstone Park, Исландии и Новой Зеландии. Эти два класса источников пробивают себе дорогу в эффузивных породах и залегающих под ними глубинных породах или кристаллических сланцах. Трудно с уверенностью сказать, являются ли эти воды полностью или только частично магматического происхождения. Arnold Hague, проведший много лет в изучении Yellowstone Park, совершенно определенно высказывается за то, что современные источники этого района имеют магматическое происхождение¹¹. Что касается до области гейзеров в Новой Зеландии, то метеорное происхождение источников доказать трудно. С другой стороны, многие геологи считают, что во всех этих источниках некоторое количество растворенных солей и газов магматического или ювенильного происхождения.

Соли в вулканических источниках. В областях вулканической деятельности многие горячие источники содержат весьма значительное количество углекислого натрия (рис. 7). Продолжительное действие горячей воды, насыщенной CO_2 , на полевые шпаты и соседнюю породу является причиной значительного растворения этой соли; присутствие чрезвычайно малого количества углекислых кальция и магния объясняется тем,

что при увеличении процентного отношения щелочных карбонатов они осаждаются.

Однако, углекислый натрий всегда сопровождается значительными количества хлористого натрия, в некоторых случаях последний даже преобладает. Это не совсем легко объяснить. По подсчету Clarke, изверженные породы содержат в среднем всего 0,07% хлора, и хотя и существуют особые породы, содержащие содалит, воды, содержащие преимущественно хлористый натрий, далеко не всегда связаны с этим минералом. Если принять во внимание, что вода может растворить лишь незначительную часть этого хлора, то очень трудно даже приблизительно подсчитать, через

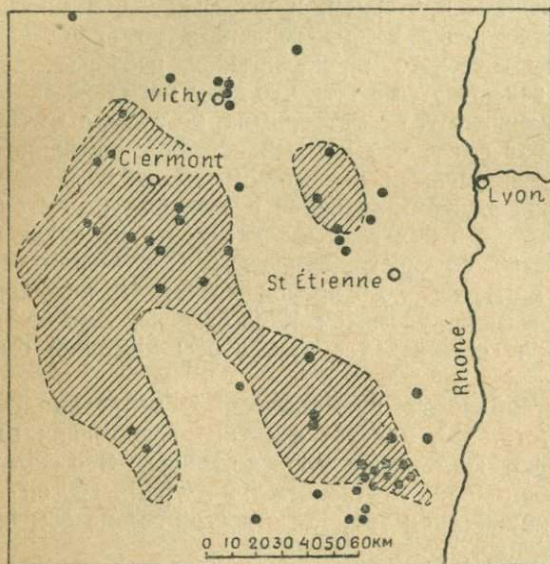


Рис. 7. Источники центральной Франции, содержащие углекислоту и углекислый натрий. Источники отмечены черными точками. Штриховка показывает границы распространения базальтовых излияний.

какой объем пород должен просачиваться вода, чтобы поддержать непрерывное протекание хлористых вод той концентрации, какую мы часто наблюдаем в горячих источниках. Можно себе представить, что, спускаясь, поверхностные воды могут насытиться хлористым натрием, просачиваясь сквозь соляные осадочные породы, но такое объяснение представляется несколько искусственным, если речь идет об источниках, выходящих из гранита, в местности, где такие осадочные породы отсутствуют. Обычным компонентом многих из таких источников является бор, как мы это видим в Steamboat Springs (Невада) и Ojo Caliente (New Mexico); оба эти источника выходят из гранитных пород. Еще труднее найти объяснение присутствию этого элемента, если предположить процесс выщелачивания. Без сомнения, во многих породах присутствуют турмалин и датолит, но дело в том, что наличие борсодержащих источников не ограничивается только теми местностями, где встречаются эти минералы. Действительно, бор присутствует в соляных осадочных пластах, и следы его часто обнаруживаются в проходящих по ним водах, но количество его нельзя сравнить с тем, которое находят во многих водах, связанных с вулканической деятельностью. То же самое можно сказать и о фторе.

Гейзеры Исландии, Yellowstone Park и Новой Зеландии богаты окисью кремния; большинство из них поднимается на поверхность сквозь легко разрушаемые риолитовые породы, и возможно, что за счет их происходит обогащение кремнеземом. Однако, если учесть, насколько тесно богатые кварцем жилы связаны с пегматитовыми дайками и насколько убедительны данные, говорящие против их отложения в резуль-

какой объем пород должен просачиваться вода, чтобы поддержать непрерывное протекание хлористых вод той концентрации, какую мы часто наблюдаем в горячих источниках. Можно себе представить, что, спускаясь, поверхностные воды могут насытиться хлористым натрием, просачиваясь сквозь соляные осадочные породы, но такое объяснение представляется несколько искусственным, если речь идет об источниках, выходящих из гранита, в местности, где такие осадочные породы отсутствуют. Обычным компонентом многих из таких источников является бор, как мы это видим в Steamboat Springs (Невада) и Ojo Caliente (New Mexico); оба эти источника выходят из гранитных пород.

тате выщелачивания окружающих пород, естественными являются сомнения в безоговорочном признании присутствующей в термальных водах окиси кремния за продукт выщелачивания пород близ поверхности. Далее, если принять во внимание, что хлориды составляют часть магмы, о чем свидетельствует присутствие содалита и скаполита, и что хлористый натрий иногда встречается в виде мельчайших кристаллов и жидких включений в фенокристаллах кварца, и, наконец, вспомнить изобилие хлоридов вблизи вулканических извержений, можно будет значительно проще объяснить присутствие этих солей в источниках, расположенных в областях вулканической деятельности, легко осуществляющейся концентрацией летучих веществ в течение того периода, когда магма была еще жидкой, чем искать хлоридов в отвердевших изверженных породах.

Газы в вулканических источниках. Многие из источников, расположенных в вулканических областях, содержат большие количества CO_2 , часто также и сероводорода. Присутствие этих газов трудно объяснить предположением, что они получились вследствие реакций в верхней зоне земной коры, в особенности же когда пути восходящих источников приурочены к гранитам и другим кристаллическим породам, ниже которых вряд ли могут залегать осадочные образования. Большинство геологов полагает, что насыщающие газы представляют собою эманации глубоко погребенных магм, выводимые на поверхность метеорными или магматическими водами или же теми и другими вместе.

Особенно интересны горячие источники Арканзаса. Их состав, бесспорно, свидетельствует о метеорном происхождении, но температура их чрезвычайно высока и они содержат бор (стр. 44). Полагают, что в данном случае метеорные воды спустились до необычайно большой глубины, где нагрелись газообразными эманациями глубоко погребенной магмы.

Присутствие жидкой CO_2 в пустотах минералов и изверженных пород служит доказательством ее присутствия в отвердевшей на глубине расплавленной магме. При каждом извержении наблюдается новое выделение газов из остывающей близ поверхности магмы. Почти во всех вулканических местностях, где только что закончилась вулканическая деятельность, газы не перестают выделяться из остывающей под поверхностью лавы. Вблизи потухших вулканов в Auvergne (Франция) и Eifel (на Рейне) наблюдается чрезвычайное обилие вод, сильно насыщенных CO_2 . Трудно не прийти к выводу, что громадные количества газа, содержащегося в восходящих водах вулканических местностей, имеют изверженное происхождение.

То же самое можно сказать и о сероводороде, значительное количество которого присутствует в некоторых из этих источников. Разложение сульфатов органическими веществами или другими восстановителями хотя и может в некоторых случаях являться источником H_2S , но в изверженных породах, подобных граниту, количество его вряд ли достаточно. Сероводород играет первенствующую роль при извержениях вулканов, и можно предположить, что воды, поднимающиеся на поверхность поглощают этот газ или щелочные сульфиды и выносят их с собою на поверхность.

Когда интрузивные магмы прокладывают себе путь сквозь известняки или доломиты, то карбонаты часто замещаются силикатами и выделяется свободная CO_2 . Есть основание предполагать, что такой процесс протекает и в наше время. Количество CO_2 чрезвычайно велико и весьма воз-

можно, что многие термальные источники получают ее именно этим путем. Это объяснение не может быть приложимо ко всем случаям.

Редкие элементы в вулканических источниках. В водах горячих источников, богатых хлористым натрием, выходящих на поверхность в вулканических местностях, часто находят более редкие элементы; в таких водах часто присутствует значительное количество бора. Источники Steamboat (Невада) содержат значительные количества мышьяка и сурьмы со следами ртути и многих других металлов. Источники Yellowstone Park содержат бор и мышьяк, но мало других редких элементов.

Восходящие источники в вулканических областях, содержащие преимущественно углекислый натрий, нередко также содержат довольно значительные количества бора и фтора. Анализ вод Эмса дал следы мышьяка и меди, а вод Виши — следы тех же металлов плюс свинец. Согласно Götte, источник Sprudel (Карлсбад) содержит следы брома, иода, фтора, селена, фосфора, бора, бария, стронция, лития, титана, олова, мышьяка, сурьмы, меди, хрома, цинка, кобальта, никеля и золота.

О присутствии серебра, видимо, нигде не упоминается, золото же отмечается только в связи с карлсбадскими источниками. Однако, золото находят в отложениях и источниках на поверхности, как например в Новой Зеландии и у источников Steamboat в Неваде. Ртуть и значительное количество сурьмы, повидимому, присутствует только в водах вулканического типа, содержащих преимущественно углекислый или хлористый натрий, для которых характерны также большие количества бора и фтора.

Из более редких металлов, повидимому, наиболее распространен мышьяк, который встречается в водах всевозможных типов. Медь, цинк, никель и кобальт также нередки в водах как осадочных, так и изверженных пород. Свинец встречается редко. Железо хотя и присутствует в метеорных водах, но в горячих источниках его встречают лишь в чрезвычайно малых количествах. Вероятно, оно выпало из раствора на более низких горизонтах.

Эманация магмы. Выше не раз уже упоминалось о магматических эманациях и их влиянии на воды в части содержания летучих компонентов.

Действующие вулканы непрерывно выбрасывают летучие вещества из потоков лавы, кратеров и фумарол. Некоторые из менее летучих веществ выкристаллизовываются у выходов газов в виде сублиматов (продуктов возгонки), другие улетучиваются в атмосферу. Если учесть все разнообразие летучих веществ, выделяемых вулканами вместе с многочисленными редкими компонентами в растворах горячих источников вулканического происхождения, естественным будет вывод о привносе эманаций магмы.

Некоторые из горячих источников, вытекающих на склонах ныне действующих или потухающих вулканов, несомненно представляют собою метеорные воды, нагретые близ поверхности фумароловыми парами¹³. В таких источниках окись кремния отсутствует или присутствует в весьма малом количестве, и они не образуют значительных отложений на поверхности.

Считают, что чрезвычайно большое количество содержащихся в них сульфатов получилось от окисления H_2S в фумаролах.

Однако, в областях, где вулканическая деятельность прекратилась,

имеется много щелочных источников, содержащих значительные количества углекислого хлористого натрия и окиси кремния; эти источники отлагают киноварь, стибнит и реальгар. По всей вероятности, они, в большинстве случаев, представляют собою результат смещения метеорных и магматических вод, хотя некоторые из них, возможно, и чисто магматического происхождения. Не так давно геофизики установили, что магматическая часть вод таких источников, вероятно, выделена в виде магматических испарений. Распространено мнение, что газы при выделении магмы, конденсируясь, могут подняться к поверхности только с помощью метеорных вод.

Геологи, с своей стороны, полагают, что магматические водные растворы могут подниматься самостоятельно вследствие того, что 1) их непрерывно проталкивает снизу давление пара и 2) они несут с собою значительное количество нелетучих веществ, преимущественно окиси кремния, которые обильно отлагаются на всем пути. Некоторая часть окиси кремния выносятся и на поверхность.

¹ W. Lindgren. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“, 36, 1906, pp. 27—36.

² G. S. Rogers. Helium bearing natural gas. „Prof. Paper“ 121, U. S. Geol. Survey, 1921, p. 113.

³ Geochemistry. „Bull.“ 616, U. S. Geol. Survey, 1916, pp. 276—281.

⁴ „Econ. Geol.“ I, 1906, p. 688.

⁵ R. T. Chamberlin. The gases in rocks. Carnegie Inst. Washington, 1908, p. 80.

⁶ Arthur. L. Day and E. S. Shepherd. Water and volcanic activity. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 24, 1913, pp. 573—606.

⁷ „Bull. Soc. Geol. de France“, Serie 2, 1847, 4, p. 127.

⁸ L. De Launay. Recherche, captage et aménagement des sources thermominérales. Paris, 1892.

⁹ Verhandl. Gessell. deutscher Nat. u. Aerzte, Karlsbad, 1902, pp. 133—150.

¹⁰ R. Delkeskamp. Juvenile und vadose Quellen. „Balneologische Zeitung“ 16, № 5, Feb. 20, 1905, p. 15.

R. Delkeskamp. Die Genesis des Thermalquellen von Ems, Wiesbaden und Kreuznach und deren Beziehungen zu den Erz und Mineralgängen des Taunus und der Pfalz. „Verhandlungen Gessell. deutscher Nat. und Aerzte“ 1903, 2 First Part.

A. Gautier. „Compt. Rend.“ 150, 1910, p. 436. См. также „Econ. Geol.“ I, 1905, pp. 602—612.

¹¹ Origin of the thermal waters in the Yellowstone National Park. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 29, 1911, pp. 101—122.

¹² J. Roth. Allgemeine und chemische Geologie. Berlin I, 1879, p. 570.

¹³ A. L. Day and E. T. Allen. The volcanic activity and hot springs of Lassen Peak. „Publ. of Carnegie Institution.“, p. 190, Washington 1925. См. также реферат о горячих источниках и пр. „Jour. Geol.“ 32, 1924 Nos. 3, 4, 5 and 6.

ХИМИЧЕСКАЯ РАБОТА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ЗОНЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Стойкость минералов и пород. Подземные воды играют весьма большую роль в изменениях пород; большинство месторождений полезных ископаемых образуются при содействии этих вод. Близ поверхности вода может полностью насыщать породы и значительные ее количества могут продвигаться по трещинам. На большой глубине, где активная циркуляция отсутствует, вода присутствует в небольшом количестве в виде влаги в породах. Большая часть подземных вод метеорного происхождения, но несомненно, некоторая часть присутствующих в породах вод магматического происхождения. Растворение и осаждение происходят непрерывно; в каком-либо определенном месте может преобладать то или другое. Протекающие в подземных растворах реакции весьма разнообразны в отношении температуры, давления, веществ и их концентрации и времени и при неизменных условиях эти реакции также разнообразны. За изучение этих реакций впервые серьезно взялись G. Bischof и Justus Roth¹; за ними последовали другие известные геологи, посвятившие много труда изучению геохимии.

Одно из понятий, получившее за последние годы наиболее широкое развитие — это понятие о пределах стойкости минералов и пород. В соответствии с повышением температуры и давления в земной коре существуют зоны, постепенно переходящие одна в другую, из которых каждая характеризуется определенными группами минералов, сохраняющих свою стойкость лишь в условиях, господствующих в данной зоне. Ни один минерал не может назваться абсолютно стойким. Под действием определенных условий температуры или под действием определенных растворов минерал плавится, разрушается, распадается на свои составные части или растворяется. Под действием атмосферных вод, содержащих кислород и двуокись углерода, почти ни один минерал не сохраняет своей стойкости на поверхности, за исключением нескольких окислов, водных окислов и самородных элементов.

Вследствие обратимости химических реакций при изменяющихся условиях для каждого минерала имеется определенная зона, вне границ которой он разрушится. Агрегат минералов, т. е. породы, также подчинены этому закону; ввиду того что все составляющие породы минералы обра-

зовались почти одинаковым способом, все они теряют свою стойкость более или менее одновременно.

Некоторые минералы (число их весьма ограничено) менее, чем прочие, чувствительны к такого рода изменениям и поэтому встречаются при самых разнообразных условиях. Эти минералы принято называть устойчивыми; состав их несложен и гидроксильная молекула в них отсутствует. Из таких минералов отметим кварц, гематит, пирит, халькопирит, флюорит, кальцит и самородное золото. Ортоклаз, все виды плагиоклаза, биотит, авгит, оливин, шпинели, кордиерит и гранаты развиваются и сохраняют стойкость полностью только при высокой температуре. Богатые водой минералы, как хлорит, серпентин и тальк, характеризуются устойчивостью при низкой температуре. Другие минералы, подобно мусковиту, цеозиту, эпидоту, роговой обманке и альбиту, способны легко развиваться под большим давлением.

Установить строгие правила и резко разграниченные зоны весьма трудно вследствие разнообразия состава земной коры, неравномерного распределения подземных вод, изменений в давлении и значительной разницы в температуре, иногда даже на одном и том же горизонте. Одна зона переходит в другую. Кроме того, самое слово «стойкость» является лишь относительным понятием. Некоторые породы, например гранит, стойки лишь в короткий период, непосредственно следующий за их образованием. Под влиянием растворов глубинных вод минералы, компоненты гранита, теряют свою устойчивость подобно условиям, наблюдаемым в зоне выветривания. Эти изменения протекают столь медленно, что во многих местностях они неуловимы. Другие породы, например известковые и глинистые сланцы, устойчивы на известной глубине, но под давлением и при повышении температуры легко перекристаллизуются. Результаты реакций бываю весьма разнообразны в зависимости от состава вод. Минералы, развивающиеся в породе, имеющей небольшое количество влаги, иные, чем новообразования, обусловленные циркуляцией обильных растворов, насыщенных солями и газами постороннего происхождения.

Метаморфизм.² Термин «метаморфизм», строго говоря означаящий «изменение формы», впервые предложил Lyell в 1833 г. для обозначения изменений, имеющих место в осадочных слоях плотного сланца, кварцита, кристаллического известняка и пр. В дальнейшем этот термин распространился на развивающиеся из изверженных пород плотные сланцы под действием давления и перекристаллизации. Еще позже он стал применяться (например Van Hise) в широком смысле и в настоящее время он означает всякое изменение в составе и структуре любой породы, под любым воздействием, с приобретением или потерей вещества или без них. Под этим термином можно подразумевать выветривание и образование всякого рода эпигенетических месторождений, например, жил в породе другого возраста. Далеко не все геологи приняли такое широкое применение термина «метаморфизм». В настоящем труде этот термин используется лишь в отношении процессов, следствием которых является частичная или полная кристаллизация, или перекристаллизация цельных массивов пород³, как например, образование гнейса из гранита или слюдяного сланца из глинистого. Хотя механический эффект давления может быть сильно заметным, метаморфизм всегда характеризуется многочисленными изменениями в минералах-компонентах.

Состав породы в целом хотя и остается в достаточной мере постоянным, все же в нем наблюдается стремление к изменению.

Для практических целей метаморфизм можно разделить на четыре класса: *статический, динамический, изверженный и гидротермальный*. Статический метаморфизм протекает в отсутствии усилия, на незначительной глубине и под действием небольшого количества воды. На более значительных глубинах и при более высоких температурах изменения могут быть вызваны статической перекристаллизацией, обусловленной давлением вышележащих пород⁴. Динамический метаморфизм является следствием проявления механических сил давления при высокой или низкой температуре. Эти два типа являются региональными и протекают в отсутствии значительных изменений в составе.

Изверженный метаморфизм (пирометаморфизм) проявляет действие магм на соседние породы и является процессом, протекающим при высокой температуре. Это почти то же, что контактовый метаморфизм, но сюда входят также инъекции магмы и пегматизация.

Гидротермальный метаморфизм представляет изменения, происходящие в породах под действием горячих восходящих вод. Пирометаморфизм может быть местным и региональным и сопровождаться иногда изменением в составе.

Метасоматизм или замещение. Выше говорилось о том большом значении, которое имеет для геологии метасоматизм или замещение. Слово метасоматизм, впервые примененное С. Naumann для обозначения некоторых видов псевдоморфизма и означающее «изменение тела», в настоящее время относится к процессу почти одновременного капиллярного растворения и отложения, путем которого новый минерал частично или совершенно иного химического состава может образоваться в теле старого минерала или агрегата минералов. Продуктами метасоматического воздействия являются вторичные минералы всякой метаморфической породы. Породы носят название метасоматических в том случае, если их состав значительно изменился путем замещения первоначальных минералов. Прямым и неопровержимым доказательством процессов замещения часто служат псевдоморфы и окаменелости.

Метасоматизм наблюдается в осадочных и изверженных породах повсеместно и на всяких глубинах и служит доказательством того, что породообразующие минералы попали в условия, при которых они потеряли свою стойкость. Развитие хлорита в авгите, серицита или каолина или калыцита в полевых шпатах, или галенита в известняке, — все это объясняется метасоматизмом. При изучении типичных метасоматических процессов под микроскопом нельзя различить место перехода между первичным минералом и «метасомом», как называют новообразовавшийся минерал. Волокна и пластинки серицита пронизывают кварц таким образом, что в контакте не наблюдается ни малейшего перерыва. Ромбоэдри сидерита развиваются в кварците таким образом, что грани их кристаллов пересекают зерна, не оставляя никакого промежутка. Совершенные призмы турмалина развиваются в зернах полевого шпата и острые кубы пирита в первичном полево шпате и кварце.

Метасоматические породы, т. е. такие, состав которых изменился, весьма обычны для рудных месторождений и часто образуются под действием насыщенных и быстропродвигающихся растворов (обычно водных, иногда газообразных), проникающих через поры и трещины. Можно при-

вести многочисленные случаи полного или почти полного метасоматизма, например, известняка сульфидами и кварцем, при котором химический состав совершенно переменялся. В противоположность этому, обыкновенные метаморфические процессы вызываются в породах присутствующим в них небольшим количеством влаги и, хотя в деталях структур и наблюдается метасоматизм, состав в целом изменяется лишь незначительно. Подробное описание метасоматических процессов в рудах и признаки для определения метасоматизма будут даны в гл. XIV.

Термины *изменение* (Alteration) и *разложение* (decomposition) являются синонимами, когда речь идет об определенных фазах частичного метасоматизма пород.

Термин *рассеяние* или *вкрапленность* (Dissemination) относится к зернам или кристаллам, разбросанным по породе, и не является геологическим понятием.

Импregnация (Impregnation) является генетическим термином и означает, что введенный минерал более позднего происхождения по сравнению с породой; он может развиваться путем метасоматических процессов или путем выполнения пор, или других пустот.

Минерализация или оруденение (Mineralization) (минерализировать — означает ввести минералы в породу) в настоящее время является горным термином, означающим, что порода содержит рудный минерал или же минерал, служащий предшественником руд, например пирит близ месторождения меди.

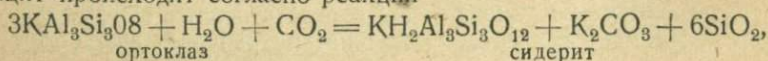
Металлизация (Metallization) — термин новый, означающий введение полезных металлов в целые области; например говорят о металлизации Корнвэлса оловом.

Термин *цементация* (Cementation) означает выполнение промежутков в пористых или разбитых породах.

Закон равного объема. Необходимо делать различие, во-первых, между метасоматическими изменениями, протекающими в свободных кристаллах, или зернах, или в рыхлых и пластических агрегатах под незначительной нагрузкой, причем сила кристаллизации может легко преодолеть сдерживающее давление; и, во-вторых, метасоматическими изменениями, протекающими в плотных твердых породах, где новообразовавшийся минерал должен завоевать себе место путем растворения первоначального минерала.

В первом случае изменения объема протекают согласно химическим формулам; во-втором — замещающий минерал заполняет ровно то самое место, которое раньше занимало первичным. Сила кристаллизации возмещает незначительно или косвенно, но вследствие того, что интенсивность давления бывает различна в зависимости от кристаллографических направлений и растворение протекает наиболее деятельно в точках наибольшего давления, развитие граней кристаллов объясняется именно таким образом⁵.

Химические формулы, посредством которых обычно выражают различные виды замещения, не представляют фактических изменений, так как эти формулы строятся на основании равных весов и будут означать определенные изменения в объеме. Считается, что превращение ортоклаза в серицит происходит согласно реакции



требующей сокращения объема на 15,5% даже в том случае, если предположить что SiO_2 перекристаллизовался в кварц.

Однако, если один объем ортоклаза замещается одинаковым объемом серицита, это уравнение не будет правильным и если пересчитать количества кремнезема, глинозема и пр., содержащиеся в одном куб. сантиметре ортоклаза, с одной стороны, и серицита, с другой, то определится необходимость добавления значительного количества глинозема. Действительно соответствующая формула, вероятно, будет чрезвычайно сложной и ее можно будет установить только в том случае, если будут известны все реакции, имевшие место в растворе в процессе превращения одного минерала в другой. Многие виды метасоматизма, как, например, замещение кальцита галенитом или баритом (рис. 65 и 67), не могут быть выражены химическими формулами.

Например, один кристалл пирита может одновременно замещать части близлежащих зерен различных минералов, или же, в мелкозернистой породе, может замещать агрегат минералов. Эти, всем известные, факты свидетельствуют о том, что замещение нельзя представить какой-нибудь определенной химической реакцией.

Закон разных объемов многократно проверялся многими учеными, и вряд ли можно сомневаться, что он применим ко многим метасоматическим процессам, как в малом, так и в крупном масштабе, и как к метасоматизму вообще, так и к месторождениям минералов в частности. Самые основные изменения в породах имеют место при почти полном постоянстве объема.

Общее определение метаморфических зон. Мысли Albert Heim, развитые далее С. К. Van Hise, привели к тому, что литосферу стали разделять на верхнюю зону разлома и нижнюю зону текучести пород, в которой существуют лишь субкапиллярные пустоты и деформация осуществляется грануляцией и перекристаллизацией. Между ними существует еще промежуточная зона, где имеют место как разлом, так и текучесть. Границы между этими зонами чрезвычайно неопределенные вследствие весьма неодинаковой степени пластичности пород, например гранита и известкового глинистого сланца. Путем опытов F. D. Adams⁶ удалось доказать, что в поддерживаемых породах трещины в граните могут непрерывно идти на глубину не менее 11 миль, т. е. около 58 000', при равномерном давлении 70 000 фунтов на кв. дюйм и при (предположительно) соответствующих температурах, т. е. 550° C, из чего и следует заключить, что зоны в широкой степени заходят одна в другую и поэтому могут являться лишь относительными понятиями.

Van Hise делит зону разлома на верхнюю зону выветривания и нижнюю зону цементации. Зона текучести соответствует глубоким метаморфическим зонам, в которых минералы образуются только путем замещения и в которой температура высокая, а давление изменяется в широких пределах⁷. Дальнейшие опыты, произведенные Bridgman, выявляют, что пустоты в породах могут быть уничтожены гидростатическим давлением, в двадцать раз превосходящим сопротивление раздавливанию⁸.

Все породы под давлением деформируются.

Усилие, необходимое для деформации мрамора при давлении, соответствующем глубине 4,2 мили, будет равняться 66 400 фунтам на кв. дюйм; для гранита это усилие будет соответствовать 138 500 фунтам на кв. дюйм. По мере возрастания глубины потребуется еще большее уси-

лие³. Давление, необходимое для пластической деформации, несравненно превосходит сопротивление раздавливанию, представляемое породами на поверхности.

Зона выветривания. Наиболее резко разграниченной является зона выветривания, глубина которой обуславливается горизонтом грунтовых вод или глубиной, до которой могут проникать большие количества свободного кислорода. В зоне выветривания вода просачивается вниз легче, чем в зоне, расположенной ниже, и наблюдается разрушение породы как целого; для этой зоны характерны активный перенос и концентрация.

Водные растворы и газы, а также и органическая жизнь создают химические реакции; значительную роль играет также и механическое разложение.

Химическими реакциями здесь являются окисление, карбонитизация, десилификация (обескремневание) и гидротизация. Первые три возникают преимущественно от разрушения силикатов водой, содержащей CO_2 . Следствием этих реакций должно бы быть увеличение объема, но растворение выводит столь значительное количество материала, что объем, наоборот, сильно сокращается.

Разрушение происходит в тесной связи с разложением и несколько раньше последнего; кальций, магний, натрий и калий выщелачиваются. Окончательным продуктом является незначительное число минералов, преимущественно соединения с низким удельным весом и, в большинстве случаев, с относительно простыми молекулами. Почти все породообразующие минералы легко разрушаются, также и сульфиды. Результатом этих процессов является образование многочисленных месторождений окисленных руд, описания которых даются в одной из последующих глав.

Объем, который принимает выветривание, и интенсивность вызываемых им изменений, особенно ярко можно наблюдать в местностях, сложенных из растворимых пород, подобных известняку. Выветривание осуществляется продолжительным действием чрезвычайно слабых растворов. В этом можно убедиться по сравнительной чистоте поверхностных вод, содержащих углекислые кальций и магний с лишь незначительной примесью щелочных солей. Растворимые продукты частично уносятся в реки через зону истечения, расположенную ниже зоны выветривания; реки же, в свою очередь, уносят материал в океаны. Обычными явлениями выветривания являются коллоидальные процессы и образование коллоидальных продуктов.

Эпиметаморфическая зона. Породы, залегающие непосредственно под зоной выветривания, часто насыщены водой, количество которой постепенно уменьшается по мере углубления. Незначительное давление вызывает трещиноватость и брекчирование и образуемые этими процессами пустоты и поры в породах выполняются минералами, отлагаемыми циркулирующими растворами. В известной мере эти минералы образуются из материала, вынесенного из зоны выветривания, но последняя относительно неглубока, по сравнению с зоной цементации, и соли, освобождаемые вследствие процесса выветривания, в значительном количестве уносятся сточными водами. Большинство месторождений рудных минералов образовалось из самих пород; например, кварцевые жилы и прожилки вблизи интрузивных массивов происходят большей частью из отложений восходящих глубинных источников. Ведущими процессами являются гидротация и карбонитизация. Такие минералы, как хлорит, серпентин,

тальк, серицит, эпидот и кальцит, развиваются преимущественно путем метасоматических процессов. Замещение и выполнение идут совместно.

Там, где существует процесс в одном направлении, сдавливающее усилие может вызвать разлистованность и рассланцованность пород. В метаморфических сланцах образуются мусковит, хлорит, тальк, роговая обманка, цоизит, эпидот и альбит; также кварц, пирит, кальцит, вероятно, также магнетит и спекулярит. К этой зоне относятся глинистые сланцы с мусковитом и альбитом, хлоритовые сланцы и тальковые сланцы. Термин «эпиметаморфический» впервые введен Grubenmann.

Мезометаморфические и более глубокие зоны. В более глубоких зонах (то, что Van Hise называет зоной анаморфической) господствуют высокая температура и значительное давление. Температура обычно свыше 200° С. Воды мало. Минералы образуются преимущественно замещением. Температура и давление работают в направлении сокращения молекулярного объема. Давление проявляется главным образом в боковых усилиях, т. е. действует в одном направлении, но гидростатическое давление (передаваемое по всем направлениям) также приобретает значение. Главнейшими реакциями являются дегидротация (обезвоживание), силификация и восстановление. Часто наблюдается смешение эпиметаморфических минералов с гипометаморфическими и образующиеся минералы отвечают многочисленным стойким и тяжелым комплексам.

Образующиеся метаморфические породы отличаются компактностью и прочностью. Однако же температура недостаточно высока, чтобы могло иметь место разрушение молекул, содержащих гидроксил.

Перекристаллизация протекает согласно закону Riecke⁴⁰ так, что в местах максимального давления преобладает растворение, а в местах минимального давления — отложение. Перекристаллизовавшиеся минералы могут принять слоистую структуру с направлением, перпендикулярным давлению; следствием этого является и сланцеватость от кристаллизации. Из минералов этой зоны упомянем мусковит, альбит, микропертит, олигоклаз, биотит, цоизит, эпидот, роговую обманку, ставролит, гранат, кианит, титанит, магнетит и ильменит. К этой же зоне принадлежит большинство слюдистых и роговообманковых гнейсов; также слюдистые сланцы, амфиболиты и глаукофановые породы.

В тех местах этой зоны, где сдавливающее усилие отсутствует, многие изверженные породы, например гранит, базальт и риолит, совершенно компактны.

Гипометаморфическая зона⁴¹. В наиболее низких частях зоны по классификации Grubenmann температура высокая и имеется тенденция к увеличению объема. Гидростатическое давление промадно, а сдавливающее усилие почти отсутствует, но преобладающее явление — это высокая температура. За исключением биотита все минералы, содержащие гидроксильную молекулу, отсутствуют и характерной особенностью является преобладание безводных минералов небольшого молекулярного объема. Характерными минералами этой зоны в кристаллических сланцах являются ортоклаз, все плагиоклазы, биотит, авгит, оливин, гранат, кордиерит, силлиманит, шпинелевый магнетит и ильменит. Многие из минералов этой зоны встречаются также в сплошных изверженных породах и в контактово-метаморфических породах. Породы являются преимущественно гнейсами, постепенно приближающимися к гранитам, также

гранулитами, эклогитами и авгитовыми гнейсами. В этой зоне большинство изверженных пород монолитны.

На средних глубинах преобладает ортоклаз или микроклин, в кристаллических сланцах наиболее глубокой зоны, приближаясь к микропертиту, а в верхней зоне — к серициту. Плаггиоклазы глубокой зоны могут превращаться в альбит и анортит и, наконец, в альбит и цоизит или серицит. Авгиты переходят в роговую обманку и, наконец, в хлорит. Оливин глубокой зоны превращается в роговую обманку или (с полевым шпатом) в гранит, а в верхней зоне переходит в серпентин.

Не подлежит сомнению, что везде, где известковые породы содержат свободную воду или водные соединения, они, будучи погружены в глубокую зону, выделяют CO_2 и воду. При достаточно высокой температуре активных интрузивных масс те же процессы метаморфизма могут протекать в зонах, более близких к поверхности.

Отношение минеральных месторождений к метаморфическим зонам. Хотя некоторые типы месторождений и возникли на поверхности или в зоне выветривания, большинство их образовалось в зонах разлома, где растворы могли сравнительно легко циркулировать. Пожалуй, мы не ошибемся, если скажем, что громадное большинство месторождений образовалось на глубине, не превышающей 15 000' от поверхности.

Как правило, рудные месторождения не образуются в зоне текучести пород, так как там растворы не могут свободно циркулировать. Исключением являются те случаи, когда горячие эманации от интрузивных тел проникают и пропитывают некоторые породы, например известняк, не нуждаясь для этого в открытых путях или пустотах.

Рудные месторождения могут также образовываться в магматических очагах, где растворы состоят из магм, допускающих свободное перераспределение молекул.

Обычно, статические и динамические усилия, обуславливающие процессы метаморфизма, незначительно изменяют минералогический состав и структуру пород. При наличии незначительных количеств присущей породам влаги могут иметь место метаморфические изменения пород, которые отнюдь не сопровождаются концентрацией отдельных элементов. Этим путем могут образоваться месторождения талькового камня, как результат гидротизации магнезиальных минералов, магнезита — путем карбонитизаций серпентина, серы как результат восстановления гипса органическими соединениями. В кристаллических сланцах могут развиваться гранаты, а из первичных руд могут получаться концентрации гематита и пр.

Сопоставление перечня рудных месторождений, образованных на различных горизонтах земной коры, с комплексом минералов, присущих зонам общего метаморфизма, приводит к выводу, что хотя между сравниваемыми двумя случаями и имеется некоторое сходство, все же к ним не могут быть приложены одни и те же законы. На это было указано в одном из трудов, посвященных метаморфизму трещинных жил, и в дальнейшем наука вполне подтвердила существование этого различия¹².

Строго говоря, к рудным месторождениям нельзя приложить ни правила Van Hise, ни понятия о трех зонах, данного Grubenmann. Да это и понятно. Метаморфизм имеет дело с небольшими количествами растворов, свободных от избытка CO_2 и сероводорода. С другой стороны, большинство рудных месторождений образовано большими количествами воды,

сильно насыщенной этими газами, а также и щелочными солями. Многие силикаты и другие минералы, в достаточной степени стойкие под действием глубоких подземных вод, не способны сопротивляться влиянию рудообразующих растворов. К таким минералам принадлежат: биотит, амфибол, известково-натровые плагиоклазы, часто также хлорит, серпентин и магнетит.

ПОДЗЕМНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ¹³

Геотермический градиент для верхней части земной коры обычно предполагается в среднем в 1°C на 30 м (100'). Начиная с температуры 11°C на глубине 30 м, что соответствует средней годовой температуре на поверхности (в странах с умеренным климатом), будем иметь 20°C на глубине 300 м, 100°C на глубине 2700 м, 210°C на глубине 6 000 м и 360°C на глубине 10.500 м, что приближается к критической температуре для воды (364°C). Следует признать, что относительно температурного градиента на большой глубине мы знаем очень мало. Измерения, произведенные на наивысшей достигаемой глубине, т. е. примерно 2 100 м, дают значительное отклонение от вышеприведенной цифры.

Наилучшую сводку данных, собранных по всему свету, дает Koenigsberger¹⁴; он же дает весьма интересные данные относительно повышения или понижения геотермического градиента.

Наилучшие по достоверности наблюдения, как правило, были получены в глубоких буровых скважинах, пройденных в местностях с относительно невысоким рельефом, отстоящих далеко от крупных водных горизонтов и в мало измененных породах, в которых отсутствуют третичные или послетретичные интрузии или крупные месторождения каменного угля и нефти. Наблюдения, производившиеся в глубоких рудниках, вероятно, несколько неточны ввиду охлаждающего влияния вентиляции, хотя в новых штреках и забоях вентиляция не должна бы сильно отражаться на результатах наблюдений.

Геотермические градиенты в неизменных породах (отсутствуют позднейшие эруптивы) и в местностях с невысоким рельефом. Скважины.

Местность	Градиент		Глубина		Автор
	м	футы	м	футы	
Martincourt * Франция	31,0	101	1 200	3 937	—
Sperenberg, Берлин	32,5	107	1 268	4 160	Dunkér
Sennewitz, Halle	36,6	120	1 048	3 438	—
Schladebach, Merseburg	35,7	117	1 236	4 055	Dunkér
Paruschowitz, * Силезия	30,7	101	1 959	6 428	—
Czuchow, * Силезия	29,6	97	2 239	7 346	Michael и Quit-zew
Bay City, штат Мичиган	36,8	121	1 050	3 445	Lane
Marietta, West Virginia	37,9	124	1 360	4 462	Hallock
Homewood, Pennsylvania	36,7	120	1 309	4 295	Cummins
Wheeling, West Virginia	40,7	133	1 360	4 462	—

* В Paruschowitz, Czuchow и Martincourt присутствуют пласты каменного угля

Приводимые ниже данные заимствованы из таблиц Koenigsberger (см. табл. на стр. 90—93).

Одна из глубочайших в мире буровых скважин находится в Goll Farm близ Clarksburg West Virginia. На 24/1 1918 г. эта скважина достигла глубины 7 350'; градиент 1° F на 51'.

Точка кипения должна находиться, примерно, на глубине 10 000' ¹⁵.

Скважина 96 Olinda, Fullerton field, Калифорния, достигла глубины 8 046'; по имеющимся сведениям на этой глубине температура доходит до 220° F ¹⁶. Глубина скважины Lake, в Fairmount, West Virginia, 7 756' ¹⁷.

Влияние близости водных пространств в смысле понижения температуры земли можно видеть из следующей таблицы.

Местность	Градиент		Глубина		Автор
	м	футы	м	футы	
Port Jackson N. S. W. Австралия	44,0	144	833	2 733	David Tanakadate Le Prince—Rinquet
Токио, Япония	39,8	130	361	1 184	
Pas de Calais, Франция . .	56,6	185	1 400	4 593	
Медные рудники Верхнего озера:					
a) Oscola в 8 км от озера	42	138	303	994	} Wheeler и Supan
b) Atlatic в 3,5 км от озера	52—55	170—180	276	905	
c) 1,5 км от озера	67	220	508	1 667	
d) Близ озера	123	404	1 396	4 580	
e) Рудники Calumet и Hecla	—	189	—	—	A. C. Lane

Под высокими хребтами и горами повышение идет медленно.

Местность	Градиент		Глубина		Автор
	м	футы	м	футы	
Mont Cenis (вершина) . . .	50	164	—	—	Giordano Stapff Schardt
Gottard (вершина)	44	144	—	—	
Simplon (вершина)	43,5	143	—	—	

В молодых эффузивных породах, или вблизи их, повышение температуры часто идет очень быстро. Такое быстрое повышение температуры наблюдается даже в третичных эруптивных массивах. Бурение дало следующие сведения:

Местность	Градиент		Глубина		Автор
	м	футы	м	футы	
Sulz, Wurttemberg	24,1	79	710	2 329	Braun и Waitz
Macholles, Франция	14,2	46	1 005	3 329	—
Buda-Pest	15,0	49	903	2 963	—

Вблизи выделяющих тепло вод или там, где длительно протекают процессы химического разложения, повышение температуры идет особенно быстро.

Местность	Градиент		Глубина		Автор
	м	футы	м	футы	
Idria, Австрия	10	33	329	1 079	Scheinpflug и Holler G. F. Becker
Comstock, Невада	17,1	56	457 672	1 499 2 205	

В каменноугольных копях и в скважинах, проходящих по пластам угля, благодаря химическим процессам повышение температуры идет быстрее нормального.

Местность	Градиент		Глубина		Автор
	м	футы	м	футы	
Charmoy, Creusot (скважина)	26	85	1 168	3 832	Michel-Léwy
Paruschowitz, Силезия (скважина)	—	—	—	—	—
Над углем	26	85	1 122	3 681	Hendrick
Под углем	35	115	1 959	6 427	Hendrick
Gelsenkirchen, Германия	23,5	77	705	2 313	—
Rosebridge, Англия (некоторое охлаждение от вентиляции)	29,5	27	—	—	—

Подобного же рода соотношения, видимо, существуют и в нефтеносных районах¹⁸.

Местность	Градиент		Глубина		Автор
	м	футы	м	футы	
Santa Maria, Калифорния	23,0	76	1 097	3 599	Arnold и Anderson Келикий Голубятников
Берекей, Кавказ	28,0	76	1 000	3 281	
Апшерон	28,4	93	300—700	984—2 297	

Повышение температуры в различного рода рудниках может идти быстрее или медленнее нормального. Вентиляция до известной степени понижает температуру.

Местность	Градиент		Глубина		Автор
	м	футы	м	футы	
Freiberg, Саксония.	31,0	102	457	1 500	D'Aubuisson Haldane и Thomas
Dolcoath, Cornwall	33,0	108	610	2 000	
Bendigo, Victoria (New Chum) Railway	42,7	140	1 110	3 645	Jenkins
Ballarat, Виктория	44,2	145	634	2 080	Jenkins
Witwatersrand, Южная Африка	115	377	1 200	3 900	Mariott

В некоторых рудниках повышение почти нормально, в других весьма медленно. В Bendigo¹⁹, где золотоносные кварцевые жилы залегают в Ордовичском песчанике, температура породы на глубине 4 600' всего 112° F (44,5° C). На этой глубине вода соленая, ее температура 114° F. На золотом руднике St. John del Rey²⁰ (в сланцах Южной Бразилии) температура на глубине 4 000' от главной штольни достигает 95° F (35° C). На глубине (по вертикали) 6 500' температура пород 118° F, температура воздуха 110° F. Мощная система вентиляторов понижают температуру до 98° F. В Witwatersrand (Трансвааль)²¹ на глубине 500' господствует температура 65° F; до глубины 3 900' она равномерно повышается со скоростью 1° C на 360'; на глубине 4 500' (по вертикали) температура пород в руднике City Deep достигает 84° F, а на глубине 7 000' должна достигать 95—100°. Согласно Mariott вблизи выработок естественная вентиляция понижает температуру на 5—6° C. В приводимых ниже трудах²² начальной температурой берут 65° F. На глубине 4 625' она равняется 85,58°; на глубине 6 309' 93,69° и на глубине 6 869' 97°. Нанесенная кривая представляет собой почти прямую линию, хотя Laschinger полагает, что она, вероятно, параболическая. Путем экстраполяции можно вычислить, что на глубине 10 000' температура достигает 109,5°, на основе прямой линии; если кривая представляет параболу, тогда температура на этой глубине должна быть 112,51° F.

Причины медленного повышения температуры в Трансваале и Виктории непонятны.

- 1 G. Bischof. Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie. 1863—1866. Justus Roth. Allgemeine und chemische Geologie. I, Berlin, 1879.
- C. R. Van Hise. A treatise on metamorphism. „Mon.“ 47, U. S. Geol. Survey, 1904.
- C. R. Van Hise. Metamorphism of rocks and rock flowage. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 9, 1898, pp. 269—328.
- U. Grubenmann and P. Niggli. Die Gesteinsmetamorphose, Berlin, 1924.
- F. Becke. Ueber Mineralbestand und Struktur der krystallinen Schiefer. Ninth Session Internat. Geol. Congress, Vienna, 1903; также „Sitz. Ber., k. k. Akad.“, Vienna 1903.
- John Johnston and Paul Niggli. The general principles underlying metamorphic processes. „Jour. Geol.“ 21, 1913, 21, pp. 481—516, 588—624.
- C. K. Leith and W. J. Mead. Metamorphic Geology. New York 1915.
- C. K. Leith. Structural Geology. 1923.
- ² Подробности относительно различных применений этого термина читатель найдет в труде R. A. Daly. Metamorphism and its phases. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 28, 1917, pp. 375—418.
- ³ A. Harker. „Geol. Mag.“ 6, 1889, p. 15.
- ⁴ R. A. Daly. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 28, 1917, p. 400.
- ⁵ W. Lindgren. The nature of replacement. „Econ. Geol.“ 7, 1912, pp. 521—535. Volume changes in metamorphism, „Jour. Geol.“ 26, 1918, pp. 542—555, Metasomatism. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 36, 1925, pp. 247—252.
- H. C. Boydell. Metasomatism and Linear „Force of growing Crystals“. „Econ. Geol.“ 21, 1926, pp. 1—55.
- ⁶ F. D. Adams. „Jour. Geology“. 20, 1912, pp. 97—118.
- ⁷ Van Hise называл две верхние зоны царством катаморфизма (слово „ката“ означает „вниз“): комплексные силикаты разрушаются и образуются более простые и менее плотные минералы. В зоне анаморфизма (ана — вверх) силикаты, предположительно, перекристаллизуются и образуют более плотные минералы и компактные структуры. Leith и Mead опровергли это положение (Metamorphic Geology, 1915), употребляя слово „катаморфизм“ только в отношении выветривания; с этих пор создалась такая путаница, что устранить ее будет возможно лишь отбросив оба термина.
- ⁸ P. W. Bridgman. The failure of cavities in crystals and rocks under pressure „Am. Jour. Sci.“ 4 th, sec. 45. 1918, pp. 243—268.
- ⁹ F. D. Adams and J. A. Bancroft. 2 „Jour. Geol.“ 25, 1917, pp. 597—637.
- ¹⁰ E. Riecke. Ueber das Gleichgewicht zwischen einem festen homogen deformierten Körper und einer flüssigen Phase, etc. „Nachr. Gesell. d. Wissenschaft.“, Göttingen, 1894, 4, pp. 278—284.
- ¹¹ Grubenmann называет эту зону катаморфической.
- ¹² W. Lindgren. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 30, 1900, p. 601.
- W. Lindgren. The relation of ore deposition to physical conditions. „Econ. Geol.“, 2, 1907, pp. 105—127. Также Compte rendu de la X-eme session du Congres Géologique international, Mexico, 2, 1906, pp. 701—724.
- ¹³ J. D. Everett. Evidence before the Royal Commission coal supplies. London, 1904. Также в Reports of the British Association“, 1882—1904. Градиент 1° C на 100' равен 1° F на 55'. Комиссия считает, что в среднем это будет 1° F на 64'.
- ¹⁴ J. Koenigsberger and M. Mehlberg. Ueber Messungen der geothermischen Tiefenstufe. „Neues Jahrbuch“, Beil., Bd. 31, 1911, pp. 107—157 (с библиографией и указаниями относительно способов измерений температуры. Сведения относительно новейших изысканий в области измерения температуры в глубоких скважинах при помощи максимальных термометров и термо-электрических методов читатель найдет у John Johnston и L. H. Adams „Econ. Geol.“ 11, 1916, pp. 741—762.
- ¹⁵ „Press. Bull.“ 357, U. S. Geol. Survey, 1918.
- ¹⁶ „Oil and Gas Journal“, Sept. 30, 1926.
- ¹⁷ „Mineral Industry“ 34, 1925, p. 517.
- ¹⁸ Последние сведения по этому вопросу см. H. Hoefler. Temperature in oil regions. „Econ. Geol.“ 7, 1912, 536—541 and E. De Colyer. The significance of certain Mexican oil temperatures. „Econ. Geol.“ 13, 1918, pp. 275—301. Также N. H. Darton. Geothermal data of the United States. „Bull.“ 701, U. S. Geol. Survey, 1920.

¹⁹ W. J. Rickard. Deep mining at Bendigo. „Mining Magazine“, London. 1910, pp. 281—282.

²⁰ T. T. Read. „Eng. and Min. Jour. Press“, Oct. 10, 1925.

²¹ H. F. Marriott. An investigation of earth temperatures, etc. „Trans. Inst. Min. and Met.“, London, 15, 1906. E. H. Clifford утверждает, что градиент равен 1° F. на 250', „Trans.“ Inst. Min. Eng., London, 58, 1919—1920, p. 12.

²² M. O. Tillard and E. C. Ranson. „Jour. Chem. Met. and Min. Soc. South Africa“ Feb. 19, 1928. Whitehouse and Wotherspoon, idem 11, p. 539.
E. J. Laschinger, там же, Feb. 1927.

МАГМА И ЕЕ ОТНОШЕНИЕ К РУДНЫМ МЕСТОРОЖДЕНИЯМ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И СОСТАВ МАГМЫ

Известно из опыта, что лавы, т. е. эффузивные изверженные породы, отвердевают из горячего расплава жидкого силиката. Путем изучения и последующих выводов установлено, что все породы, которые мы на основе определенных характеристик называем изверженными, отвердели именно из таких расплавов. При быстром остывании образуются стекловатые или мелкозернистые породы; медленное остывание может привести к образованию породы с крупнозернистой структурой; изверженные породы, затвердевшие на большой, для нас недостижимой глубине, обычно обладают такой зернистой структурой¹. Такие силикатовые расплавы носят название магм. Их можно определить как чрезвычайно горячие жидкости, состоящие из взаимного раствора силикатов, с примесью окислов, и всегда содержащие определенное количество растворенных летучих веществ.

Из окислов в изверженных породах присутствуют преимущественно окись кремния и окись железа; они выделяются в кварц и магнетит. Небольшое, но имеющее важное значение, количество летучих веществ состоит преимущественно из воды с некоторым количеством CO_2 , серы, хлора, фтора и пр., в общей сложности не превышая нескольких процентов. Производимые над лавами наблюдения позволяют не сомневаться в их присутствии, и мы приходим к заключению, что они существовали в магмах, отвердевших в виде изверженных пород. Fenner² полагает, что при некоторых условиях эти вещества образуют гомогенные растворы с растворами менее летучих веществ и что они находятся в состоянии молекулярной дисперсии. Критические температуры изменяются настолько, что они имеют мало общего с температурами чистых веществ; газообразные свойства становятся мало приметными и все вещества должны рассматриваться как части взаимного раствора. Выделяющиеся позже кристаллические соединения и газы часто далеко не отвечают составу и характеру сочетания молекул в растворе.

Что магма представляет собой раствор, видно из понижения точки отвердевания в наблюдаемом порядке кристаллизации, а также из того факта, что некоторые из последних остатков кристаллизации приближаются к эвтектическим смесям. В известной мере имеет место диссоциация и магмы являются электромагнитами.

Хотя некоторые из основных пород можно воспроизвести путем сухого сплавления, для кристаллизации кислых пород, например, гранита и монзонита, видимо, необходимо присутствие летучих веществ.

При понижении давления и отвердении нелетучих компонентов летучие стремятся выделиться. Их ролью в магме является уменьшение вязкости и понижение точки плавления. Когда магмы отвердевают, эти компоненты возгоняются, но они также могут войти в состав породообразующих минералов, или же остаться в них в качестве газообразных или жидких включений.

При возгонке они (в особенности галлоиды) уносят в собою многие из тяжелых металлов, как-то: железо, медь, цинк, свинец или олово, так как образуются такие летучие соединения как SiH_4 , SiF_4 , SiCl_4 , TiCl_4 , AsCl_4 , AlCl_3 , WF_6 , BCl_3 , BF_3 и пр.

Varus получил при высокой температуре и под большим давлением жидкие растворы различных видов стекла с водой, которые отвердели при относительно низких температурах в виде переохлажденных жидкостей или «твердых растворов». При нагревании вода возгоняется и остается лемзовидная трудно сплавляющаяся масса. Подобным же образом при нагревании ведут себя обсидиановый порфир и обсидиан, содержащие много воды. Не так давно Morey предпринял подобного же рода опыты, с большей точностью воспроизводящие условия пегматитовых магм.

Таким образом, средний состав изверженных пород не совсем одинаков с составом типичной магмы, так как в анализах последней мы не видим летучих компонентов; с другой стороны, в анализы входят некоторые неизбежные продукты последующего разложения. Магмы, из которых образуются породы, имеются разного рода: от чрезвычайно основных до чрезвычайно кислых по составу, как например, риолит, гранит, андезит, гранодиорит, монзонит, диорит, базальт, габбро, диабаз и перидотит. Обычных породообразующих минералов не так много: в них входят полевые шпаты, фельдшпатоиды, пироксены, амфиболы, оливин, слюды, кварц, железные руды и апатит. В состав магмы входят различные силикатовые молекулы, смешиваемые во всевозможных пропорциях. Трудно сказать, насколько то же самое относится к окислам. Сульфиды смешиваются с силикатами лишь в ограниченной степени, причем способность смешиваться повышается по мере повышения температуры и основности (щелочности).

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МАГМЫ

Последовательность кристаллизации определенных минералов как и в водных растворах обуславливается их растворимостью в остальной магме и не соответствует их температуре плавления. Когда соль растворяется в воде, температура ее отвердевания меняется. Вода замерзает при 0°C , но добавление поваренной соли понижает точки ее замерзания и таяния на несколько градусов. То же наблюдается и в сплавах, в частности в тех из них, которым свойственна особенно низкая температура плавления (иногда ниже 100°C). Подобным же образом изверженные породы могут становиться жидкими при температуре много ниже средней точки плавления составляющих минералов, или даже одного из минералов, имеющих наиболее низкую точку плавления.

С другой стороны, ни один из минералов не может выделиться, если

температура, для данного давления, выше точки плавления этого минерала. Ниже этой точки имеет место кристаллизация при перенасыщении раствора этим минералом. Некоторые из компонентов раствора образуют изоморфные смеси, но часть раствора может остаться в *эвтектических пропорциях*.

По эмпирическому правилу Rosenbusch, выделение кристаллов в силикатовой магме следует по известному порядку снижения основности (щелочности), так что в каждой стадии остаточная магма более кислотна, чем выделившийся из нее агрегат кристаллов. Это правило имеет много исключений, в особенности в тех случаях, когда дело касается основных магм, но в гранитовых и диоритовых породах основные и тугоплавкие минералы, подобно циркону, магнетиту, апатиту, ильмениту и рутилу, выкристаллизовываются первыми. Затем следуют биотит, роговая обманка и авгит, или вообще магнезиальные и железистые силикаты, затем натриево-известковые полевые шпаты, позже ортоклаз и, наконец, остаточный кварц, выделяющийся, вероятно, приблизительно при 800°C . Таким образом, «маточный раствор» гранита становится все более и более богатым кремнеземом. «Минерализаторы» или летучие вещества, подобные бору, фтору и олову, следуют скорее за кислотными компонентами, чем за основными. Остаточная магма, в гранитных породах представляет раствор с высоким содержанием щелочей и SiO_2 , вероятно, с известным количеством воды, который при определенных условиях может быть

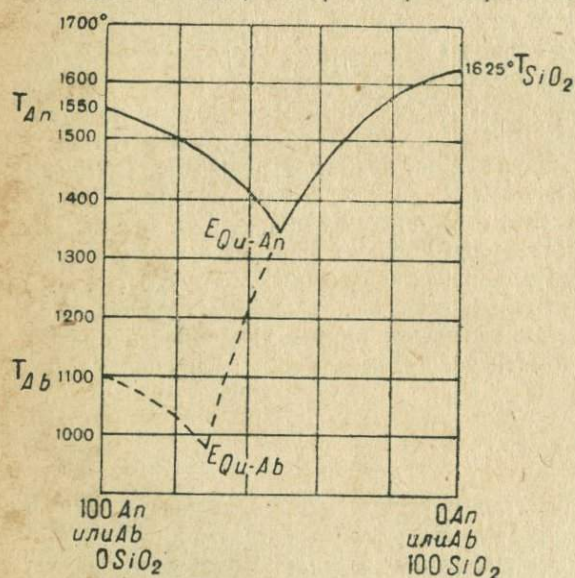


Рис. 8. Диаграмма температуры и состава, иллюстрирующая образование эвтектик. *E* — эвтектические точки (заимствовано у Bowen and Vogt).

ное количество железа даже и до очень поздней стадии.

Относительно некоторых базальтов с Земли Франца Иосифа Newton и Teall⁴ говорят, что прогрессивная кристаллизация привела к образованию маточного раствора, с весьма небольшим содержанием кремнезема и высоким содержанием железа. Это вполне сходится с заключениями, вы-

эвтектическим и может выдвигаться из частично отвердевшей магмы, подобно тому, как из губки выжимается жидкость, и выкристаллизоваться в пегматит по трещинам, остающимся открытыми под действием гидростатического давления жидкостей и газов. Согласно Vogt, эвтектика состоит из 73% ортоклаза и 27% кварца. Следует, однако, заметить, что между петрологами отсутствует единогласие относительно существования в породах истинных эвтектик⁵. Следует также учитывать, что остаточная магма далеко не всегда сильно кислотна, и что в основных породах она может сохранить значитель-

веденными при изучении некоторых высокотемпературных месторождений магнетита. Близ поверхности часто наблюдаются две генерации кристаллов, обуславливаемые прерывом в кристаллизации, и иногда ранние генерации, например роговой обманки, могут быть резорбированы до полного уничтожения.

В пороодообразующих минералах объем выкристаллизовавшихся молекул вещества меньше объема того же состава жидкой фазы; с возрастанием давления их плавкость, а также и растворимость несколько уменьшаются. Внезапное уменьшение давления может затем воздействовать так же, как повышение температуры, и тогда вновь образовавшиеся минералы снова расплавятся.

Ход кристаллизации в бинарной магме представлен на рис. 8, для которого взяты лишь самые простые условия. В этой диаграмме, представляющей температуру и состав, мы видим кривые насыщения или кристаллизации; по ним видно, что при понижении температуры имеет место выделение одного компонента, пока при определенном составе

вся остающаяся жидкость не выкристаллизуется в виде эвтектики. Выше кривых — магма текуча; на известной точке, предположим при 10% второго вещества, первое вещество начинает выкристаллизовываться; это изменяет состав магмы и по мере дальнейшего снижения температуры кристаллизация идет дальше. На эвтектической точке *E* отвердевает остающаяся смесь *A* и *B*. Между кривыми и проходящей через точку *E* горизонтальной линией магма состоит из текучего вещества и кристаллов. Ниже *E* существуют только кристаллы. Подобного рода диаграммы построены для многих веществ. Кристаллизацию магмы, состоящей из трех компонентов, можно изобразить при помощи более сложной диаграммы в виде треугольника ⁵. Предполагается, что состав компонентов бинарной магмы остается без изменения. Но многие из пороодообразующих минералов состоят из двух или более компонентов, которые изоморфны и могут смешиваться в любых пропорциях, образуя гомогенные кристаллы. Примерами могут служить плагиоклазы, пироксены и оливины. Процесс кристаллизации таких компонентов может быть изображен диаграммой температуры и состава (рис. 9).

В смешанных кристаллах, например альбита и анортита, имеется лишь одна кривая отвердевания вместо двух, сходящихся на эвтектической точке. Так же, как и в случае несмешивающихся компонентов, она называется *liquidus* (верхняя кривая на диаграмме). Кривая плавления, или *solidus*, не совпадает с кривой отвердевания. Смешанный кристалл не плавится при определенной температуре, а плавление растягивается в промежутке, нижний предел которого устанавливается *solidus*, а верх-

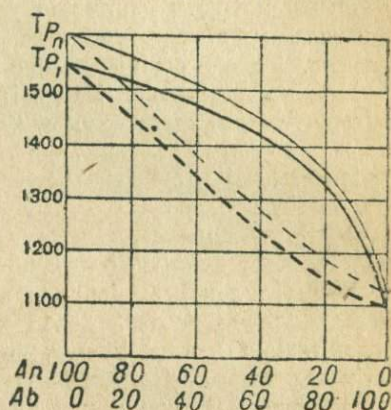


Рис. 9. Диаграмма температуры и состава, иллюстрирующая кристаллизацию смесей альбита и анортита. Верхняя кривая — *liquidus*, нижняя — *solidus*. Также показано незначительное расхождение между кривыми при низком давлении — T_r и при высоком давлении T_p (по Vogt).

ний *liquidus*. При температуре a° единственная могущая существовать жидкость имеет состав *D*. Другими словами, при данной температуре только кристаллы состава *D* находятся в равновесии с жидкостью *C*. Эвтектическая точка отсутствует. Ясно, что если остывание протекает очень медленно, кристаллы состава *D* будут постепенно менять свой состав. Полная перегруппировка состава кристаллов возможна лишь в теории. В действительности вокруг ядра кристалла образуются зоны, состав каждой из которых соответствует температуре образования этой зоны кристалла и составу жидкости, с которой он находится в состоянии равновесия. Таково возникновение всем известной зональной структуры кристаллов плагиоклаза⁶. На диаграмме можно также видеть относительно незначительный сдвиг этих кривых при сильном увеличении давления.

ПРИЧИНЫ ВУЛКАНИЗМА

Автор не намерен вдаваться в подробности причин, вызывающих вулканизм; этот вопрос до сих пор остается в стадии гипотез.

Принято считать, что источники магмы находятся на большой глубине, быть может от 5 до 15 миль, и что в силу различных причин и в различных местах земная кора расплавляется и образуются местные бассейны магмы. Положение последних, без сомнения, обуславливается структурными линиями, или иначе — «зонами разломов». Силами, которые, наконец, выводят магму на поверхность, или по крайней мере приближают к ней, могут являться процессы сокращения участков земной коры и связанные с ними тангенциальные давления (складкообразование) и давление вследствие изостатического перемещения. Мнения относительно этого чрезвычайно расходятся. Из непосредственных причин, вызывающих вулканическую деятельность. Daly упоминает следующие: весьма незначительные деформации вмещающей магму полости в земной коре; вскипание лавы; ассимиляция магмой пород на глубине, следствием которой является увеличение в объеме; увеличение объема нагреванием или путем химических процессов. Можно прибавить возможность взрыва и извержения вследствие проникновения поверхностных вод или вод океана близко к магматическому очагу.

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ МАГМ⁷

Согласно Iddings дифференциация означает разделение гомогенной порообразующей магмы на химически разные части. Для каждой области, в каждом отдельном «бассейне магмы», вероятно, имеется одна существенно однородная магма, из которой вследствие какого-либо процесса дифференциации происходят различные типы пород. В общем, полагают, что состав первичной магмы был промежуточный или основной и что эта магма разделилась на основные и кислые породы, как-то: базальты, андезиты (латиты) и риолиты.

Доказательством того, что дифференциация действительно имеет место является химическая родственность различных пород в какой-либо определенной области или провинции, последовательные излияния неодинаковых лав из одного и того же жерла, различные продукты, встречаемые в одном и том же интрузивном теле, данные изучения отдельных излияний. Объяснение этих процессов не всегда удовлетворительно.

Из магмы могут выделяться газы или водные растворы, богатые кремнеземом; из нее могут также выделяться расплавы окисей железа, титана или хрома; наконец, из нее могут выделяться сульфиды и сульфидные растворы. Эти выделившиеся части следует называть не магмами, а продуктами магмы⁸.

Ранее сделанные попытки к объяснению дифференциации все еще могут иметь некоторую ценность. К ним принадлежит приложение «принципа Сореля», гласящего, что, когда две части раствора имеют разную температуру, наблюдается стремление к селективной концентрации определенных ингредиентов в более остывших частях⁹.

Однако, G. F. Becker установил, что диффузия молекул в вязкой магме потребовала бы почти безграничного периода времени, а H. Bäckström указал, что это действие не могло бы изменить относительных пропорций, существующих между растворенными веществами.

J. Morozerwicz и R. A. Daly считали, что в дифференциации играет значительную роль плотность или удельный вес растворов. По их мнению, масса магмы, подобно высокому столбу соляного раствора, разделяется на более плотный нижний слой и более легкий верхний.

G. F. Becker впервые учел возможную роль фракционной кристаллизации, рассматривая дифференциацию, как следствие общего процесса остывания. Эта точка зрения была полностью развита в целом ряде статей N. L. Bowen (см. сноску 7). В настоящее время теория кристаллизационной дифференциации Bowen принята многими петрографами¹⁰.

Ликвационная дифференциация (несмешиваемость жидкостей). Если при понижении температуры определенные элементы или молекулы перестают полностью смешиваться с силикатовым расплавом в магме, может произойти расщепление. Мы можем себе представить, что именно таким образом находящиеся в растворе сульфиды могут выделиться в виде шариков, которые будут расти, и если магма будет продолжать оставаться в жидком состоянии, в дальнейшем отложатся в виде слоя расплавленного сульфида. Эта теория имеет основание, и полагают, что некоторые из сульфидных месторождений, образующихся при высокой температуре, могли сконцентрироваться именно таким путем.

Дифференциация путем кристаллизации. Теория Bowen особенно выделяет тот факт, что кристаллами раннего образования обычно являются тяжелые минералы, как-то: магнетит, ильменит и оливин; путем лабораторных опытов установлено, что кристаллы оливина действительно тонут в расплаве¹¹.

Ясно, что осаждение таких ранних кристаллов может привести к концентрации железных руд и вообще к дифференциации магмы. Исследовано много случаев, когда имело место такое осаждение кристаллов оливина в излияниях и интрузивах. Вне всякого сомнения, что при удалении кристаллов, по мере их образования, кристаллизация может создать весьма значительные изменения в составе магмы. Тяжесть является вечно присутствующей силой, стремящейся вызвать требуемое разделение. Этим можно объяснить разделение базальтовых или промежуточных магм на более кислую и более основную части. Большие интрузивные массы, подобно тем, которые мы видим в Sudbury (Ontario), разделяются на норит внизу и кварцевокислые породы вверху. Однако не так давно спор, возникший относительно петрографии Sudbury,

выявил, что мнение относительно предполагаемой дифференциации далеко не единодушно. Не подлежит сомнению, что дифференциация путем кристаллизации играет чрезвычайно важную роль, однако весьма вероятно, что главная роль принадлежит не ей, как было недавно высказано С. N. Fenner¹².

«Особенностью теории Bowen является то, что микропегматитовые смеси кварца и полевого шпата в диабазах и прочих подобных породах представляют окончательный остаток от кристаллизации и что это является иллюстрацией того способа, которым образовалась гранитная магма... Согласно Bowen кристаллизация базальтовой магмы должна бы привести к одному из двух чрезвычайно разных результатов, в зависимости от того, вступит ли в реакцию с оливином избыток кремнезема в жидкости, создавшейся от кристаллизации оливина. Если вследствие выпадения оливина или быстрого остывания реакции не последует, то получится жидкость, состоящая почти исключительно из щелочного полевого шпата и кремнезема; если реакция наступит, то окончательной жидкостью будет в сущности щелочной полевой шпат¹³».

Выше (стр. 98) говорилось, что во многих случаях, по крайней мере остаточная магма не содержит большого количества кремнезема. Fenner считает, что для разрешения проблем дифференциации мы пока еще не обладаем достаточными данными. Другим затруднением в принятии теории кристаллизационной дифференциации является весьма очевидное отсутствие дифференциации в батолитах и монзонитах гранодиоритового типа. Некоторые из них чрезвычайно однообразны, хотя часто они предоставлены действию эрозии на значительную глубину. Во многих случаях единственным признаком дифференциации служат чрезвычайно небольшие скопления по краям более основных пород.

Если кристаллизация и выпадение имеют место в глубинном магматическом очаге, как это и должно бы быть, то для того, чтобы подняться кверху и проявиться петрологически однородным массивам, предположим, железной руды или перидотита, отвердевшие компоненты должны вновь раствориться. На этом особенно настаивает Vogt.

Дифференциация под влиянием газов. Некоторые авторы¹⁴ преувеличивают роль летучих веществ, способствующих дифференциации, другие ее недооценивают. В большом бассейне магмы полное равновесие не может иметь места; как давление, так и температура не везде одинаковы. Вероятно, что в бассейне магмы существует струя газов, из которых некоторые выходят на поверхность через вулканические трещины, другие проникают в боковые стены породы.

«Когда пузырек газа поднимается кверху, между его компонентами возникают реакции, точно так же как и реакции с окружающей магмой... Поэтому эффективность магматических газов, как побудителей дифференциации, заключается, во-первых, в их способности уносить с собою материал при выделении и, во-вторых, в их способности производить селективный перенос материала из нижних горизонтов в верхний»¹⁵.

Весьма возможно также, что, как указывает W. H. Goodchild, пузырьки газа прилипают к мельчайшим кристаллам и капелькам сульфидов и, таким образом, служат как бы флотационными агентами.

Можно твердо сказать, что щелочные породы происходят из субщелочных пород путем дифференциации; достаточно исчерпывающим доказательством служат способы их появления в районе вулкана Arizona¹⁶ San Francisco и в поясе интрузив Leadville-Boulder¹⁷. Мы берем лишь два

из многочисленных примеров. Весьма возможно, что, как это говорит Daly, ассимиляция известняка может, местами, вызвать образование щелочных пород.

Помимо того, что эти породы богаты щелочами, они содержат также весьма значительные количества титана, циркона, хлора, фтора, фосфора, бария и других обычных компонентов. Считают, что эти щелочные породы, вероятно, дифференцировались в верхней части магматического очага, причем дифференциация обуславливалась в значительной степени циркуляцией газов.

ОТНОШЕНИЕ ВУЛКАНОВ И ИЗЛИЯНИЙ ЛАВЫ К РУДНЫМ МЕСТОРОЖДЕНИЯМ

Кажется несомненным, что выходящие на поверхность магмы происходят из магматических бассейнов значительной глубины, быть может, 10—15 миль от поверхности. Хорошо известные вулканические явления свидетельствуют о сильных взрывах, являющихся следствием снижения давления летучих компонентов, а также, вероятно, и внезапного расширения паров, ассимилируемых магмой метеорных вод. В других местах основные магмы значительно менее богаты летучими веществами и изливаются из трещин, не вызывая взрывов.

Присутствие газов в лавах доказывается столь обычным для лав наличием пузырьков и пустот и тем, что на поверхности из лавы выделяются пузырьки газа. В более концентрированном виде летучие вещества выделяются из фумаролл или струй пара, идущих из действующих вулканов. Детальные наблюдения производятся над вулканами Италии (Santurini), в Исландии, на Гавайских островах, над вулканом Katmai (Аляска), на Lassen Peak (Калифорния) и в многих других местах¹⁸.

Bergeat¹⁹ дает перечень элементов и химических соединений, присутствующих в виде сублиматов (продуктов возгонки) в вулкане Липпарских или Эоловых островов (архипелаг на север от Сицилии): сера (содержащая селен), теллур, реальгар, борная кислота, хлористые соединения натрия и железа, глауберит ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$), глауберова соль ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), серноокислый литий, квасцы (с таллием, рубидием и цезием), фтористо-кремниевый калий, кобальт, цинк, олово, висмут, свинец, медь, иод, фосфор. В других местах присутствуют иногда другие хлористые соединения, сульфаты и карбонаты.

Близ вулкана Katmai в фумароллах Valley of the Ten Thousand Smokes («Долина десяти тысяч дымок») E. D. Lies²⁰ нашел и исследовал налеты спекулярита, магнетита, пирита, галенита, сфалерита и ковеллита, состоящие из заметных глазу кристаллов. Присутствуют также небольшие количества олова и молибдена. Самая высокая температура в одном из многочисленных фумаролл равнялась 650°C . В фумаролле, отлагающем магнетит, температура газов была 230°C . Преобладающим компонентом фумаролл обычно является перегретый пар; тепло доставляют газы, выделяющиеся из кристаллизующейся магмы относительно близко к поверхности, но, за исключением фумароллов, выходящих непосредственно из горячей лавы, в чисто магматических испарениях можно ожидать примесь большего или меньшего количества воды метеорного происхождения. Посторонние вещества могут оказаться примешанными вследствие реакции с соседними породами или органическими ве-

ществами. Другими компонентами, составляющими обычно менее 1%, являются CO_2 , азот, сероводород, также углеводороды, различные молекулы кислот, как например HCl , HF , SO_2 . Газы не находятся в состоянии равновесия; происходят непрерывные изменения. Allen приходит к заключению, что окисление газов не является ни первоначальным источником тепла, ни причиной, вызывающей вулканическую деятельность, хотя температура лавы близ поверхности поддерживается отчасти и химическими реакциями²¹.

По мнению Allen в одном из фумаролл Katmai содержатся следующие редкие компоненты (в процентном объеме, исключая воду): CO_2 — 38,1; O_2 — 5,1; CO — 0,6; CH_4 — 7,1; $\text{H}_2\text{S} + \text{H}$ — 24,7; N_2 — 24,09; A — 0,31. Развитие спекулярита и магнетита объясняется формулой $2\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 6\text{HCl} + \text{Fe}_2\text{O}_3\text{S}$. По своему обширному опыту Allen заключает, что так называемый закон Дэвилля не всегда приложим. По мнению Deville, испарение должно начинаться с сухих паров NaCl ; затем следует HCl , SO_2 и H_2O , и деятельность заканчивается испарениями CO_2 и, наконец, появлением горячих ключей. Следует, однако, добавить, что выделение CO_2 продолжается и после того, как фумаролл прекратил деятельность²².

Выделение CO_2 и азота наблюдается во многих рудниках, расположенных недалеко от вулканов, например в Grapple Creek (Колорадо), Creede (Колорадо), Toporah (Невада), округ Thames (Новая Зеландия).

В действующих вулканах рудные месторождения образуются редко. Причиной этого, вероятно, является то, что при извержениях концентрация металлосодержащих испарений не имеет места. Такие испарения присутствуют, но они не могут выделяться постепенно и непрерывно. С другой стороны, в громадных излияниях базальтовой лавы, спокойно изливающейся в каком-либо районе, большая часть испарений оказывается уже отделенной во время дифференциации в магматическом очаге и не остается почти ничего, кроме сидерофиловых элементов подобно Ni, Cr, Pt и элементов подобных меди, которые входят в состав силикатов.

Там, где присутствуют в обилии метеорные воды и где выделение газов не так сильно, могут образоваться горячие восходящие ключи, в особенности в угасающих вулканах. Такие ключи, примером которых служат горячие источники в Lassen Peak, обычно представляют нейтральные сульфатные растворы. В других случаях — это кислые воды. Такие ключи играют важную роль в образовании рудных месторождений.

Месторождения полезных ископаемых в вулканах и излияниях лавы возникают близ поверхности, на глубине всего нескольких сот футов. Их никак не следует смешивать с рудными месторождениями, образующимися под действием щелочных горячих ключей, восходящих из гораздо более глубоких источников, хотя в настоящее время их можно встретить в эффузивных породах близ поверхности.

«Вулканические» месторождения немногочисленны и не представляют большого экономического значения. К ним принадлежат: самородные сера (с теллуrom и селеном), которую мы находим в кратерах многих вулканов; испарения бора (сассолит или борный ангидрид); местные образования алунита, вызванные действием растворов серной кислоты на калиевые породы — и только. Но к этому классу, может быть, следует отнести некоторые продукты эксудации, происходящие, очевидно, из самих излияний, как-то: топаз и прочие минералы

в риолите и особые местные скопления олова, образовавшиеся при высокой температуре, наблюдаемые в некоторых риолитах Боливии, Невады и Новой Мексики и отмечаемые сочетанием коллоидного «деревянного олова», халцедона и спекулярита. Подобного рода месторождения не имеют экономического значения.

ОТНОШЕНИЕ ИНТРУЗИВНЫХ МАГМ К МИНЕРАЛЬНЫМ МЕСТОРОЖДЕНИЯМ ²³

Определенное давление, например 200 ат, соответствующее глубине приблизительно 2 км, совершенно достаточно, чтобы побудить летучие компоненты образовать растворы с другими компонентами магмы. Поэтому полная последовательность процесса при остывании такой системы может развиваться лишь в интрузивных телах.

То, что происходит, может быть представлено диаграммами температуры и состава (слева) и температуры и давления (справа) (рис. 10). Эти

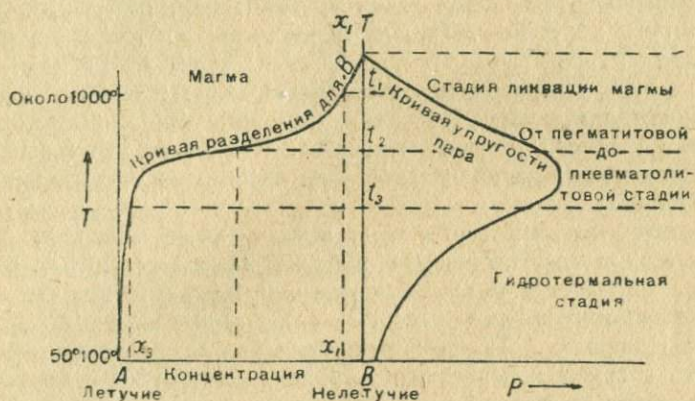


Рис. 10. Диаграмма температуры и состава (слева) и температуры и давления (справа) для системы летучего компонента А, т. е. воды, и нелетучего компонента В, т. е. силикатов (по Niggli).

диаграммы представляют в упрощенном виде бинарную систему, причем А является летучим веществом, а В нелетучим компонентом. А может представить воду, а В — порообразующий силикат. Все то, что могло бы усложнить диаграмму, как например, изоморфные кристаллы или сочетание между А и В, не учитывается; В всегда выделяется в качестве того же минерала. За исходный момент возьмем X_1 , в котором летучий компонент присутствует в весьма незначительном количестве. Кривая слева представляет точку отвердевания любой смеси А и В. Ввиду присутствия А, точка отвердевания В понижается до t_1 для концентрации X_1 . В выкристаллизовывается и состав раствора постепенно изменяется по кривой. Сначала В выделяется лишь в небольшом количестве, скажем 10%, но далее некоторое понижение T вызывает значительные выделения В. Это представлено плоской частью кривой, в которой состав остаточной магмы весьма сильно изменен некоторым охлаждением. Когда В выкристаллизуется почти полностью, остается небольшое количество жидкости, в котором А присутствует в большом избытке. Близость t_2 пред-

ставляет завершение магматического периода. Большая часть расплава выкристаллизовалась и остается раствор совершенно иного характера. Однако, изменение протекает постепенно и непрерывно. Здесь близ t_2 начинается образование пегматитовых растворов. В действительности, нам известно, что существуют переходы от нормальных изверженных пород к пегматитам и от последних к гидротермальным явлениям.

Однако, пегматиты теснее связаны с изверженными породами, чем с гидротермальными — например рудными жилами. Пегматитовая стадия, или как ее также называют, стадия *салических экстрактов* (Si, Al), развивается по кривой. Большая часть кремнезема и щелочно-алюминиевого силиката быстро выделяется по мере незначительного понижения температуры. Когда остаются лишь небольшие части остаточной магмы, содержащей большее количество воды, кристаллизация начинает идти по крутой части кривой, т. е. она развивается медленно и при понижении T растворимость изменяется лишь незначительно. Это соответствует более поздней фазе пегматитов, т. е. фазе друзового развития. Выделяются минералы, подобные альбиту, турмалину, бериллу, фосфоритам, касситериту и колумбиту. Начало периода пегматитовых друз совпадает с поворотом кривой между t_2 и t_3 . Далее следует стадия цеолитов, карбонатов и рудных минералов; т. е. начало гидротермальной фазы с медленной кристаллизацией из остатка, который теперь содержит большое количество главного летучего вещества, т. е. воды. Эти испарения являются продуктами магматической дифференциации, но их никак нельзя назвать магмами.

Не следует забывать, что хотя многие новые минералы отлагаются непосредственно выделяющимися продуктами магмы, целый ряд других минералов образуется вследствие реакции между этими продуктами и уже отложившимися минералами или же минералами, содержащимися в соседних породах. Такие замещения (весьма разнообразные) можно наблюдать в самих изверженных породах, пегматитах и во всех других месторождениях минералов магматического происхождения.

Внезапное выделение компонентов газовой фазы не имеет места; в неимеющей выхода системе, находящейся под высоким давлением, этого и нельзя ожидать; это может иметь место лишь в том случае, если упругость пара в растворах превышает внешнее давление.

Теперь обратимся к правой стороне рис. 10, представляющей упругости пара, относящиеся к данным температурам. В начале кристаллизации упругость пара будет низкой; жидкость присутствует в большом количестве, а летучие компоненты в незначительном; по мере того как падает температура, значительное количество нелетучего вещества выкристаллизовывается и вода становится концентрированной в остаточной жидкости. Но повышение количества воды в остатке силиката, находящемся в расплавленном состоянии, означало бы громадное повышение давления, требующееся для того, чтобы удержать воду в жидкости. В той части кривой, которая обозначена в качестве пневматолитной стадии, упругость достигает высшей точки. Упругость не повышается до определенных пределов, так как понижение температуры равновесия, являющееся следствием возрастающего понижения точки затвердевания, стремится к понижению упругости пара.

Согласно Niggli максимальное давление (или упругость) является показателем интервала времени, в течение которого температура оста-

точного раствора превышает критическую; это он и называет пневматолитной стадией. Она следует немедленно за пегматитовой стадией; в течение этого периода растворы выделяются из магмы во всех тех пунктах, где уменьшилось давление. Интрузивная мощь или сила инъекции гидротермальных растворов становится слабее; они будут продвигаться лишь по трещинам.

Morey смотрит на вопрос несколько иначе; по его мнению

«Пегматиты соответствуют максимальному давлению или температуре приблизительно 750° . При дальнейшем остывании кристаллизация будет продолжаться, но она будет несколько иного типа. Вначале выкристаллизовывается преимущественно силикатный материал; за ними следует кристаллизация аксессуарных минералов турмалина, топаза, флюорита, апатита, касситерита и других жильных минералов, образующихся при высокой температуре. Этот предел может лежать между 500 и 300° . Теперь жидкость содержит гораздо больше воды, чем при максимальном давлении, но давление пара сильно уменьшится и при критической температуре воды это давление будет гораздо меньше, чем давление чистой воды. (Критическая точка для H_2O : T 374° ; P 200 ат.)

Добавление какого-либо растворимого вещества повысит критическую температуру. По мере того как остывающая магма выбрасывает компоненты один за другим, остаточная магма будет все время содержать достаточно материала менее летучего характера (бораты, фосфаты, хлориды), чтобы удерживать в растворе более летучие соединения. Критические явления никогда не наблюдаются в насыщенных растворах, образовавшихся при остывании магмы»²⁴.

Day и Allen²⁵ считают, что всякое давление, могущее конденсировать пар, загонит воду обратно в магму. Жидкие растворы не могут подниматься на поверхность.

Несмотря на это, кажется достаточно вероятным, что растворы в действительности поднимаются на поверхность, неся с собой весьма значительное количество кремнезема и других веществ. Ведущую силу представляет непрерывное выделение газов, толкающих впереди себя столб конденсированного раствора.

Vogt²⁶ в своих выводах дает цифры, которые показывают, что существует много веществ — SiH_4 , SiF_4 , $SiCl_4$, $SnCl_4$, SO_2 , $TiCl_4$, $AsCl_3$, $AlCl_3$, — обладающих критической температурой приблизительно одинаковой с критической температурой воды. Некоторые пяти-шести-валентные хлористые и фтористые соединения W, Mo, U, Ni, Ta обладают весьма низкими точками кипения, так WF_6 кипит при температуре 19° . Многие из обыкновенных растворимых соединений, например хлористые щелочи, обладают, однако, весьма высокими критическими температурами.

ОБЩИЙ ОБЗОР РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МАГМАТИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Прежде чем переходить к рассмотрению природы растворов веществ, образующих рудные месторождения магматического происхождения, что является делом в известной степени гадательным, следует сообщить довольно подробно некоторые факты, относящиеся к разным типам.

Коротко говоря, типы месторождений следующие: 1) жидкомагматические, 2) пирометасоматические, 3) пегматитовые, 4) гипотермальные, 5) мезотермальные и 6) эпипермальные.

Жидкомагматические месторождения содержат лишь немногочисленные и простые минералы, окислы и сульфиды сидерафиловых эле-

ментов; Fe, Ni, Cr, Ti, Pt, Cu; из минерализаторов наиболее выделяется фосфор; кварц присутствует в небольшом количестве, но в общем рудные минералы те же, что и породообразующие минералы. Естественно, что замещение является второстепенным процессом; руды выкристаллизовались из расплавов.

Пирометасоматические месторождения, образовавшиеся под непосредственным действием магматических испарений на известняк, также содержат простые минералы и окислы сульфидного типа; магнетит и спекулярит присутствуют в весьма значительных количествах, но изобилуют также простые сульфиды, подобно пириту, пирротину, сфалериту, арсенипириту, халькопириту и борниту. Ввиду того что они присутствуют в карбонатных породах, а также и ввиду добавлений магматических Fe и Si, жильные минералы — преимущественно силикат; кварц присутствует в меньшем количестве. Преобладающим процессом является замещение. Значительное количество материала, с одной стороны, выносятся, с другой, привносится.

Пегматиты рассматриваются, как интрузивные остаточные магмы, выведенные из почти полностью остывшей магмы. Они содержат кварц, полевые шпаты, слюды и пироксены; кварц сопровождается характерной ассоциацией лития, олова, вольфрама, колумбия, тантала, металлов цериевой группы, тория и бериллия. Присутствуют окислы и комплексные силикаты, а также фосфаты и танталаты. Присутствуют некоторые сульфиды и арсениды, но пирит отсутствует. В минералы входит значительное количество фтора, бора и иногда хлора. Пегматиты образуют дайки, и наблюдается некоторое замещение в смежной породе. В самих пегматитах наблюдается последовательность минералов позднейшего введения, как-то: альбита, турмалина и пр. Пегматиты представляют ярко определенный тип, но наблюдаются переходы к изверженным породам и жилам.

В гипотермальных месторождениях все металлы принадлежат к халькофильной группе, как напр. Fe, Sn, W, Au, Ag, Cu, Zn, Pb. В более редких типах встречаются минералы цериевой группы. Окислов меньше. Присутствуют и более сложные минералы, а также комплексы минералов, соответствующие медленно понижающейся температуре. Присутствуют сера, мышьяк, фосфор, теллур, хлор и бор. Если месторождение занимает пустоты, то в материале преобладает кварц. Кремнезем мало входит в замещение. Однако, роль замещения весьма значительна; в породы проникают жидко-подвижные растворы, вводящие значительные количества веществ, с одной стороны, и экстрагирующие их в значительной степени, с другой. Присутствуют значительные количества золота и серебра.

В мезотермальных месторождениях минералы более разнообразны. Металлами являются: железо, медь, цинк, свинец, золото, серебро, никель, олово и местами вольфрам. Окислов меньше. Присутствуют мышьяк, сурьма, фтор, сера и теллур, в значительно меньшем количестве — хлор и фосфор. Преобладающим жильным минералом является кварц; как всегда, он предпочитает открытые пространства. Замещение наблюдается в очень сильной степени; как и раньше, значительное количество материала привносится, с одной стороны, и выводится, с другой. Процессы замещения протекают как в породе, так и в выполнении. Ряд сложных минералов еще более увеличивается сложными сульфоарсенидами и сульфантимонидами, которые обычно появляются к концу оруденения.

Эпитермальные месторождения содержат золото, серебро, железо, медь, свинец, цинк, ртуть, реже олово, вольфрам и никель. Присутствуют сера, фтор, сурьма, мышьяк, селен и теллур; хлор, бор и фосфор обычно отсутствуют. Преобладающим жильным минералом является кварц. Как и раньше, он выбирает открытые пространства. Выполнение наблюдается все в большей и большей степени, но замещение также играет значительную роль. Большие количества материала выводятся, с одной стороны, и привносятся, с другой. Процессы замещения протекают как в породе, так и в выполнении.

Считают, что гипотермальные и мезотермальные месторождения образуются испарениями из интрузивных пород, обычно батолитов. Считают также, что эпитермальные месторождения образуются испарениями из чрезвычайно глубоких скоплений магмы, в которых протекает дифференциация.

ЗОНАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ

Теория зон старается вывести какие-либо законы распределения металлов в рудных месторождениях по отношению к материнскому изверженному телу. Это может проявиться в горизонтальном или вертикальном направлении или в обоих. В горных районах Европы уже давно проводились наблюдения, но теория была разработана индивидуально L. Dehaunay²⁷, J. Collins²⁸, George Waller²⁹ и J. E. Spurr³⁰. Из них труд Spurr наиболее обширен. В недалеком прошлом большой интересный материал по этому вопросу дал Emmons³¹ и другие.

Казалось бы, что восходящие горячие растворы, сильно минерализованные, когда попадают в менее горячие зоны, должны отлагать минералы в порядке обратном их растворимости. Естественно, что этот фактор не является решающим в проблеме. По крайней мере, опыт показал, что олово, например, отлагается из высокотемпературных растворов. За его отложением следует отложение меди, затем цинка, свинца и серебра. Жилы, образовавшиеся вдали от интрузивов, надо полагать, выполнены преимущественно пустой породой.

Spurr³² дает следующий ряд, представляющий последовательные отложения пород промежуточного состава: Mo, W, Au, Cu, (Ag), Zn, Pb, (Ag).

Нижеследующая, заимствованная у Эммонса, таблица представляет собою общее выражение зональной теории. Понятно, что в какой-либо отдельной жиле не может наблюдаться полная последовательность, хотя полагают, что некоторые системы жил могут иметь вертикальный предел в 10 000 футов и больше. Понятно также, что в некоторых жилах многие из зон могут отсутствовать.

РЕКОНСТРУИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЖИЛ, НАЧИНАЯ ОТ ПОВЕРХНОСТИ И ПОЧТИ ДО КРОВЛИ БАТОЛИТА

(Займствовано у Эммонса)

Поверхность

Пустая зона, 1. Пустая зона, халцедон, кварц, барит, флюорит и пр. В некоторых жилах содержатся небольшие количества ртути, сурьмы и мышьяка.

Ртуть, 2. Ртутные жилы, обычно с халцедоном, марказитом и пр. Барит-флюоритовые жилы.

Сурьма, 3. Сурьмяные руды, — стибнит на известной глубине часто переходит в свинец, с антимонидами. Многие из них содержат золото.

Золото и серебро, 4. Рудные «бонанцы» благородных металлов. Аргентит, сурьма и мышьяковистые минералы обычны. Серебряные минералы, некоторые количества медных, свинцовых и цинковых сульфидов, кварц, кальцит, родохрозит, адуляр, алунит и пр.

Пустая зона, 5. Почти совсем пустая зона; она представляет почву многих жил благородных металлов, приуроченных к третичному периоду. Кварц, карбонаты и пр. с пиритом и небольшим количеством других сульфидов.

Серебро, 6. Аргентитовые жилы, комплексные сурьмяно-серебряные сульфиды, стибнит и пр. Галенитовые жилы с серебром. Обычно по мере углубления содержание серебра уменьшается. Жильный минерал — кварц, сидерит — обычны; содержание последнего часто увеличивается по мере углубления.

Свинец, 7. Галенитовые жилы обычно с некоторым количеством серебра. Сфалерит обычно присутствует, содержание его по мере углубления увеличивается. Халькопирит обычен. Жильные минералы — кварц и часто карбонаты (Fe, Mn, Ca).

Цинк, 8. Сфалеритовые жилы с некоторым количеством свинца и халькопирит. Энаргитовые жилы обычно с тетраэдритом и теннантитом.

Медь, 9. Тетраэдритовые жилы, обычно сереброносные; присутствует халькопирит. Некоторые из жил по мере углубления переходят в халькопирит. Энаргитовые жилы обычно с тетраэдритом и теннантитом.

Медь, 10. Халькопиритовые жилы, обычно с пиритом, часто с пирротинном. Жильный минерал — кварц, местами — карбонаты. Некоторые жилы по мере углубления переходят в пирит и пирротин с некоторым количеством халькопирита. Обычно содержат серебро и золото.

Золото, 11. Золотоносные жилы с кварцем, пиритом и обычно с арсенопиритом. Местами зоны 10 и 11 меняются местами.

Висмут, 12. Висмутин и самородный висмут с кварцем, пиритом и пр.

Мышьяк, 13. Арсенопирит с халькопиритом и часто вольфрамовые руды.

Вольфрам, 14. Вольфрамовые жилы с кварцем, пиритом, халькопиритом, пирротинном и пр. Обычно присутствует арсеноспирт.

Олово, 15. Касситеритовые жилы с кварцем, турмалином, топазом и пр.

Пустая зона, 16. Кварц с незначительным количеством других минералов. Во многих жилах можно наблюдать лишь одну из верхних зон (2, 3 или 4). Лишь немногие из этих жил вскрыты ниже пустой зоны 5. По наблюдениям, почти все зоны ниже зоны 5 переходят одна в другую³³.

Осаждение какого-либо определенного металла в сложном растворе не зависит от какого-либо отдельного фактора: здесь играют роль температура, давление, растворитель, концентрация, относительное обилие, реакции в растворе, протекающие по мере хода осаждения, характер коренной породы и, вероятно, многие другие факторы. Вообще говоря, считается, что металл, присутствующий в наибольшем количестве (например железо), осаждается первым. Это вопрос действительно весьма сложный, и правильно подойти к разрешению его может лишь химик³⁴.

Месторождения в Cornwall (Англия) представляют, пожалуй, наилучшую иллюстрацию зональной теории. Здесь на известной глубине встречается олово, в менее измененных сланцах — медь, а еще дальше — месторождения свинца и цинка. В Bingham (Utah) медные месторождения концентрируются вблизи мондонитовых интрузий, тогда как месторождения свинца отнесены дальше. В жиле Leadville (Bingham) на глубине 2 000' высокотемпературное свинцово-цинковое месторождение переходит в теннантитовую и халькопиритовую руду. Многие свинцовые жилы даже на небольшой глубине переходят в тощие сфалерит-сидерит-пиритовые руды. В эпитермальных жилах основные металлы содержатся в меньшем количестве, а золото и серебро выпали из раствора, видимо, на глубине приблизительно 2 000' от поверхности. Это то, что Spurr³⁵ называет «telescoped» жилы, о которых полагают, что они

получаются под влиянием постепенно повышающейся температуры; в них наблюдается неопределенная или перекрывающая друг друга последовательность минералов. Однако, при более близком рассмотрении выявляются различные факты, свидетельствующие о том, что зональная теория, в своей современной форме, не совсем состоятельна.

По этой теории олово присутствует лишь в месторождениях, образующихся только при высокой температуре, но в некоторых местах, например Potosi и Chocaya, оно встречается довольно высоко в мезотермальных и эпитеpmальных зонах. То же самое можно бы сказать и о вольфраме: этот минерал также образует значительные месторождения (Нидерланды) в зоне, близкой к эпитеpmальным жилам, а в месторождениях, образуемых горячими ключами (Uncia), значительные его количества достигают поверхности. Считается также, что свинец отлагается при низкой температуре, но три из величайших в мире месторождений свинца принадлежат к гипотермальному классу, а именно Broken Hill, рудник Sullivan и рудник Alta (Helena). Некоторые из свинцовых жил даже на небольшой глубине становятся убогими; другие продолжают оставаться богатыми даже на глубине 4 000'. Если, подобно Sprug, предположим, что месторождения долины Миссисипи магматического происхождения, то большее количество месторождений свинца достигает поверхности на много тысяч метров выше предполагаемого бассейна магмы; согласно Sprug мы должны бы здесь ожидать встретить пустую породу. Тот же самый довод относится к цинку.

Проблема становится все более сложной, если учитывать влияние коренной породы. Растворы могут отлагать в известняках галенит, но в то же самое время совершенно такие же растворы могут в породах иного состава образовать пиритовые руды. Наконец, в эпитеpmальных жилах не наблюдается зонального распределения, за исключением того, что с глубиной руды делаются более убогими. Они слишком удалены от исходной точки. Нельзя провести никакой параллели между ними и вышедшими на поверхность массивами материнской изверженной породы.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ В РУДАХ

В каждой отдельной руде минерал обычно выделяется в определенной последовательности, причем более поздние минералы частично замещают более старые. Ввиду того что обычно наблюдается зональное перекрытие и повторение, проблему лучше изучать на рудах, в которых наблюдаются как крустификация, так и замещение.

Имеется основание предполагать, что примерно одни и те же законы приложимы ко всем месторождениям магматического происхождения. В магматических и пирометасоматических рудах последовательность простая: жильные минералы — древние, рудные — поздние. Последовательность будет следующая: силикаты, окислы, пирит, пирротин, сфалерит, халькопирит. Обычны процессы «несмешивания» (unmixing), проявляющиеся в виде включений халькопирита и пирротина в сфалерит и пентландита в пирротин.

В гипотермальных и мезотермальных рудах последовательность может быть следующая (обычно продолжительная и перекрывающаяся): касситерит, вольфрамит, пирит, арсенопирит, кобальт и мышьяковистые соединения никеля, станнит, сфалерит, энаргит, теннантит, тетраэдрит,

борнит, халькопирит, галенит, халькозин, сульфоантимониды свинца, серебра или сульфоарсениды. Там, где мы видим золото, оно обычно представляет один из позднейших минералов. «Несмешивание» играет значительную роль в особенности в отношении галенита, пирротина, сфалерита и станнита.

В эпитермальных жилах последовательность обычно следующая: кварц, пирит, сфалерит, халькопирит, галенит, тетраэдрит, наконец, аргентит, золото, электрум и сложные сульфоантимониды и сульфоарсениды серебра и свинца. «Несмешивание» играет менее значительную роль; часто замечается обратный порядок сфалерит—халькопирит³⁶, обратный порядок сфалерит—галенит редок. Могут появиться жильные и рудные минералы более позднего происхождения.

Разрешение вопроса о том, чем объясняется эта замечательная последовательность, представляется будущему. Без сомнения, в главном она является следствием понижения температуры, но проблема, взятая в целом, весьма сложна. Одно из главных затруднений заключается в том, что нам известно очень мало относительно стойкости рудных минералов. Пост-минерализационные и поверхностные изменения здесь не рассматриваются.

ХАРАКТЕР РАСТВОРОВ, ОБРАЗУЮЩИХ РУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Установлено, что месторождения ртути и стибнита образуются под действием восходящих горячих щелочных ключей, как это мы видим, например, в Sulphur Banks (Калифорния) и Steamboat Springs (Невада). Отложение происходит почти что у нас на глазах. В продукте спекания находят небольшие количества золота, серебра, меди, свинца и цинка. Becker окончательно установил, что ртуть и сурьма содержались в водах в качестве двойных щелочных сульфидов, и он полагает, что большинство других металлов, за исключением быть может серебра, находились в таком же соединении. Относительно других месторождений можно только догадываться. Эпитермальные месторождения столь связаны с действием горячих ключей и с отложением коллоидального кремнезема, что их образование подобными же восходящими ключами не подлежит сомнению.

Что касается глубоко залегающих месторождений, то лучше будет начать с тех из них, которые относятся к жидкомагматическому классу. Вероятно, они образовались путем консолидации из горячего расплава, который сам по себе является продуктом дифференциации магмы; однако, присутствовали и другие вещества, как например фосфор в апатите, присутствие которого должно было значительно понизить точку плавления руд. Присутствие некоторых минерализаторов можно довольно твердо установить по наличию таких минералов, как хлорит, эпидот и гранат, которым чужда нормальная последовательность кристаллизации изверженных пород.

Пегматитовые остаточные магмы, вероятно, содержали значительное количество воды, так же как и многие другие минерализаторы; они, вероятно, находились в состоянии подвижной ассоциации, промежуточном между магмой и водным раствором.

Растворы, из которых образовались гидротермальные месторождения,

вероятно, были теснее связаны с пирометасоматическими экстрактами, чем с пегматитовыми магмами. Нет никакого сомнения, что они были сильно концентрированы. Из того факта, что большие количества материала, как например слабо летучие соединения калия, натрия, кальция, магния и других веществ, были в значительной степени вынесены из большинства замещений, можно с уверенностью заключить, что агентами здесь являлись жидкости, а не газы. Это относится к пирометасоматическим месторождениям, так же как и к месторождениям олова и другим последующим классам. Газы не могли осуществить такого громадного перенесения. Поэтому полагают, что пневматолитовые процессы не играли значительной роли в образовании таких месторождений. Из трудов Day, Allen, Sheperd и др., казалось бы, можно заключить, что многие вулканические газы в момент своего выделения — кислые, но они находятся в неустойчивом равновесии и не могут сохранять свой кислый характер после того, как пробыли в продолжительном контакте с соседними породами. Полагают, что они в ограниченной степени окислялись до сульфатов, но в большей своей части состояли из сероводорода, щелочных сульфидов и различных галоидных соединений. Несомненно, однако, что присутствовала также свободная CO_2 . Надо полагать, что точка зрения Беккера относительно двойных щелочных сульфидов в качестве компонентов растворов, вероятно, правильна.

Металлические сульфиды почти нерастворимы в воде, но они более или менее растворимы в жидкостях и газах, что установлено опытами Becker, Lenher, Ditte, Grout, Paviez и Horatio Brown. Аргентит, повидимому, наиболее трудно растворим, так же как арсенопирит, халькопирит и касситерит. Однако, касситерит, повидимому, растворим в некоторых фосфатовых растворах.

Интересные и весьма ценные опыты были недавно предприняты Horace Freeman³⁷, который установил, что комплексная свинцово-железо-цинковая руда из рудника Sullivan плавится при температуре 1380° и остается жидкой вплоть до температуры в 1200° , а затем отвердевает, повидимому, в виде эвтектики. Еще интереснее его опыты по сплавлению сульфидов с Na_2S , который сильно снижает точку плавления (все переименованные сульфиды имеют точку плавления выше 1000°). Он получил:

$\text{PbS} \cdot \text{Na}_2\text{S}$	650°
$\text{FeS} \cdot \text{Na}_2\text{S}$	660°
$\text{ZnS} \cdot \text{Na}_2\text{S}$	620°
$\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Na}_2\text{S}$	560°

Подобные же результаты, все ниже 700° , были получены с Ni, Co, Mn, Mo, As, Sb, Ag, Au и Cd.

Вода разрушает эти двойные сульфиды, причем образуются коллоидные суспензии сульфидов. По удалении растворимого сульфида коллоид может оставаться, хотя электролит выделяет гель. Некоторые двойные сульфиды, например железа, золота, сурьмы и мышьяка, растворимы в воде.

Кварц сплавливали с Na_2S и растворяли в воде. Раствор оставляли постоять, после чего сернистый натрий окислялся (Na_2S), а SiO_2 выделялся в виде геля. Самородки золота сплавливали с Na_2S и расплав растворяли в воде; при соприкосновении с воздухом отлагалось коллоидальное золото. Na_2S в присутствии H_2O и H стоек до температуры, превышаю-

щей 800°. Гели сернистого железа всякой степени вязкости можно легко получить из железисто-натрового сульфида. Известное дисперсирующее действие H_2S на сульфиды установлено опытами Tolman и Clark³⁸ и Clark и Menaul³⁹. Поэтому в качестве рабочей гипотезы можно предположить, что сульфиды в весьма значительной степени перенесены в коллоидальном состоянии⁴⁰. Возможно, что действовали и другие процессы. Вероятно, присутствующая коллоидальная окись кремния возможно оказывала защитное действие в том смысле, что она поддерживала сульфиды в дисперсном состоянии.

Другой проблемой, которая всегда представляла определенные трудности, является перенесение окиси кремния, столь постоянно присутствующей в рудных месторождениях всех классов. Наиболее вероятным объяснением, надо думать, будет то, что окись кремния переносится в коллоидальном растворе и осаждается в виде геля, который почти немедленно выкристаллизовывается в кварц. Хорошо известная ассоциация золота с кварцем всего проще объясняется коллоидальными процессами. Силификация не является наиболее типичным метасоматическим процессом, и это, повидимому, является следствием того, что коллоидальная окись кремния с большим трудом проникает и замещает боксовые породы. С помощью осмотических процессов растворы могут разделяться на две части: коллоидальную и электролитную.

Принято думать, что коллоидальные процессы могут иметь место только при низких температурах, но эта точка зрения требует пересмотра⁴¹. Кварц эпитегрмальных жил часто обнаруживает колоформное его осаждение и последующую перекристаллизацию в кварц; но подобного же рода явления наблюдаются также и в мезотермальных месторождениях, подобных месторождению Tintic. Takeo Kato описывает коллоидальное осаждение кварца и касситерита в мезотермальных или гипотермальных медно-оловянных жилах. W. V. Smitherinale⁴² исследовал кварцевую жилу в Британской Колумбии, содержащую магнетит, спекулярит, пирит, халькопирит и другие сульфиды. В этом месторождении кварц и пирит, вероятно, гипотермального происхождения, и в них наблюдаются несомненные характеристики коллоидов. Этот пример приведен в целях иллюстрации возможных пределов коллоидальных явлений.

Жилообразующие растворы, вероятно, были вначале жидкими и часто высокой концентрации. В качестве преобладающего компонента они содержали воду и были в непрерывном движении и в состоянии вязкости. В их строении играли весьма значительную роль коллоидальные дисперсии.

¹ Большинство крупнозернистых пород, подобных гранитам и диоритам, несомненно, отвердели из горячего жидкого расплава. Некоторые петрографы считают, что подобные же породы могут произойти от замещения при высокой температуре совершенно иных пород, подобных кварциту, под действием испарения из соседних магм. По самой сущности вещей такие продукты должны быть второстепенного значения. С другой стороны, некоторые основные изверженные породы могут образоваться из расплава косвенным путем при кристаллизации и отложении тяжелых силикатов, как оливин.

² C. N. Fenner. The Katmai magmatic province. „*Jour. Geol.*“ 34, 1926.

³ C. N. Fenner. *Op. cit.*, p. 750.

J. J. Sederholm. On syanectic minerals and related phenomena. „*Bull.*“ 48. *Comm. geol. de Finlande*, 1916.

- E. S. Bastin. Origin of the pegmatites of Mairé. „*Jour. Geol.*“ 18, 1910, p. 312.
- ⁴ „*Quart. Jour. Geol. Soc.*“ 53, 1897, p. 477.
- ⁵ G. W. Tyrrell. Principles of petrology. 1926, p. 67.
- ⁶ G. W. Tyrrell. Op. cit., p. 66.
- ⁷ Подробности читатель найдет в главах „Магма“ и „Дифференциация“ в трудах: Alfred Harker. Natural history of igneous rocks, 1909. J. P. Iddings. Igneous rocks, 1909; R. A. Daly. Igneous rocks and their origin, 1914; F. W. Clarke. Geochemistry, 1924; G. W. Tyrrell. The principles of petrology, 1926; J. H. L. Vogt. The physical chemistry of the magmatic differentiation of igneous rocks. „*Jour. Geol.*“ 29, Nos. 4, 5, 6, 7, 1921.; N. L. Bowen. Later stages of the evolution of igneous rocks, idem, 23, 1915, supplement; Crystallization-differentiation in igneous magmas, idem, 27, 1919, pp. 393—430; The reaction principle in petrogenesis, idem, 30, 1922, pp. 177—198.
- Symposium on the physical chemistry of igneous rock formation. „*Trans. Faraday Soc.*“ 20, pt. 3, 1925. Общее обсуждение вопроса, заключающее многочисленные и интересные статьи.
- ⁸ Может, естественно, возникнуть вопрос о том, где следует провести границу, так как многие такие расплавы окисей или сульфидов содержат примеси силикатов и обнаруживают переход. Многие геологи упоминают о кварцевых, магнетитовых или сульфидных магмах. Точное определение, быть может, и не так необходимо, все же лучше бы было сохранить термин „магма“ для расплавов, содержащих значительное количество силикатов, предположим 25%. Применение терминов „магма“ или „рудная магма“ к летучим компонентам и водным раствором казалось бы недовольственным. К термину „карбонатная магма“ автор относится недоверчиво, за исключением тех случаев, когда речь идет о местных продуктах ассимиляции.
- ⁹ A. E. Lagorio. „*Tsch. Min. u. Betr. Mitt.*“ 8, 1887, pp. 421—529.
- ¹⁰ C. W. Tyrrell. The principles of petrology. Chap. VIII.
- ¹¹ „*Am. Jour. Sci.*“, 4th, Stp., 39, 1915, p. 175.
- ¹² The Katmai magmatic province. „*Jour. Geol.*“ 34 Oct.—Nov., 1926.
- ¹³ C. N. Fenner. Op. cit., p. 756.
- ¹⁴ C. H. Smyth. Jr. The chemical composition of the alkaline rocks, etc. „*Am. Jour. Sci.*“, 4th ser. 36, 1913, pp. 33—40.
- A. C. Lane. Wet and dry differentiation. Tufts College 3, No. 1, 1910.
- ¹⁵ C. N. Fenner. Op. cit., p. 744.
- ¹⁶ H. H. Robinson. The San Franciscan volcanic field. Arizona „*Prof. Paper*“ 76, U. S. Geol. Survey, 1913.
- ¹⁷ S. H. Ball. „*Prof. Paper*“ 63, U. S. Geol. Survey, 1908, pp. 67—70.
- F. L. Ransome. „*Prof. Paper*“ 75, idem, 1911, pp. 60—62.
- ¹⁸ Материал по этому вопросу см. F. C. Lincoln. „*Econ. Geol.*“ 2, 1907, pp. 258—274.
- ¹⁹ A. Bergeat. Die Eolischen Inseln. „*Abhandl. d. k. bayer. Akad. d. Wiss.*“, 2 Cl., 20 Bd, I Abth., 1899, p. 193.
- Данные о Везувии см. E. Zambonini. Mineralogia Vesuviana, Naples, 1910.
- ²⁰ The fumarolic incrustations at Katmai. „*Nat. Geog. Soc.*“, I, No. 3, 1924.
- ²¹ E. T. Allen. Volcanic gases. „*Jour. Franklin Institute*“ 193, 1922, pp. 29—80.
- ²² Многочисленные анализы вулканических газов читатель найдет у F. W. Clarke. Geochemistry. „*Bull.*“ 770, U. S. Geological Survey, 1924, pp. 262—271. Интересный пример фумарол представляют соффионы Тосканы (Италия). Они выбрасывают пар, температура которого достигает 190°C, а давление от 2 до 4 ат. Этот пар содержит значительное количество борной кислоты, без сомнения, вулканического происхождения.
- ²³ P. Niggl. Versuch einer natürlichen Klassifikation. „*Anhandl. z. prakt. Geol.*“ Bd. 1, 1925, Halle, pp. 1—69.
- ²⁴ C. W. Morey. „*Jour. Geol.*“ 32, 1924, pp. 291—295.
- ²⁵ Symposium on the temperatures of hot springs, etc., „*Jour. Geol.*“ 32, 1924, Nos. 3, 4, 5 and 6.
- ²⁶ „*Econ. Geol.*“ 21, 1926, p. 207, et seq.
- ²⁷ Les variations de filons metallifères en profondeur. „*Rev. gen. des Sciences*“ 11, 1900, pp. 575—580.
- ²⁸ Notes on the principal lead bearing lodes of the West of England. „*Trans. Royal Geol. Soc. Cornwall.*“, XII, pt. 8, 1902, p. 713.
- ²⁹ Report on the Zeehan silver lead mining field. „*Bull. Tasmania Geol. Survey*“ 1904, p. 24.

³⁰ The ore magmas, 2, 1923, p. 611. A theory of ore deposition, „Econ. Geol.“ 2, 1907, pp. 781—785.

³¹ Primary downward changes in ore deposits, „Trans. Am. Inst. Min. Met. Eng.“ 70, 1924, p. 964—992; Relations of metalliferous lode systems to igneous intrusions, idem, 74, 1926, pp. 29—70. Полное описание местностей, в которых наблюдается зональное расположение.

³² The ore magmas, 2, 1923, pp. 588, 611 and 703.

³³ W. H. Emmons. Op. cit., 70, p. 983.

³⁴ См. R. C. Wells. Fractional precipitation of the ore forming compounds. „Bull.“ 609, U. S. Geol. Survey, 1915. См. также A. C. Spencer. The geology and ore deposits of Ely, Nevada. „Prof. Paper“ 96, idem, 1917.

³⁵ Op. cit., I, 1923, pp. 292—308.

³⁶ Horatio Brown. The mineral zones of the White Cross district (San Juan), Colorado School of Mines, Mag., 15, March, 1926.

³⁷ „Eng. Min. Jour. Press“, Dec. 19, 1925.

³⁸ „Econ. Geol.“ 9, 1914, pp. 559—592.

³⁹ „Econ. Geol.“ 11, 1916, pp. 37—41; S. W. Young and N. P. Moore. „Econ. Geol.“ 11, 1916, pp. 349—365.

⁴⁰ H. C. Boydell. The role of colloidal solutions, etc. „Trans. Inst. Min. and Met.“, London, 1924—1925, p. 184.

⁴¹ H. C. Boydell. Op. cit., p. 169.

⁴² „Econ. Geol.“.

НАРУШЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ¹

СКЛАДКИ

Толщи осадочных пород, вмещающих рудные месторождения, нередко более или менее сложно дислоцированы и смяты в складки. Образование складок обычно вызывается горизонтальным или «тангенциальным» и «боковым давлением», а более мелкие перегибы и моноклинали (рис. 11) могут быть вызваны давлением в любом направлении. В некоторых случаях складка или перегиб могут перейти в сброс. При сильной складчатости необходимо, чтобы в осадочном комплексе пласты были достаточно крепки («компетентны»), чтобы передавать давление и поддерживать структуру складок. При наличии пластичных пород весь комплекс окажется деформированным, в отдельных пластах проявится текучесть и правильных складок не образуется.

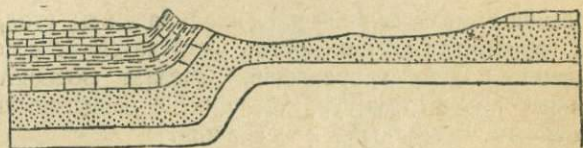


Рис. 11. Моноклиналъ близ Gallup, New Mexico (по E. Howell).

Складки бывают синклинальные (рис. 12 или 13) или антиклинальные (рис. 14), седловидные. Плоскость, разделяющая пополам средний



Рис. 12. Открытая синклиналь, где пласты каменноугольных фосфоритов несогласно перекрываются эоценовыми отложениями. Местность Beaver Creek, Utah (по E. Blackwilder).

угол между крыльями, называется осевой плоскостью складки. Под действием сложных боковых усилий осевая плоскость может превратиться в изогнутую поверхность. Если осевая плоскость вертикальна, крылья складки падают под одинаковыми углами; если же осевая плоскость наклонна, крылья имеют разное падение. При изоклиальной складчатости крылья имеют крутое падение (рис. 15). Когда осевая плоскость

сильно наклонна в одном направлении, образуются опрокинутые складки; под действием дальнейших боковых усилий эти складки могут легко перейти в надвиги (overthrust fault) (рис. 15—16), отчего одна часть складчатой свиты надвинется на другую. В плоских надвигах горизонтальный сдвиг может распространяться на несколько миль.

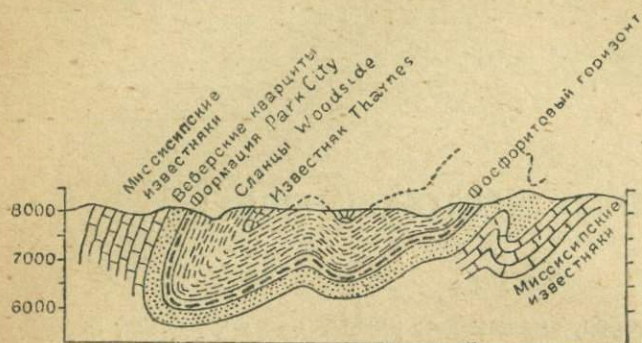


Рис. 13. Эродированная синклираль Georgetown Canyon Idaho (по Н. S. Gale).

Синклинали и антиклинали располагаются приблизительно перпендикулярно к направлению сдвигающего усилия. Их направление можно определить, проведя линию через все наиболее высокие и наиболее низкие пункты характерного горизонта. Линия гребня складки или желоба

обычно имеет ясно выраженное падение; угол, образуемый этой линией с горизонталью местности, называется «склоном» складки. Давление в двух направлениях создает складчатость с развитием деформированных структур, носящих, в зависимости от их формы, названия «челнока», «купола» или «чаши».

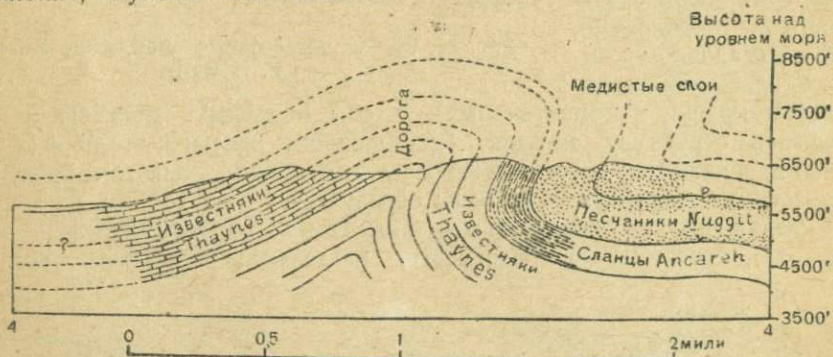


Рис. 14. Эродированная антиклираль Montpelier, Idaho; можно видеть загибы, образуемые меденосными пластами триаса (по Н. S. Gale).

Когда свита пород приподнята в виде купола так, что падение наблюдается во все стороны от одного общего центра, они образуют то, что называется *quadrifacial* — купола или брахиантиклинали, а залегание пород называется *переклиналим*. При сильной складчатости осадочного комплекса отдельные пласты утолщаются в точках наиболее сильного перегиба (рис. 17 в табл. I в конце книги). Более твердые и хрупкие пласты песчаника и известняка не выдерживают напряжения и ломаются, образуя разрывы; более пластичные глинистые отложения не разрываются, а деформируются. В таких местах пласты различной механической прочности могут надвигаться друг на друга и образовывать

открытые трещины, которые в дальнейшем могут оказаться выполненными, например, кварцем. Плотные кристаллические сланцы, деформированные на значительной глубине, где породы приобретают частичную текучесть, обнаруживают иногда весьма сложные формы волнистой складчатости, особенно отчетливо проявляемой жильными включениями этих

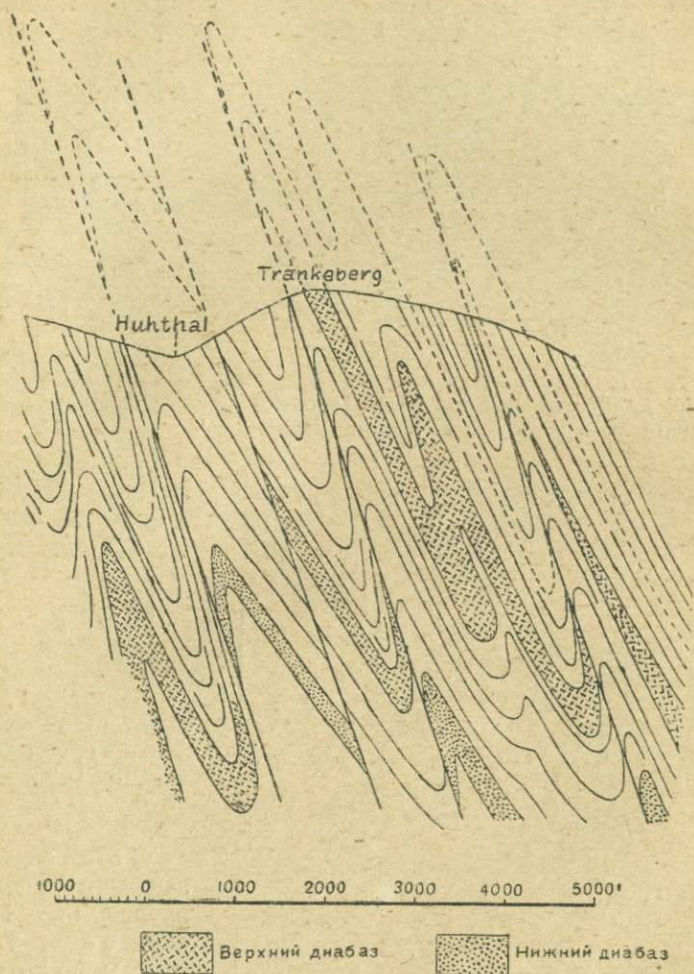


Рис. 15. Изоклиальная складчатость с надвигами и утолщением пластов на перегибах (по М. Koch).

пород. В Nova Scotia имеется несколько кварцевых жил, называемых «боченковидным кварцем», и образование этих жильных форм объясняют вышеописанными условиями.

СБРОСЫ

Толщи осадочных пород и того же происхождения месторождения так же, как и месторождения более позднего происхождения, которые

с заметным постоянством занимают в осадочной свите определенные горизонты, иногда внезапно обрезаются плоскостями структурных нарушений.

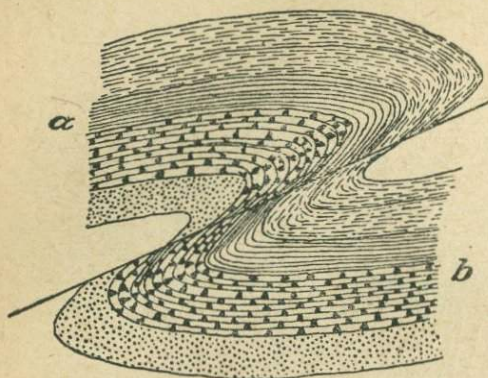


Рис. 16. Диаграмма, показывающая развитие надвига из складки (по С. R. Van Hise).

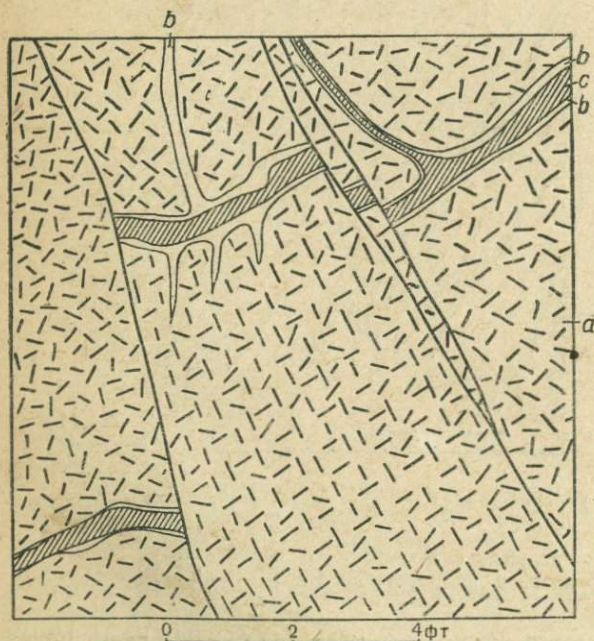


Рис. 19. Сбросы жилы-Mendota, Silver Plume, Colorado.

a—гранит; *b*—кварц; *c*—галенит с цинковой обманкой (по J. E. Spuff).

может быть вызван прекращением оруденения вследствие заполнения всей открытой до оруденения структуры. Замещение известняков галенитом или глинистого сланца пиритом (рис. 20) может внезапно приостановиться, дойдя до глинистой кровли замещаемой породы, непропускаю-



Рис. 18. Гнейс с волнистыми прожилками кварца (по С. R. Van Hise).

В этом случае можно заключить, что перерыв произошел вследствие «сброса», т. е. трещины, по которой имело место перемещение, и что где-то, по ту сторону трещины, залежь должна продолжаться (рис. 19).

Но это заключение иногда может оказаться ошибочным. Перерыв

шей растворы. Жильное выполнение трещины может внезапно оборваться или расщепиться на расстоянии нескольких футов, натолкнувшись на более мягкие и пластичные породы, например глинистые сланцы, глинистый мощный проводник или мягкие туфы. Жила, проходящая по формациям неодинаковой твердости, на контактах между породами часто внезапно отклоняется в сторону. Она может также отклониться,

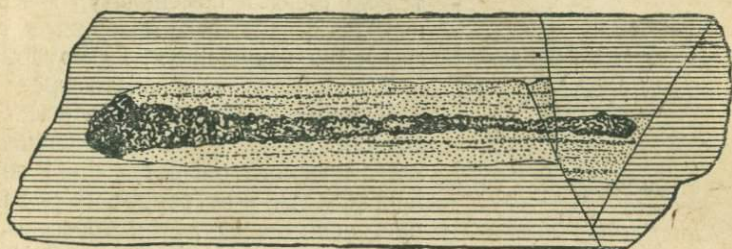


Рис. 20. Образец, показывающий замещение глинистого сланца пиритом. Натуральная величина. Мелкие трещинки образованы ранее пирита и пересекаются его полосчатыми структурами (по F. L. Ransome).

встретить на своем пути более старые дайки или трещины пустые или с жильным материалом (рис. 21).

Необходимо делать различие между сбросами и отклонениями. В каждом конкретном случае необходимо учитывать внешний вид жильных

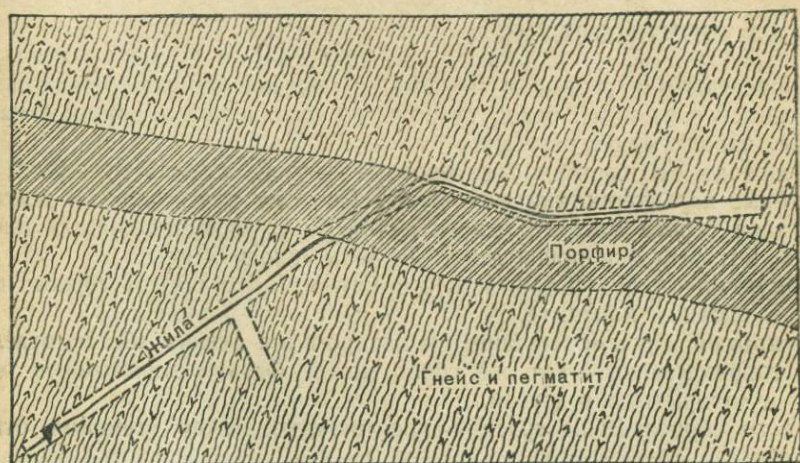


Рис. 21. План жилы в руднике Homer, Idaho Springs, Colorado, иллюстрирующий отклонение жилы, встретившей дайку (по J. E. Spurr).

обломков руды, обычно называемых «рудной брекчией» (drag), на плоскости сброса (рис. 22), направление шрамов и взаимоотношение между падением и простиранием сброса, трещины и рудного тела.

Для отыскания сброшенного рудного тела имеется много геометрических правил, но все они не имеют большой ценности, если не будет

известен характер нарушений. Каждый отдельный случай необходимо рассматривать и оценивать индивидуально.

Очень часто сбросы рассматривают в двух пониманиях — как нормальный «сброс» или же как «взброс», и то и другое в вертикальной плоскости. В действительности большинство сбросов имеют не только вертикальные, но и горизонтальные движения, характеризующие «сдвиг».

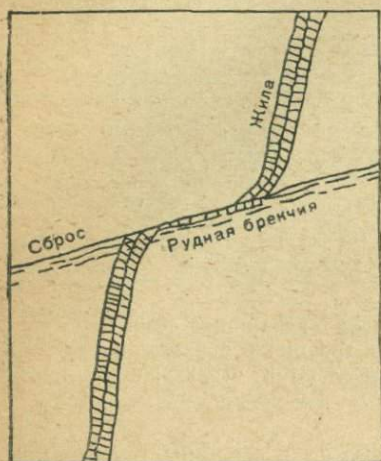


Рис. 22. Сброс с рудной брекчией.

Делалось много предложений относительно твердых номенклатур для различных элементов, участвующих в сбросо-сдвиговых нарушениях, из которых наилучшими следует признать предложения J. E. Spurr, C. F. Jolman, Jr. и H. F. Reid. Не так давно комиссии Американского геологического общества было поручено проработать этот вопрос, и ее заключения, основанием для которых в широкой степени послужил труд Reid, будут; вероятно, приняты американскими геологами. На нижеследующих страницах читатель найдет извлечение из его доклада³.

Измерения движения сброса производятся в самой плоскости сброса, в плоскости, нормальной к следу, оставленному сброшенным телом, на плоскости сброса, в любой нормальной и горизонтальной плоскостях.

ОБЩАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Сброс является разрывом (fracture) в породах земной коры, сопровождающимся смещением одной стороны по отношению к другой в направлении, параллельном разрыву.

Переходя от одной части сброса к другой, можно убедиться, что некоторые характеристики варьируют. Поэтому определения и описания характера сброса следует относить только к рассматриваемым частям сброса, которым они принадлежат, а не к сбросу в целом.

Закрытый сброс (closed fault), в котором две стенки сброса находятся в плотном контакте.

Открытый сброс (open fault), в котором две стенки сброса отделены и не соприкасаются. Тот же сброс может быть «закрытым» в одной части и «открытым» в другой.

Место сброса (fault space) — пространство между стенками открытого сброса.

Поверхность сброса (fault surface) — поверхность, вдоль которой имеет место нарушение; она же может быть названа плоскостью сброса (fault plane), если нет резко заметных изгибов.

Линия сброса (fault line) — пересечение поверхности сброса с поверхностью земли или с какой-либо условной поверхностью, как например «горизонт рудника».

Когда сброс слагается большим количеством плоскостей скольжения на ограниченном участке земной поверхности, этот участок поверхности

земли с приуроченными к нему мелкими сбросами называется зоной смятия (shear zone).

Сбросовая брекчия (fault breccia) — брекчия часто встречается в зоне смятия и более всего в случае надвигового сброса — в з б р о с а.

Жильная глина или примазка (gouge) — глиноподобный непроницаемый, иногда комковатый жильный материал, обычно смесь минералов боковых пород, который иногда присутствует вдоль стенок сброса.

Выскребки (horse) — масса раздробленной породы из одной стенки, захваченная между стенками сброса.

Простирание сброса (fault strike) — направление пересечения поверхности сброса или смятой зоны с горизонтальной плоскостью. Оно измеряется от магнитного или астрономического меридиана.

Падение сброса (fault dip) — вертикальный наклон поверхности сброса или зоны смятия, измеряемой от горизонтальной плоскости.

Отклонение сброса (hade) — отклонение сбросовой поверхности или «разрушенной зоны», измеряемой от вертикальной плоскости. Угол, дополнительный падению.

Висячий бок (hanging wall) — верхняя стенка сброса.

Лежачий бок (foot wall) — нижняя стенка сброса.

ГЛАВНЕЙШИЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ СБРОСОВ

Параллельно-смещенными (parallel displacement) сбросами являются те, в которых все прямые линии на противоположных сторонах сброса и вне дислоцированной зоны были параллельны до смещения и таковыми остались после смещения.

Повернутыми сбросами (rotatory faults) являются те, в которых некоторые прямые линии на противоположных сторонах сброса и вне дислоцированной зоны были параллельны до смещения и не сохранили параллельности после смещения, т. е. одна сторона претерпела поворот относительно другой.

Высота сброса (throw) определяется почти всегда лишь относительно и редко можно сказать, какая сторона у сброса двигалась. Поэтому термины «взброс» (upthrow), «сброс» (down throw), употребляемые в соответствии со стороной, от которой происходит наблюдение, являются спорными. Эти термины подходят для общего употребления и характеризуют только относительное, а не абсолютное смещение.

Сбросы параллельного смещения. Как бы ни были велики по длине сбросы, состоящие из простых параллельных смещений, они должны будут где-то кончиться, или «затухнуть». Естественно, что смещения будут далеко не однообразны по всему простиранию данного сброса и помимо скользящих смещений в отдельных частях будут иметь место «вращательные смещения», облегчаемые пластическими деформациями пород на отдельных участках. На отдельных ограниченных участках сброса, тем не менее, будут наблюдаться лишь простые параллельные смещения. Слово смещение (displacement) должно получить не техническое значение, а общее. Оно может быть приложено к относительному движению двух стенок сброса, измеряемому в любых направлениях. Например, смещение может быть измерено в штреке рудника между двумя частями пласта или свиты по направлению простирания штрека. Слово «дислокация» более удобно тоже в общем значении.

Имеются два метода определения смещения в сбросе: можно определить кажущееся относительное смещение пласта измерением расстояния между двумя разорванными частями в избранном направлении, например в стволе шахты, или измерить расстояние между линиями пересечения двух частей пласта с плоскостью сброса по нормали; можно определить действительное относительное смещение и его компоненты в важнейших направлениях. Обычно же измеряется кажущееся смещение. Действительное смещение может быть найдено после работы над пониманием природы и характера сброса в целом. Для обозначения различных смещений, вызванных сбросами, имеются всего четыре термина, к которым добавляются определения, представляющие компоненты перемещения, о котором идет речь. Эти обозначения следующие:

Скольжение (slip), означающее относительное смещение двух точек на противоположных сторонах сброса, раньше бывших смежными, измененное по поверхности сброса. Измерения относятся к простиранию и падению поверхности сброса.

Перемещение (shift), означающее относительное передвижение участков на противоположных сторонах сброса вне зоны дислокации. Определения относятся к простиранию и падению поверхности сброса; исключение представляет выражение «вертикальное перемещение», которое понятно само собой.

Высота (throw), что означает смещение безотносительно к простиранию или падению плоскости сброса.

Уступ (offset) означает наикратчайшее горизонтальное расстояние между двумя сброшенными частями дислоцированного пласта.

Если твердо помнить значение этих четырех обозначений, то при пользовании предлагаемой номенклатурой не создастся никакой путаницы.

В настоящее время для обозначения понятия об относительном перемещении нет общепринятого слова. Willis и Tolman пользуются термином «смещение» (displacement), Spurr — «высота сброса» (throw). Автор данного труда слово «смещение» употребляет только в общем смысле, а слово «высота» употребляет в совсем ином смысле. Слово «перемещение» (shift) ясно само по себе и не требует отдельного описательного термина.

В рудниках, где можно видеть самую поверхность сброса, обычно определяется *относительное скольжение*; в горном деле оно имеет первенствующее значение. При полевой съемке, где сброс исследуется по дислокации обнажения пласта или жил, часто в значительном отдалении от сброса, определяется *перемещение*. В разрешении больших геологических задач *перемещение* играет более значительную роль, чем *скольжение* (slip). Разница между *скольжением* и *перемещением* очень значительна; до настоящего времени в номенклатуре сбросов это не признавалось. Большую роль играет перпендикулярная высота сброса (throw). Часто определяется только эта высота, а также простирание (strike) сброса. Часто наиболее важным поверхностным измерением является измерение уступа.

Сбросы в слоистых породах. Для слоистых пород характер смещения пластов в результате сброса обуславливается соотношением простираня сброса с простиранием пластов. Обычно различают:

Сброс, согласный простиранию (strike fault), простирание которого параллельно простиранию слоистой свиты.

Сброс по падению (dip fault), простираение которого образует приблизительно прямой угол с простираением пласта.

Косой или диагональный (oblique fault), простираение которого направлено косо к простираению пласта.

Термины эти могут быть приложимы не только к слоистым породам, но могут применяться и по отношению к жилам изверженных пород, дайкам и т. д.

По отношению к общей структуре района можно рассматривать:

Продольный сброс (longitudinal fault), простираение которого параллельно общей структуре района.

Поперечный сброс (transverse fault), простираение которого направлено вкрест общей структуры района.

Скольжение (slip).

Это слово означает смещение, измеряемое по поверхности сброса.

Определения относятся к простираению и падению сброса.

Истинное скольжение (net slip) — это максимальное относительное перемещение боков сброса, измеряемое на поверхности сброса по линии движения; на рис. 23 и 24 оно изображается линией ab^4 .

Скольжение по простираению (strike slip) — компонент смещения, параллельный простираению сброса, или проекция истинного скольжения на горизонтальную линию в плоскости сброса; на рис. 23 и 24 оно изображается линией ac^5 .

Скольжение по падению (dip slip) — компонент смещения, параллельный линии падения сброса, или проекция «истинного скольжения» на линию в плоскости сброса, перпендикулярную к простираению сброса; на рис. 23 и 24 bc^6 линия bc .

Перемещение (shift)

Перемещение. Часто бывает, что сброс не имеет открытой поверхности скольжения, а состоит из серии небольших относительных перемещений на близко расположенных друг к другу поверхностях и в не-

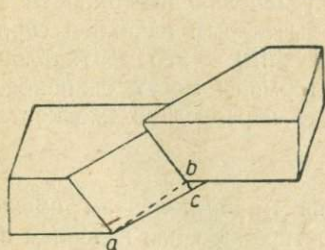


Рис. 23. Скольжение.

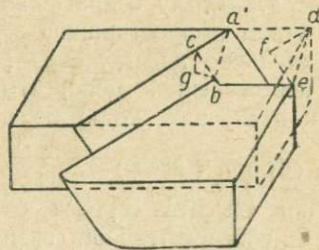


Рис. 24. Перемещение.

которых сбросах соседние с поверхностью сброса пласты повернуты так, что относительная передвижка масс пород на противоположных сторонах сброса может быть совсем иной, чем наблюдаемая величина скольжения, и даже непараллельна ему. Слово «перемещение» употребляется для выражения относительных перемещений массы пород, расположенных вне зоны дислокации; пояснительные определения относятся

к простирианию и падению сброса, за исключением одного случая, когда значение ясно и так.

Перемещение или *истинное перемещение* (net shift) — это максимальное относительное перемещение точек на противоположных сторонах сброса, достаточно от него удаленных, чтобы находиться вне зоны дислокации: de на рис. 24 и 25, где d есть положение точки до дислокации, а e после дислокации.

Перемещение по простирианию (strike shift) — это компонент перемещения, параллельный простирианию сброса, — df на рис. 24 и 25.

Перемещение по падению (dip shift) — это компонент перемещения, параллельный падению сброса, — fe на рис. 24 и 25, треугольник def параллелен поверхности сброса на рис. 24⁷.

Наклон и поворот толщи пород близ сброса могут быть столь значительны, что направление перемещения уже даже приблизительно не

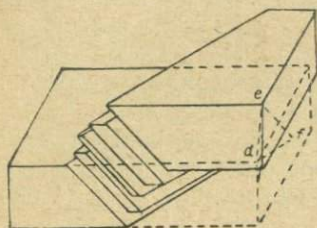


Рис. 25. Перемещение.

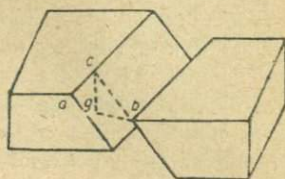


Рис. 26. Высота сброса.

будет параллельно поверхности сброса; поэтому для выражения компонентов перемещения лучше пользоваться следующими тремя терминами:

Перемещение по простирианию (strike shift) — это горизонтальный компонент перемещения, параллельный простирианию сброса (как уже сказано выше).

Нормальное перемещение (normal shift) — это горизонтальный компонент перемещения под прямым углом к простирианию сброса. Он равен *горизонтальному сокращению* или *удлинению* поверхности земли под прямым углом к простирианию сброса, вызванным наличием сброса.

Вертикальное перемещение (vertical shift) — это вертикальный компонент перемещения. Ясно, что эти термины могут одинаково применяться и в случаях, когда перемещение параллельно плоскости сброса.

Высота сброса (throw)

Термин «высота сброса» относится к компонентам смещения, не имеющим непосредственной связи с простирианием или падением плоскости сброса.

Высота скольжения (slip throw) — это вертикальный компонент скольжения — cg на рис. 24 и 26, de на рис. 27 и 28. Термин «высота сброса» (throw) употребляется в этом смысле почти всеми, кроме А. Geikie, который пользуется им для обозначения вертикального расстояния между двумя частями дислоцированного пласта; то, что Geikie называет высотой сброса, было бы на рис. 27 и 28 представлено df . Spurr пользуется термином «высота сброса» для обозначения расстояния между двумя частями дислоцированного пласта, измеренного по плоскости сброса.

Ширина сброса (heave, horizontal throw) — это горизонтальный компонент скольжения, измеряемый под прямым углом к простиранию сброса, — bg на рис. 24 и 25, eg на рис. 27 и 28. Этот термин употребляется в разных смыслах. J. Geikie, Willis, Scott и Fairchild пользуются им в указанном выше смысле, а A. Geikie и Surr — для обозначения того, что мы назвали «offset». Jukes-Brown, повидимому, употребляет этот термин вместо термина «скольжение по простиранию» (strike slip); то же самое делает и Ransome, говоря о «heave faults»; Scott употребляет его в том же смысле.

Разобшение (separation) пласта, дайки, жилы или любой другой отожествляемой поверхности есть расстояние между двумя частями (крыльями) разрыва пласта и пр., измеряемое в плоскости, перпендикулярной напластованию, или в заданной плоскости. Поэтому оно измеряется по вертикальной плоскости под прямым углом к простиранию разорванной поверхности⁹. Значение понятия «разобшения» пластов столь велико, что оно должно иметь собственную терминологию. **Стратиграфическое разобшение** (stratigraphic separation) — это расстояние между двумя частями разорванного пласта, измеренное под прямым углом к плоскости напластования, — ab на рис. 27 и 28. Обычно стратиграфическое разобшение определить легче всего; его можно определить по расстоянию между обнажениями двух частей одного и того же пласта, падению пласта и уклону местности.

Растяжение или провал (dip throw) — этот компонент скольжения измеряется параллельно падению пластов, — cb на рис. 27 и 28.

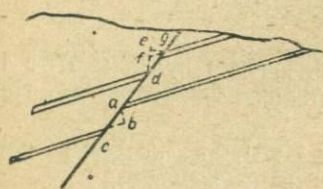


Рис. 27. Разрез нормального сброса.

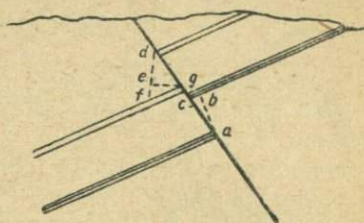


Рис. 28. Разрез взброса.

Сбросы (throw) могут быть определены как компоненты скольжения (slip). Там, где мы имеем дело с простым сбросом в плоскости наложения, перемещение (shift) будет то же, что и скольжение (slip), и термин «throw» — сброс — будет одинаково приложим к обоим.

Разобшение имеет значение лишь для слоистых пород. Там, где сбросы являются частью дислоцированной зоны, термин «разобшение» будет относиться к перемещению (shift), но окончательно лишит слово «сброс» (throw) его общепринятого значения мы не можем и применяем его для перемещения (shift) вообще.

Уступ (off set)

Это расстояние между двумя частями разорванной толщи слоистых пород, измеряемое под прямым углом к простиранию слоев пород и в горизонтальной плоскости¹⁰.

Если рис. 29 и 30 представляют вид в плане диагональных сбросов на уровне поверхности, то уступ (off set) пласта будет ab , а не ac ;

ас будет горизонтальным смещением пласта, параллельным простиранию сброса.

Классификация сбросов соответственно направлению движения

В зависимости от направления движения по плоскости сброса (по сбрасывателю) сбросы можно разбить на следующие три группы:

Сброс, направленный по падению (dip-slip fault), в котором истинное скольжение совпадает с падением поверхности сброса.

Сброс, направленный по простиранию (strike-slip fault), — сдвиг, в котором истинное скольжение приходится почти в направлении простирания сброса. Такие сбросы J. Geikie называет transcurrent faults или transverse faults, Jukes-Brown называет их heaves — широтными. Scott называет их горизонтальными сбросами (horizontal faults). Вертикальным называют сброс с падением под 90° (см. ниже); по аналогии горизонталь-

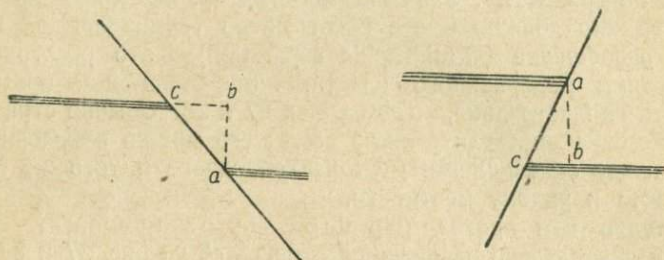


Рис. 29 и 30. План косого сброса.

ным должен называться сброс с падением, равным нулю, и этот термин не следует применять в отношении сброса, направленного по простиранию, т. е. сдвига.

Косо направленный сброс (oblique-slip-fault), в котором истинное скольжение приходится между крайними направлениями.

Виды сбросов по простиранию. Большинство геологических справочников и книг по полевой геологии уделяют много внимания сбросам, направленным по падению (dip slip), и редко описывают два других класса.

Сбросы, направленные по простиранию, — сдвиги, обычно рассматривают как являющиеся одновременно и сбросами и сдвигами и делят на:

Нормальные сбросы, в которых породы всяческого бока опущены по отношению к лежащему.

Обратные сбросы, или взбросы, в которых породы всяческого бока подняты по отношению к лежащему.

Вертикальные сбросы, в которых падение плоскости сброса равняется 90° .

Ввиду того что эти термины общеприняты, их рекомендуется сохранить, хотя в отдельных случаях они неприменимы.

Горизонтальное расстояние между двумя точками на противоположных сторонах сброса, измеряемое по линии, перпендикулярной к простиранию сброса, всегда сокращается в случае взброса и удлиняется в случае нормального сброса.

Применимость терминов «нормальный» и «обратный» к диагональным сбросам и сбросам по падению. Выражения *нормальный*

и обратный могут применяться в отношении диагональных сбросов и сбросов по падению даже в тех случаях, когда последние являются сбросами по простиранию, лишь при условии, чтобы кажущееся относительное перемещение двух крыльев нарушенного пласта или жилы рассматривалось в вертикальной плоскости и под прямым углом к про-

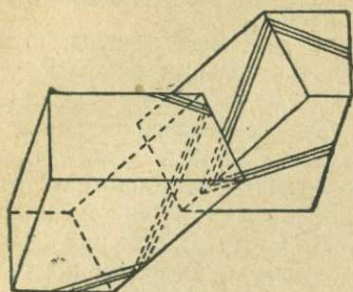


Рис. 31. Взброс, объясняющийся косым скольжением.

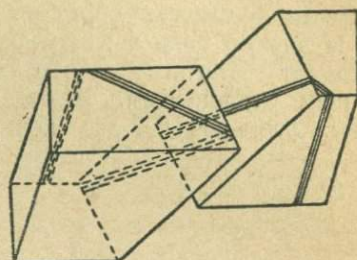


Рис. 32. Нормальный сброс, объясняющийся косым скольжением.

стиранию сброса. Это еще не значит, в случае диагонального сброса, что горизонтальная линия под прямым углом к простиранию сброса удлинится нормальным или сократится обратным сбросом. Об этом говорил Ransome¹¹ и иллюстрацию этого можно видеть на рис. 31 и 32. На рис. 31 обратный сброс, определяющийся направлением перемещения

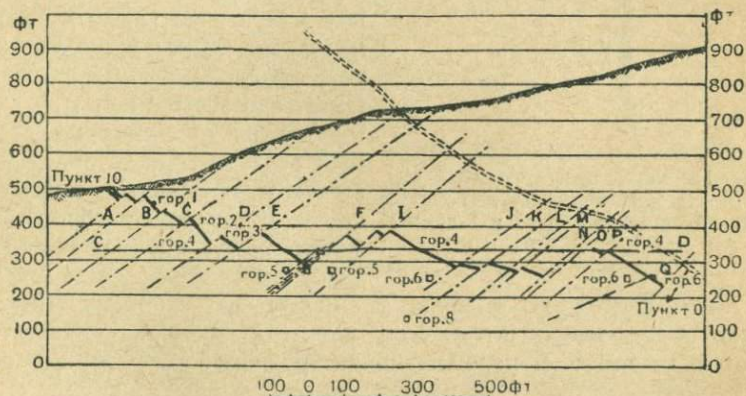


Рис. 33. Вертикальный разрез сброшенной жилы в руднике, Berlin, Nevada, показывающий также ее предполагаемое первоначальное положение (по E. Daggett).

пласта, вызвал удлинение под прямым углом к простиранию сброса. Ясно, что если бы всячий бок сдвинулся, как это показано на рис. 32, при падении пласта таким, как показано на рисунке, мы имели бы нормальный сброс и сокращение поверхности под прямым углом к простиранию сброса. Соотношение между двумя крыльями разорванного пласта на рис. 31 совершенно то же, как если бы мы имели обратный сброс по падению, а на рис. 32 как если бы мы имели нормальный сброс по падению. Если отсутствуют разорванные части дайки, пласта или другие признаки размера скольжения по простиранию, описанные выше

сдвиги нельзя будет отличить от простых сбросов по падению¹². Часто случается, что не представляется возможным определить что-либо, кроме видимого перемещения пласта, и термины «нормальный» и «обратный» сбросы должны употребляться лишь в качестве описательных, а не с целью обозначения удлинения или сокращения, растяжения или сжатия от вертикальных или горизонтальных усилий.

Особые классы сбросов. Имеется два вида сбросов, играющих весьма видную роль в изменении строения отдельных районов.

Надвиг (overthrust) — это обратный сброс с пологим падением или большим отклонением. В отдельных случаях надвиги достигают громадных размеров (до десятков километров). Scott называет их thrusts

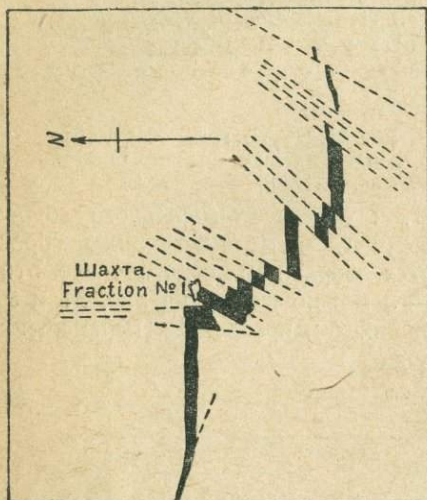


Рис. 34. Горизонтальный план, показывающий сброшенную жилу, Tonopah, Nevada. Масштаб 50 фут. в 1 дюйме (по J. E. Spurr).

и совершенно обособляет их от сбросов с высоким падением; но термин «thrust» употребляется для обыкновенных взбросов, имеющих крутое падение. Термин «надвиг» (overthrust) является для этого вида дислокации наиболее приемлемым. Он и должен быть сохранен.

Оруденение сбросов. Всякий сброс может превратиться в трещинную жилу путем выполнения и замещения. Однако, значительно оруденелые структурные сбросы нормальные или в виде надвигов встречаются не часто. Жилы чаще образуются в зонах разлома и зонах рассланцевания (shear and sheeted zones).

Сложность сбросовых дислокаций.

При ведении горных работ часто выявляются прекрасные примеры сложности образования сбросов. Можно видеть рядом «нормальные сбросы» и «взбросы». Сброс чаще образует не

одну или несколько трещин, а целую их систему. Перемещение обычно имеет место по каждой из этих трещин, результатом чего являются разрывы с перемещениями рудного тела внутри сбросовой зоны.

Случай сложной системы нормальных сбросов, наблюдаемой в жиле Berlin (Nevada)¹³, представлен на рис. 33. Кроме описанных сбросов, наблюдается целый ряд других дислокаций с горизонтальным перемещением. Месторождение представляет собою выполненную кварцевую жилу шириною от 2 до 3', содержащую 2% сульфидов с некоторым количеством золота и серебра.

В своем докладе, относящемся к району Tonopah (Nevada), Spurr¹⁴ описывает ряд затруднений, возникающих в том случае, когда сбросы образуют две пересекающихся системы. При такой структуре обрывки жилы располагаются зазагом, и их среднее движение определяется двумя компонентами. Результатом небольших повторных дислокаций является отклонение жилы (рис. 34).

Такие громадные «надвиги», какие наблюдаются в Альпах, могут

чрезвычайно сильно отразиться на непрерывности рудного месторождения на глубине. Группы месторождений, приуроченных к участкам развития дислокаций типа «надвигов», могут оказаться на глубине совершенно отрезанной¹⁵.

¹ E. De Margerie and A. Heim, Les dislocations de l'écorce terrestre. Zürich 1888, pp. 49—63.

Bailey Willis. The mechanics of Appalachian structure. „Thirteenth Ann. Rept.“, U. S. Geol. Survey, 1894, pp. 211—281.

C. R. Van Hise. Principles of North American pre-Cambrian geology. „Sixteenth Ann. Rep.“, U. S. Geol. Survey, pt. 1, 1896, pp. 589—633.

F. H. Lahee. Field Geology. 2d Ed. New York, 1923.

² E. De Margerie and Heim, Bailey Willis, C. R. Van Hise, op. cit.

J. E. Spurr. Geology applied to mining. New York, 2d Ed, 1926.

J. E. Spurr. Geology of the Tonopah mining district Nevada, „Prof. Paper“ 42, U. S. Geol. Survey, 1905, p. 144.

J. E. Spurr. Measurements of faults. „Jour. Geol.“ 5, 1927, p. 723.

J. E. Spurr. The relation of ore deposition to faulting. „Econ. Geol.“ 11, 1916, pp. 601—622.

F. L. Ransome. The direction of movement and the nomenclature of faults „Econ. Geol.“ I, 1906, p. 777.

C. F. Tolman, Jr., Graphic solution of fault problems. „Min. and Sci. Press“, June 17, 1911, et seq. Reprinted San Francisco and London, 1911.

C. F. Tolman, Jr., „Econ. Geol.“ 2, 1907, pp. 506—511.

H. F. Reid. Geometry of faults. „Bull., Geol. Soc. Am.“ 20, 1909, pp. 171—196.

H. F. Reid, W. M. Davis, A. C. Lawson and F. L. Ransome. Proposed nomenclature of faults. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 24, 1913.

C. K. Leith. Structural Geology. New York 1923.

F. H. Lahee. Field Geology. New York 1923, главы VII и VIII.

³ Reid, Davis, Lawson and Ransome, op. cit.

⁴ Spurr and Tolman называют „total displacement“.

⁵ Tolman называет „horizontal displacement“.

⁶ Tolman называет „normal displacement“.

⁷ На рис. 24 не показаны „dip shift“ и „strike shift“ ввиду того, что „net shift“ не параллелен плоскости сброса и линии *de*, *df* и *fe* не могут располагаться на одной плоскости. Но отношения ясны и рисунок иллюстрирует их довольно удовлетворительно.

⁸ Иногда называется „horizontal throw“.

⁹ Spurr называет это „перпендикулярным разобщением“ (perpendicular separation). При определенных условиях Tolman употребляет термин „перпендикулярный сброс“ (perpendicular throw), что будет соответствовать нашему понятию.

¹⁰ A. G. Geikie and Spurr пользуются термином „heave“.

¹¹ „Econ. Geol.“, 1905, pp. 783—787.

¹² Способы определения полного перемещения у сброса даются в статье Reid — „Geometry of faults“, „Bull. Geol. Soc. Am.“ 20, 1909, pp. 171—196, и у Tolman — „Graphic solution of fault problems“, op. cit.

¹³ Ellsworth Daggett. The extraordinary faulting at the Berlin mine. „Eng. Min. Jour.“, Mar. 30, 1907.

¹⁴ „Prof. Paper“ 42, U. S. Geol. Survey, 1905.

¹⁵ B. Granig. Ueber die Erzführung der Ostalpen. 1913.

ОТКРЫТЫЕ ПУСТОТЫ В ПОРОДАХ

Химические процессы и изменения могут протекать в породах при отсутствии каких-либо других путей, кроме пор и капиллярных или субкапиллярных пустот. Такие процессы будут, однако, скорее метаморфическими, а не метасоматическими. Следствием их бывает простое перераспределение минералогического состава при отсутствии значительного химического изменения; состав породы остается постоянным. Образование эпигенетических месторождений обычно требует значительного привноса материала растворами извне и эти растворы могут достигать места отложения лишь по открытым путям в виде трещин, отдельностей и разломов. В действительности, громадное большинство месторождений образовалось там, где путь проникновения растворов обусловливался существованием в породах не только пор, но и трещин. Проникнув до породы, эти растворы могут заполнить поры и капилляры и вызвать метасоматические изменения. О размере капиллярных, субкапиллярных пустот говорилось на стр. 33.

На последующих страницах будет говориться преимущественно о пустотах, размер которых превышает капиллярный. Такого рода пустоты обычно присутствуют в зонах разлома. Лишь немногие из месторождений полезных ископаемых образовались на глубине, значительно превышающей 15 000 футов. Однако, небольшие пустоты могут присутствовать в твердых породах на гораздо большей глубине (рис. 39). Это указывает на возможность проникновения в верхнюю зону разлома растворов из весьма значительных глубин.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПУСТОТ

Пустоты в породах могут возникнуть различными путями: 1) одновременно с процессом образования пород, 2) путем растворения, 3) при образовании трещин различного происхождения.

1. Во многих вулканических излияниях присутствуют многочисленные поры, образованные газами, или пустоты, образовавшиеся от расширения выделяющихся из магмы газов. В этих породах часто образуются скопления цеолитов и кальцита, иногда вместе с самородной медью; такие породы обычно называются «амигдалоидами», а выполненные пустоты «амигдолами» (рис. 35 в табл. II). Некоторые песчаники и конгломераты обладают большим объемом пористого пространства, в котором растворы могут отлагать руды или другие вещества.

2. Пустоты, образующиеся от растворения, обычно встречаются в легкорастворимых породах: в известняке, доломите, гипсе и соли. Росерпу совершенно правильно считает, что способность воды растворять совершенно достаточна для того, чтобы образовать в каменной соли длинные галереи, чему он и дает несколько примеров¹. Нередко отдельности в известняке расширяются растворением; если такие пустоты в дальнейшем выполняются рудами, их называют *рубцовыми жилами* (gash veins) или *трубчатыми жилами* (pipe veins). Пещеры в известняке также образуются под действием атмосферных вод верхней зоны циркуляции, содержащих растворенную двуокись углерода. Такие пещеры обычно образуются выше горизонта грунтовых вод в зоне окисления, хотя имеются примеры, указывающие на то, что такие процессы могут иметь место и ниже этого горизонта. Пещеры можно видеть в любой местности, сложенной из известняков; нередко они достигают громадных размеров. Коридоры пещеры Mammoth (Мамонта) в Кентукки тянутся на 40 миль; при образовании этой пещеры было удалено много миллионов куб. метров породы. Простираение пещер обычно обуславливается направлением сбросов и дислокации, и пустоты в породах в меньшей мере определяются преобладающими системами отдельности. Оседание поверхности образует столь характерные для многих известковых плато «провалы» (sink-holes). Пещеры и провалы играют некоторую роль в происхождении некоторых свинцово-цинковых месторождений, приуроченных к площади развития известняков; пещеры, образовавшиеся вследствие растворения в зоне окисления рудных месторождений среди известняков, часто служат вместилищем для большого разнообразия вторичных минералов. Почва пещер обычно покрыта красной «пещерной землей», являющейся остаточным отложением кремнезема, каолина, лимонита и пр., произошедшим из менее растворимых компонентов известняка. Иногда в пещерах находят отложения гуано (помет летучих мышей) и нитратов. Небольшие, образовавшиеся растворением, пещеры часто присутствуют в более стойких породах, подвергшихся действию горячих растворов, обладающих высокой способностью к растворению.

3. а) *Трещины сокращения—контракционные, вызванные охлаждением изверженных пород.* Остывание интрузивных тел ведет к уменьшению объема, благодаря чему образуются трещины и отдельности. Это лучше всего наблюдается в эффузивных породах, где мы часто видим правильное столбчатое строение и множество неправильных трещин. Не может быть сомнения, что по этим трещинам легко проходят металлоносные растворы. В литературе многие авторы присутствие в эффузивных породах трещинных жил объясняют сокращением, но обычно без достаточных обоснований. Усилия натяжения, вызываемые сокращением, обычно не могут вызвать образования длинных трещин с правильными простираением и падением.

Многие геологи считают, что более мелкие неправильной формы жилы и дайки или другие массивы интрузивных пород выполняют трещины сжатия. Такое объяснение дается горизонтальным оловоносным трещинам раскола в цинвальдском граните (Саксония) и многим другим подобным же «штоккерверкам» и так называемым «ступенчатым жилам», представляющим короткие поперечные трещины в дайках, обычно простирающиеся только от одного бока до другого. Хорошо известные

примеры этого рода из Telemarken (Норвегия)² описывает Fogte, из Victoria (Австралия) — Whitelaw³ и из Березовска (Урал)⁴ — Rose, Holm-hacher, Карпинский, Posepny и Purington. Однако, в некоторых местах поперечные трещины могут простираться за контакт в боковую породу или же соответствовать общей системе отдельности, что ставит под сомнение правильность этого объяснения (рис. 36).

б) Трещины сжатия, образованные уменьшением объема известняка при превращении его в доломит. Доломит нередко образуется близ некоторых месторождений металлов, и возможно, что, когда этот процесс производится быстро передвигающимися растворами и в относительно свободном пространстве, могут образоваться пустоты, в которых в дальнейшем будут отлагаться рудные минералы.

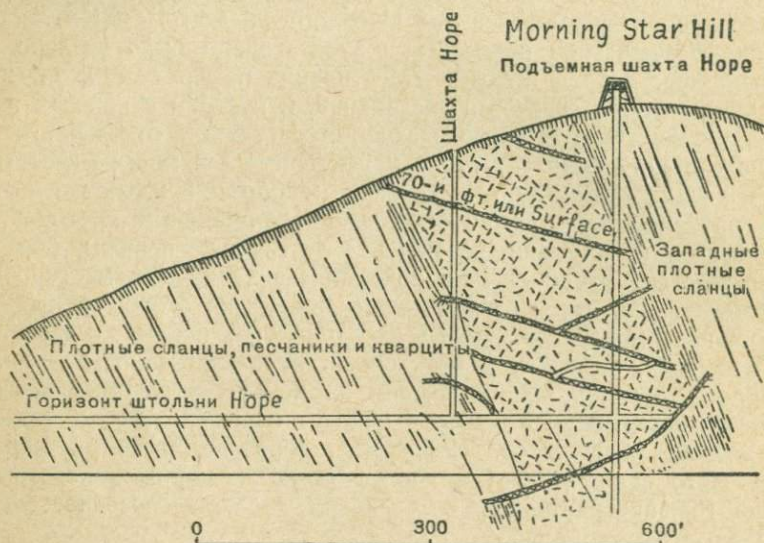


Рис. 36. Разрез дайки Morning Star, Woods Point, Victoria, показывающий ступенчатые жилы (по О. А. Whitelaw).

с) Трещины расширения, образующиеся при увеличении объема пород. Полагают, что перидотит, переходя близ поверхности и трещин в змеевик, весьма значительно увеличивается в объеме, и такой змеевик часто раскалывается на равные глыбы. Для всех трещин расширения характерна их неправильность и в процессах отложения руд они не играют большой роли.

д) Трещины скручивания. Знаменитый опыт Daubrée⁵, который он произвел, скручивая толстую стеклянную плиту, доказал, что скручивающие усилия могут образовать различные системы длинных радиально расходящихся трещин. Этот опыт часто приводится геологами в объяснение расходящихся систем жил, но Г. Ф. Веcker установил, что такие трещины не следуют по правильным плоскостям, подобно трещинным жилам, а сильно изогнуты и искривлены. Веcker⁶ рассматривает крутящие усилия как систему натяжений.

е) Трещины складчатости. Плоскости напластования осадков пред-

ставляют собою первичные структуры, часто служащие протоками для металлоносных растворов. Более удобный путь для этих растворов прокладывается, когда ряд разнородных осадочных пород образует складки, например песчаник плохо поддается изгибу и легко ломается на дужках антиклиналей и синклиналей, тогда как более мягкие глинистые сланцы изгибаются без разрыва; тот же самый процесс может вызвать скольжение между различными слоями. Такие изгибающие усилия могут легко вызвать образование пустот. Полагают, что выполнения кварцем так называемых «седловидных жил» в золотых рудниках Bendigo и других местностях Виктории были приурочены к пустотам, образовавшимся под действием изгибающих усилий; но они сопровождаются также неправильной формы массивами (masses) кварца, выполняющими пустотные ответвления в слоях поперек напластований (см. рис. 17 и 37).

f) Трещины зон разлома (shearing). Во многих нарушенных районах породы разломаны нормальными сбросами, вдоль которых различные глыбы установились на место под действием силы тяжести. Такие нормальные дислокации особенно характерны для местностей, в которых не наблюдается признаков мощных тангенциально направленных усилий. Нередко наблюдаются ступенчатые сбросы; сбросы часто сопровождаются бракчиями трения и раздавленными зонами; более или менее непрерывные открытые пространства представляют путь для циркулирующих вод; плоскости сбросов нередко длинные и правильной формы. Тем не менее, по таким сбросам редко залегают месторождения полезных ископаемых, кроме тех из них, происхождение которых поверхностное. Например, в Clifton (Аризона) сбросы весьма многочисленны, но месторождения меди в них отсутствуют; исключение представляет сброс Coronado. В Crede (Колорадо) серебряные жилы занимают большие сбросовые трещины, подобные же примеры мы видим в серебро-свинцовых жилах гор Гарца (Германия).

В вулканических местностях, например в Silverton и Cripple Creek (рис. 38) в Колорадо, богатые месторождения залегают в системе почти вертикальных трещинных жил. Совершенно очевидно, что они мало связаны с преобладающими структурными особенностями местности; дислокации обычно незначительны и жилы образовались вскоре после угасания вулканической деятельности. F. L. Ransome⁷ полагает, что эти системы трещин вызваны усилиями, являющимися следствием незначительного вертикального оседания, последующего за громадным перенесением

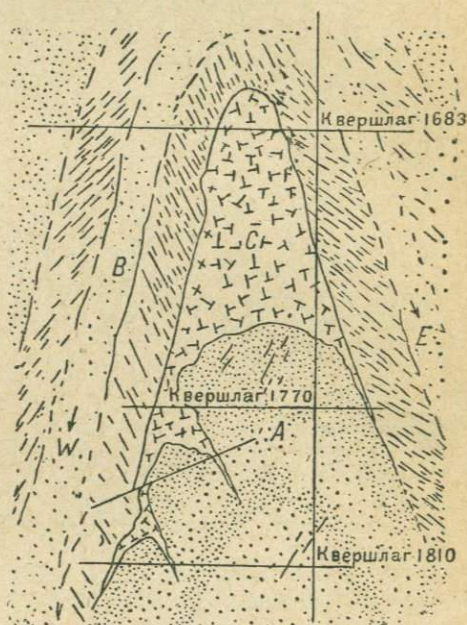


Рис. 37. Разрез через седловидную жилу Bendigo, Victoria.

А—песчаник; В—сланцеватый песчаник; С—золотосодержащий кварц (по Т. А. Rickard).

вулканического материала из интрателлургического положения в поверхностное. Вертикальные поднятия магм могли вызвать смещения, сопровождаемые образованием жил⁸.

Не так давно Locke⁹ привлек внимание к важной роли брекчирования, вызванного удалением опоры под влиянием растворяющегося действия растворов в течение ранних стадий оруденения, за которыми последовало отложение руд в брекчированной зоне. Он считает, что таково происхождение многих так называемых «трубчатых жил» (pipe veins), и приводит пример медных рудников Pílares, Sonora (рис. 38 А). В данном случае доказательством обрушения, «растрескивания» и брекчирования служат провисание в руднике андезит-латитового контакта. Месторождение имеет овальную форму, размером 1 000 × 2 000'; оно вскрыто на глубину 1 800'. Процесс аналогичен обрушению большого забоя или оседанию, последующему за сильным окислением сульфидных рудных месторождений.



Рис. 38. План главнейших жил района Stipple Creek, Colorado, иллюстрирующий их радиальное расположение.

G—гранит и гнейс, V—третичные эффузивные породы (по W. Lindgren и Ransome).

можно, объясняются структурой данной породы, в большинстве случаев они являются следствием сдавливающих усилий. Сближение системы трещин отдельностей представляют переходы к сланцеватому кливажу; кристаллизация минералов имеет место предпочтительно по этим плоскостям. В редких случаях развивается очень тонкая сланцеватость. Трещины отдельности и кливажа предоставляют узкий проток для минерализующих растворов и присутствие рудного месторождения часто определяется их направлением.

Существуют также переходы от трещин отдельности к трещинам, вдоль которых имеется заметное движение. Во многих местах трещины, в которых отложились руды, по простиранию и падению идентичны с системой трещин отдельностей в коренной породе. Часто наблюдаются две группы жил и трещин отдельностей с одинаковым простиранием и паде-

g) Трещины давления
В противоположность недавно застывшим лавам породы, находившиеся раньше на большой глубине и обнаженные эрозией, обычно имеют более или менее правильные системы трещин отдельностей, наблюдаемых на обширных участках. Хотя некоторые из этих систем трещин, воз-

можно, объясняются структурой данной породы, в большинстве случаев они являются следствием сдавливающих усилий. Сближение системы трещин отдельностей представляют переходы к сланцеватому кливажу; кристаллизация минералов имеет место предпочтительно по этим плоскостям. В редких случаях развивается очень тонкая сланцеватость. Трещины отдельности и кливажа предоставляют узкий проток для минерализующих растворов и присутствие рудного месторождения часто определяется их направлением.

нием в противоположном направлении (рис. 39). Такого рода системы носят название «сопряженной трещиноватости» (conjugated fractures). Объяснение образования таких трещин и иногда сопровождающей их сланцеватой структуры дают некоторые опыты, произведенные Daubrée¹⁰, а также математическое вычисление G. F. Becker¹¹. Из них вытекает, что сжатие приводит к возникновению двух систем трещин вдоль плоскости наибольшего сдвига; эти плоскости сдвига наклонены по направлению максимального усилия. Сопровождающими дислокациями будут преимущественно обратные сбросы («взбросы»), в которых висячий бок относительно сдвинется вверх. При опыте Daubrée на воске и канифоли образовались две сопряженные системы трещин, образуя с линией давления угол в 45°; испытания кубов строительного камня дали те же результаты. Если усилие действует не горизонтально, это соответственно отразится на падении жил. В Grass Valley (Калифорния) и во многих других местностях существуют две такие «сопряженные» системы выполненных рудой трещин.

В вышеупомянутом месте большинство дислокаций не велики, но тангенциальные усилия могут иногда вызвать и большие дислокации. Полагают, что калифорнийская Mother Lode, представляющая систему жил длиной почти в 100 миль, является «обратным сбросом» («взбросом») или системой сбросов значительной высоты.

Когда породы перекристаллизуются в относительно глубоких зонах земной коры, они могут приобрести столь высокую пластичность, что деформация с разрывом сплошности не может иметь места. В этом случае нарощение кристаллов, вероятно, происходит преимущественно по плоскости, перпендикулярной усилию, и может развиваться плотносланцеватая структура, подобная

структуре гнейсов, в которой почти полностью отсутствуют промежуточные пространства, по которым бы могли проникать растворы.

Если бы трещины были совершенными плоскостями, то трудно было бы представить, чтобы открытые пространства между ними могли обра-

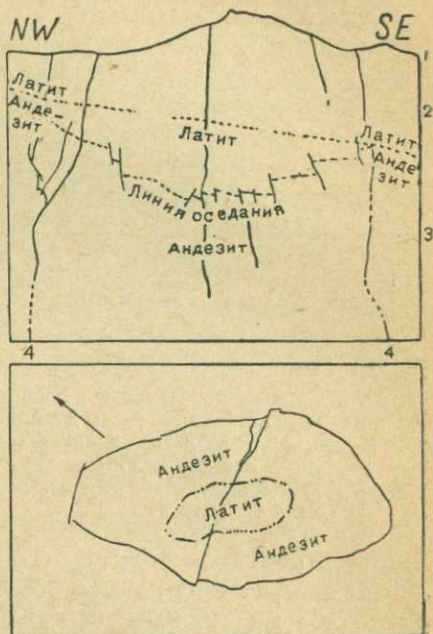


Рис. 38-А. План и разрез „Pilares pipe“ Sonora, Mexico.

1—поверхность; 2—латит; 3—андезит; 4—стенки „трубы“ (по А. Locke).



Рис. 39. Вертикальный разрез сопряженной системы трещин.

приобрести столь высокую пластичность, что деформация с разрывом сплошности не может иметь места. В этом случае нарощение кристаллов, вероятно, происходит преимущественно по плоскости, перпендикулярной усилию, и может развиваться плотносланцеватая структура, подобная

зоваться каким-либо другим путем, кроме как в результате растягивающих усилий, раздвигавших их стенки; но так как трещины не представляют собой таких совершенных

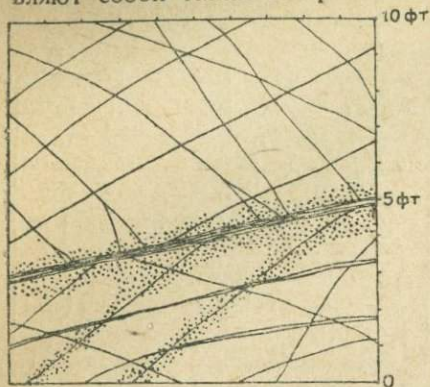


Рис. 40. Трещины отдельности, расположенные на расстоянии от 6 дюймов до 2 футов. При развитии трещин по трем взаимно пенесекающимся плоскостям — „глыбовая“ отдельность (по G. Harley).

гидростатического столба. магмы при условиях гораздо более сильного давления, могли даже проложить себе дорогу, как например изверженные дайки или пегматитовые жилы, иногда раздвигающие породу. Некоторые явления в связи с образованием жил трудно объяснить иначе.

Однако, для циркуляции раствора нет необходимости, чтобы трещины были очень широкие. Воды могут подниматься по многочисленным расположенным друг возле друга трещинам, обычно называемым зоной распластования (sheeted zone), с очень незначительными пустотами. Но в этом случае минерализация имеет место путем замещения. Растворы просачиваются в поры породы и замещают ее минералы.

Усилия, возникающие в массиве, сложенном разнородными породами, чрезвычайно сложны и, вероятно, можно установить лишь преобладающее направление образования

плоскостей, то происходящее по ним движение стремится создать целый ряд пустоток, чередующихся с многочисленными точками соприкосновения. В действительности, способ отложения минералов указывает на то, что открытые пространства существовали и что они нередко были значительного размера, достигая в отдельных случаях ширины 20' и даже более. В горных выработках в твердых породах старые забои часто остаются незаваленными в течение продолжительных периодов времени, и весьма вероятно, что такого рода большие открытые пространства идут иногда на глубину не менее нескольких тысяч футов. Помимо этого не следует забывать, что в период отложения трещины были заполнены водой под давлением, во всяком случае не меньшем, чем давление

Отлагающие растворы, выделяющиеся из более сильного давления, могли даже про-

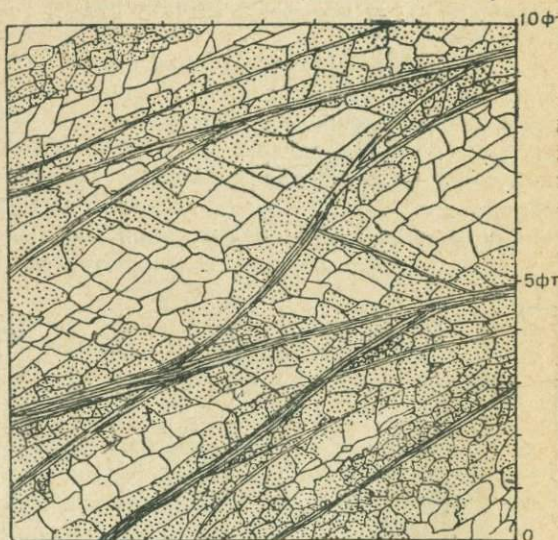


Рис. 41. Сильно перемятый участок с многочисленными трещинами, иллюстрирующими условия господствующей в трещинных жилах. Изменение породы распространяется от трещин (по G. T. Harley).

трещин. Очень трудно провести строгое различие между скручивающими и нескручивающими усилиями. Рис. 40 представляет обычные условия трещиноватости пород.

Сила кристаллизации. Выкристаллизовываясь из растворов, минералы оказывают некоторое давление на стенки трещин¹². Многие геологи считают, что эта сила достаточна для того, чтобы расширить пустоты по трещинам и, таким образом, дать место для скопления минералов. Однако, некоторые признаки в структуре и текстуре жил говорят не в пользу этой точки зрения, исключая те случаи, когда господствуют условия слабого давления, как это бывает близ поверхности или близ открытых пространств. Boydel указывает на то, что приложение этой силы кристаллизации должно быть ограниченным ввиду влияния, оказываемого на растворимость давлением; он считает, что эта сила не играет значительной роли в образовании жил. Некоторые любопытные явления, относящиеся к присутствию в жилах включений пород, могут объясняться действием этой силы, так как в трещинах, выполненных растворами, достаточно лишь относительно незначительного приложения силы, чтобы от стенок могли отделяться обломки.

¹ F. Posepny and others. Genesis of ore deposits. 1902, p. 20. Издание Am. Inst. Min. Eng., New York.

² Zur Klassifikation der Erzvorkommen. „Zeitschr. prakt. Geol.“ 1895, p. 149.

³ „Mem. Geol. Survey Victoria“ 3, 1905, p. 11.

⁴ Guide. Seventh int. Geol. Congress. 1897, p. 42.

F. Posepny. Archiv für prakt. Geol. 2, 1895, p. 499.

C. W. Purington. „Eng. and Min. Jour.“, June 13, 1903.

⁵ Etudes synthétiques de géologie expérimentale. Paris, 1879, p. 316.

⁶ The torsional theory of joints. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 24, 1894, pp. 130—138.

⁷ F. L. Ransome. „Bull.“ 182, U. S. Geol. Survey, 1901, p. 66.

⁸ J. E. Spurr. Relation of ore deposition to faulting. „Econ. Geol.“ 11, 1916, pp. 601—622.

⁹ A. Locke. The formation of certain ore bodies by mineralization stoping. „Econ. Geol.“ 21, 1926, pp. 431—453.

¹⁰ Etudes synthétiques de géologie expérimentale. Paris, 1879, p. 316.

¹¹ Finite homogeneous strain, etc. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 4, 1893, p. 13.

C. K. Leith. Structural Geology. New York 1923, pp. 13—62.

¹² G. F. Becker and A. L. Day. The linear force of growing crystals. „Proc. Washington Acad., Sci.“ 7, 1905, pp. 282—288.

S. Taber. Pressure phenomena accompanying the growth of crystals. „Proc., Nat. Acad. Sci.“ 3, 1917, pp. 297—302. „Am. Jour. Sci.“ 4th ser., 41, 1916, p. 535. The mechanics of vein formation. „Trans. Am. Inst. Min. Met. Engs.“ 61, 1920, pp. 1—36. The origin of veinlets in the Silurian and Devonian Strata of Central. New York. „Jour. Geol.“ 26, 1918, pp. 56—73.

N. C. Boydel. A discussion on metasomatism and the linear force of growing crystals. „Econ. Geol.“ 21, 1926 pp. 1—55. Discussion by S. Taber, idem pp. 717—727.

ФОРМА И СТРУКТУРА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Форма рудных месторождений всегда играет большую роль. Методы разведки и разработки, применяемые для штока неправильной формы, будут совершенно иными для пластовой жилы. Для значительного большинства рудных месторождений форма приблизительно плитчато-плоская вследствие того, что их образование приурочено к параллельным плоскостям дислокаций, плоско жильным дайкам или плоскостям напластования осадочных пород. В прежнее время в связи с вопросами эмпирической классификации и генетической интерпретации форме придавалось большое значение. В настоящее время замечается тенденция считать форму явлением в значительной степени случайным и уделять гораздо большее внимание ассоциации минералов. Весьма удобная, хотя и не строго генетическая, классификация делит месторождения минералов на сингенетические, образовавшиеся теми же процессами, как и боковые породы, и притом одновременно с последними, и эпигенетические, внесенные позже в данную геологическую среду.

Сингенетические месторождения. Сингенетические месторождения включают как класс магматические сегрегации, или рудные скопления, образовавшиеся в процессе дифференциации магмы обычно на значительной глубине. Их форма может быть совершенно неправильной или грубо сферической, но чаще она плито- или чечевицеобразная, с неровными очертаниями, вследствие постепенного перехода в окружающие породы. Месторождения магматической сегрегации залегают или полностью в изверженной породе или по ее периферии, образуя в некоторых случаях дайки и шлировые отпрыски. В последнем случае эти шлиры и отпрыски можно назвать эпигенетическими по отношению к вмещающим их породам. Ширина и мощность сингенетических месторождений варьирует от нескольких дюймов до нескольких футов; в отдельных случаях их длина превышает милю. Примером такого типа являются залежи хромита в перидотите или залежи титанистых железняков в анортозите.

К сингенетическим месторождениям также относятся осадочные образования. Обычно они имеют пластовидную или плосколинзовидную форму; при отсутствии нарушений они залегают горизонтально, но часто смяты в складки и нарушены. Параллельно напластованию они могут тянуться на целые мили, как например гематитовые руды Clinton области Appalachian, юрские железные руды (Франция) или неогеновые рудные слои Керченского полуострова. Тем не менее, каждый пласт обычно выклинивается. В месторождениях металлических руд мощность редко превышает 20', причем в рудной толще часто встречаются безрудные

пропластки. Каменноугольные пласты, в особенности пласты лигнита или бурого угля, могут достигать мощности 100' и даже более. Пласты каменной соли, ангидрита и гипса иногда достигают мощности нескольких сот футов. Во всех осадочных месторождениях складкообразования и дислокации могут создать обманчивое впечатление большой мощности. В таких пластических образованиях, как каменная соль, могут иметь место большие деформации.

Эпигенетические месторождения. Эпигенетические месторождения имеют весьма разнородные формы, но те из них, которые выполняют трещины, т. е. так называемые трещинные жилы, обычно имеют пластовобразную или пластовидную форму. Месторождения, сконцентрировавшиеся в зоне выветривания, часто имеют чрезвычайно неправильную форму и весьма ограниченное простираание и многие из них располагаются

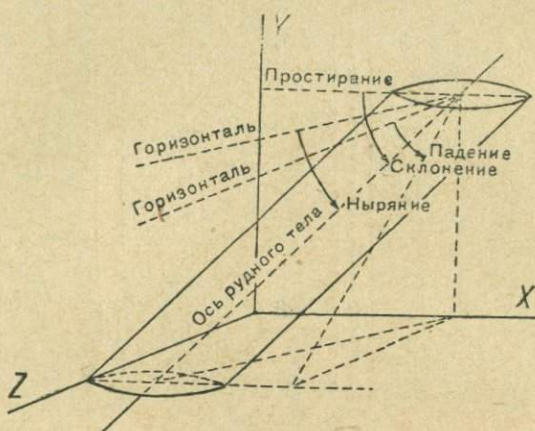


Рис. 42. Стереодиаграмма, иллюстрирующая *простираание, падение, склонение и ныряние* рудного тела.

по соседству. Некоторые гематитовые руды, подобно рудам района Maunag на острове Куба, образовавшиеся путем выветривания змеевика, могут образовать близ поверхности залежи значительного масштаба.

Месторождения замещения в известняке имеют чрезвычайно неправильную форму, хотя последняя в целом обуславливается плоскостями напластования, трещиноватостью или контактом с другими породами. Такие месторождения редко достигают больших размеров, но в отдельных случаях, примером которых служат месторождения галенита в юго-восточном Миссури или месторождения цинкового блеска в районе Joplin того же штата, их можно проследить по общему горизонту на протяжении нескольких миль.

Рудные месторождения в метаморфических породах, в которых имели место сильные механические деформации и химические изменения, обычно принимают форму чечевиц, и для них особенно характерно последовательное налегание чечевиц друг на друга. В таких месторождениях обычно наблюдается крутое падение, но общее протяжение рудного тела в плоскости его простираания обычно не следует направлению падения.

Определения. *Простираание (strike)* плитообразных или чечевице-

образных по форме месторождений соответствует направлению горизонтальной линии в плоскости месторождения, измеряемой по отношению к меридиану.

Падение (dip) измеряется по вертикальному углу, образуемому горизонтальной плоскостью с плоскостью по простирацию месторождения. В дополнение к падению следует упомянуть «отклонение» (hade или underlie), измеряемое по углу, образуемому вертикально и плоскостью простирания.

Ныряние (plunge) ¹ (рис. 42) рудного тела есть вертикальный угол, образуемый между продольной осью и горизонтальной линией в плоскости максимального растяжения тела. В чечевицеобразных рудных телах, залегающих в метаморфических породах, в которых имела место силь-

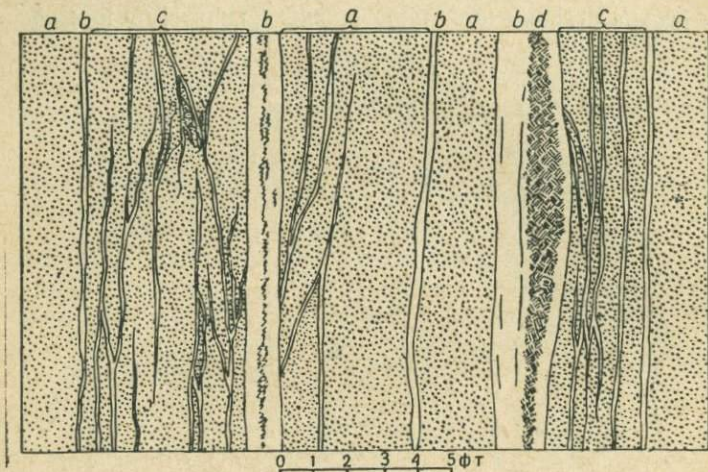


Рис. 43. Разрез жильной зоны Silver Crown, Silverton Colorado, показывающий ее структурные особенности.

a—андрезит; *b*—кварц; *c*—андезит с прожилками кварца; *d*—руда (по F. L. Ransome).

ная механическая деформация, «ныряние» является наиважнейшим фактором: оно часто определяется по направлению кливажа или сланцеватости. В трещинных жилах имеется «склонение» (pitch) рудного столба, обычно определяемое как угол между его осью и линией простирания жилы, отнесенный к плоскости жилы (стр. 166).

ОСОБЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЖИЛ

Жилы представляют собою плитообразные или пластовидные скопления рудных минералов, развитые по трещине или ряду трещин в коренных породах. Они образуются позже, чем коренные породы и трещины, путем выполнения пустого пространства или же путем частичного или полного замещения боковых пород, чаще же сочетанием того и другого процессов.

Такое изменение, или замещение, обычно не распространяется далеко от трещин. В местностях, где жилоотлагающие растворы действовали особенно интенсивно, частичное изменение может наблюдаться в коренной породе на значительном расстоянии от месторождения.

Между жилами выполнения и жилами замещения нельзя провести строгого разграничения. При наличии пустот растворы металлоносные в большинстве случаев легче отлагают несомый ими груз в этих пустотах, чем замещают коренные породы. Кварц, так же как и тяжелые металлы, легче отлагается в пустых пространствах, за исключением тех случаев, когда боковые породы особенно легко поддаются замещению, как например известняк.

Газы CO_2 и сероводород легко проникают в боковые породы.

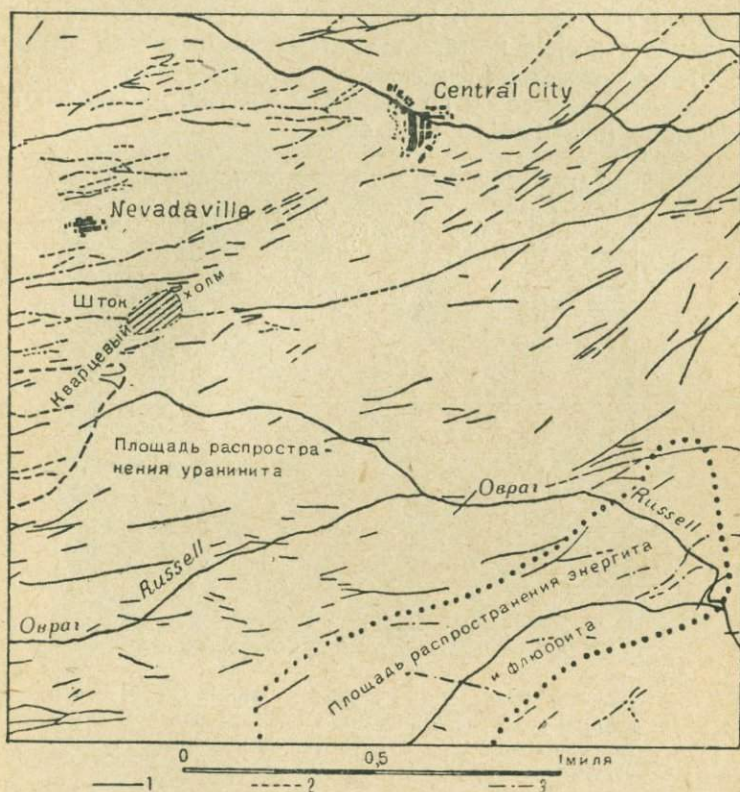


Рис. 44. Колчеданные руды: галенит; — сфалеритовая руда; — комплексные руды. Жильная карта Central City, Colorado и окрестностей (по E. S. Bastin).

Большое число жил отвечает старому названию «истинная трещинная жила» (true fissure vein); в них руда выполняет пространства вдоль трещин, когда-то бывших открытыми, причем некоторая степень изменения наблюдается и в боковых породах. Такой характер имеют большинство золотоносных кварцевых жил Калифорнии и других провинций. Когда трещины мелкие, в них образуются прожилки и проводники со всевозможными переходами до слабой минерализации трещин отдельностей. Стенки жил могут быть сглаженными и отделяться от жильного материала глинистой примазкой (clay gouge); в других случаях жильные выполнения плотно прилегают к боковым породам стенок. В этом случае говорят, что жила «приморожена к стенкам» (frozen to the walls).

Вместо одной трещины иногда наблюдается ряд многочисленных параллельных трещинок, кое-где соединяющихся между собою при значительном между ними расстоянии, достигающем иногда 100' и более. Такие большие *зоны разлома* (tracture zones), выполненные рудой и частично замещенной коренной породой, носят название «*сложных жил*» (composite veine или composite lodes) (рис. 43). Примером служит жила Comstock (Невада), местами ее ширина достигает нескольких сот футов. В такого рода сложных жилах нередко имеются две системы трещин, пересекающихся под острым углом, как это можно видеть на рис. 43. Иногда такое строение называют «*гамачным*» (hammock structure). Ряд близко расположенных параллельных жил называют системой жил. Если они соединены между собой по диагонали жилами, их называют «*связанными жилами*» (linked veins) (рис. 44).

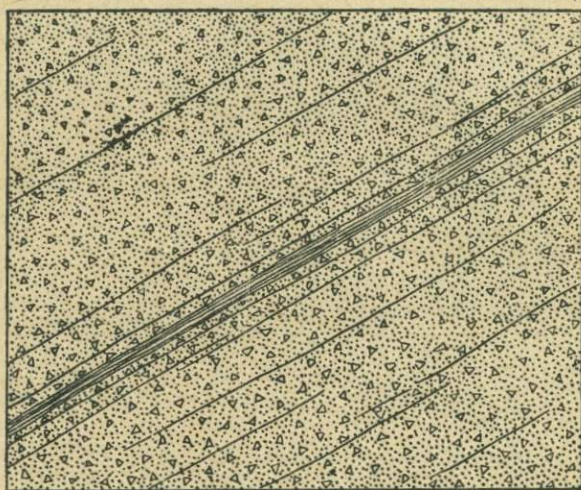


Рис. 45. Разрез жилы Howard, Cripple Creek, Colorado, в зоне рассланцевания. Руда располагается по направлению максимальной рассланцованности. Масштаб — в 1 дюйме 13 фут. (по Lindgren и Ransome).

Ряд близко расположенных параллельных жил называют системой жил. Если они соединены между собой по диагонали жилами, их называют «*связанными жилами*» (linked veins) (рис. 44).

Когда трещины тесно и параллельно расположены, мы говорим о *зоне рассланцевания* или *расслоения* (sheeted zone) или о *зоне смятия* (shear zone) (рис. 45). Примером могут служить многие из жил Cripple Creek. Ширина рассланцеваний и оруденелой зоны редко превышает 50 футов, обычно меньше.

Минерализация вдоль неправильных, коротких, различного направления трещин образует штокверк (stockwork). Эта форма свойственна некоторым золото-кварцевым месторождениям; система нескольких пересекающихся тонких трещин часто выполняется золотоносными прожилками кварца. И в этом случае весь массив с приуроченной к нему минерализацией тонких трещин может быть вынут при горной добыче в виде низкосортных руд. В районах, где процессы выветривания раз-

виты довольно глубоко, верхняя часть таких месторождений может быть достаточно рыхлой для применения разработки гидравлическим способом. В Калифорнии такие рудники носят название «seamdiggings».

Разбитая зона (shattered zone), сцементированная сетью небольших прерывающихся прожилков, называется «stringer lead» или «stringer lode».

Нередко рудные месторождения представляют собой брекчированные массивы чрезвычайно неправильной формы, причем руда выполняет пространства между обломками. С другой стороны, брекчия может быть локализована на пересечении двух трещин, и образуется трубчатое рудное тело, причем руда цементирует между собой обломки. Отложение руды может иметь место в вулканической трещине, выполненной выброшен-

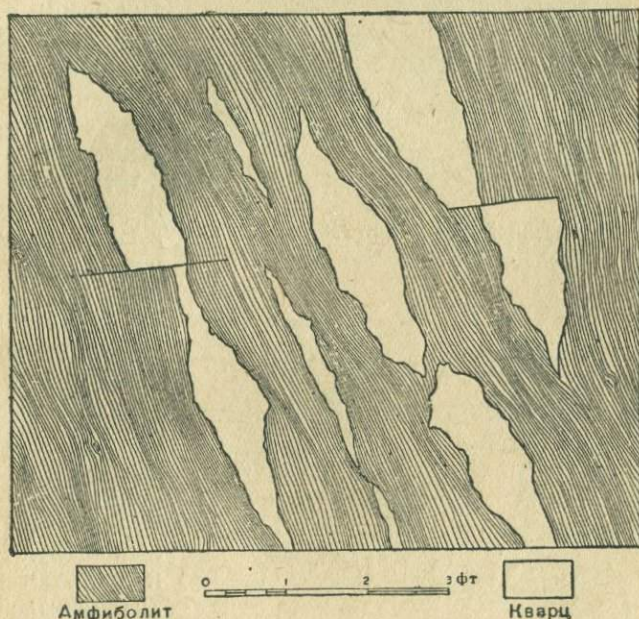


Рис. 46. Вертикальный разрез кварцевой жилы Schlegelmilch, Южн. Каролина), с чечевицеобразной структурой жилы в сланце с уступами по плоскостям отдельности.

ными вулканом обломками породы. Такой характер имело знаменитое месторождение Bassick в районе Custer (Колорадо).

Брекчирование, раздробление и оруденение часто происходят по линиям ослабления вдоль даек. В этих случаях, примером которых являются рудники Douglas Island в южной Аляске, где диоритовая дайка внедряется в метаморфические глинистые сланцы, оруденелую дайку часто называют «жильной залежью» (lode).

Ступенчатые жилы (ladder veins) представляют собою выполнение коротких поперечных трещин, встречающихся иногда в дайках интрузивных пород (см. рис. 36).

Чечевицеобразные жилы (lenticular veins (рис. 46) встречаются почти исключительно в метаморфических сланцах; их форма нередко объясняется деформацией более старого месторождения. Кроме того, чечевице-

образная форма может получиться под действием усилий, вызывающих выпучивание сланцевых слоев. Например, очень часто можно встретить многочисленные короткие линзы золотоносного кварца, разбросанные вдоль определенной зоны. Их концы иногда находят друг на друга.

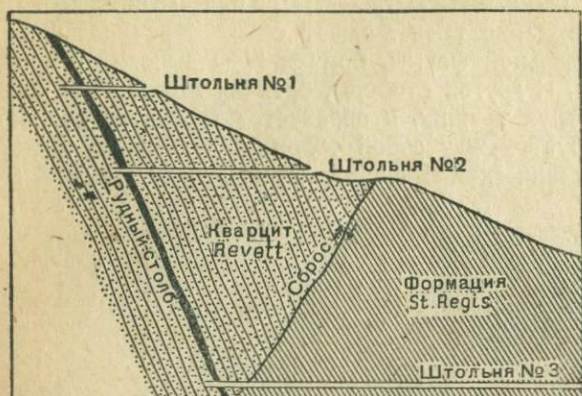


Рис. 47. Разрез пластовой жилы Snowstorm, Idaho (по F. Ransome).

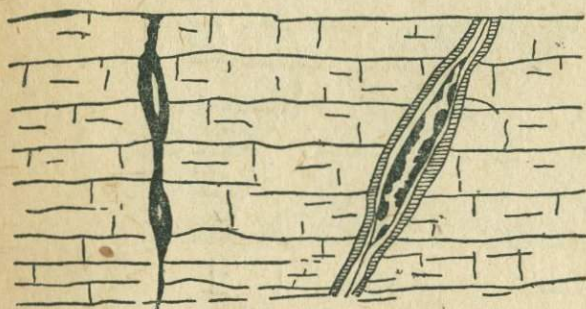


Рис. 48. Вертикальный разрез *рубцовой жилы* выполненной галенитом (черный цвет) или пиритом, цинковой обманкой и галенитом в порядке их отложения. В центре грузовые пустоты. Свинцовые рудники штата Wisconsin (по T. Chamberlin).

тенденция скапливаться в так называемые системы жил (рис. 38 и 44). В некоторых местах можно видеть несколько пересекающихся систем жил, чрезвычайно сложных и различных по возрасту и характеру оруденения.

Примером служит обширный район залегания медных руд в Butte (Монтана), представленный в поперечном и продольном разрезах на рис. 49 и 50³. Особого рода расходящиеся трещины, как в руднике Leopard, образуют структуру, называемую иногда «структурой конского хвоста» (horsetail structure). Помимо этого жилы в Butte во многих местах обрываются более поздними по времени образования сбросами.

Пластовые жилы (bed veins) следуют плоскостям напластования в осадочных породах (рис. 47).

Рубцовые жилы (gash veins) представляют собой выполнения коротких прерывающихся трещин. Они особенно характерны для месторождений свинца и цинка в известняках. Их происхождение связывается с трещинами расширения и растворения с последующей аккумуляцией в них рудных минералов (рис. 48).

Там, где мягкие осадочные породы смяты в складки и раздроблены, чаще образуются неправильные открытые пустоты, чем ясно выраженные прямые трещины. В таких породах отложение руд приурочено к пустотам и трещинам антиклиналей и синклиналей или к трещинам неправильной формы, секущим складки.

Жилы редко встречаются в одиночном виде, наоборот, замечается

Отношение жил к вмещающим породам. Жилы, пересекающие осадочные слоистые породы, называются секущими (cross vein), идущие параллельно слоистости или сланцеватости часто называются пластовыми (bedded или bed veins). Форма, которую принимают жилы, в весьма зна-

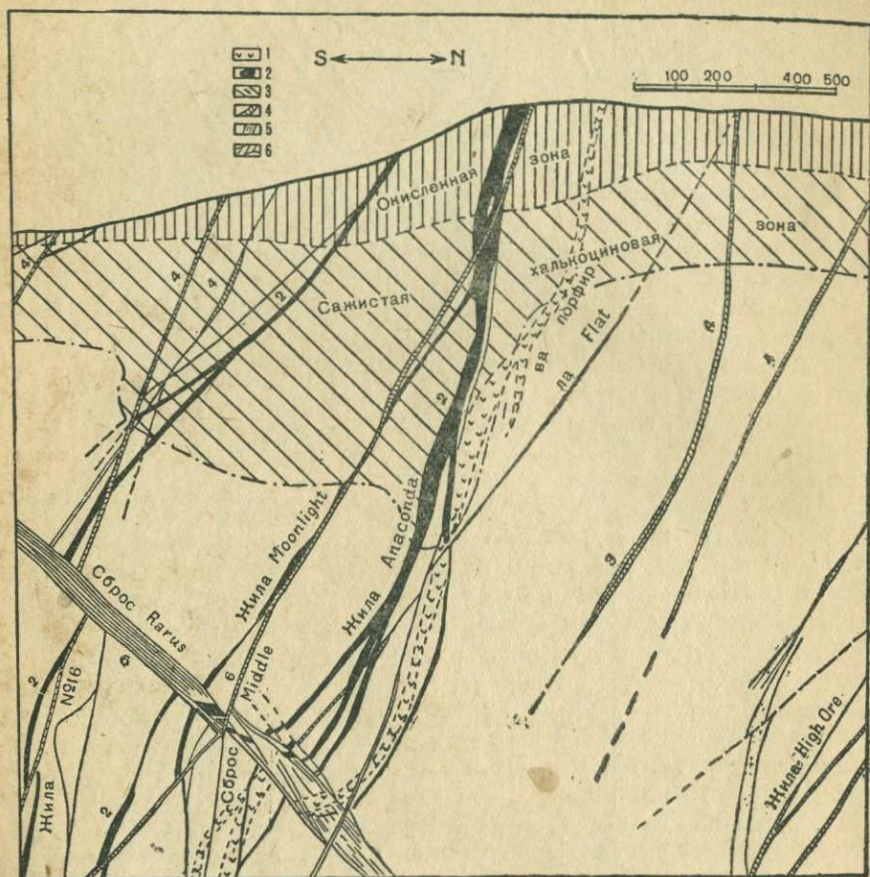


Рис. 50. Разрез с севера на юг через район Butte, вскрывающий структуру рудных зон (по Reno Sales).

1—дайки кварц-порфира; 2—система жил Анаконда; 3—система сброса Блу Вейн; 4—система жилы Стьюард (сброс); 5—сброс Рарус; 6—сброс Миддл.

чительной степени обуславливается различием структуры и твердостью вмещающих жильную трещину пород. В пересеченных жилой крепких дайках оруденение нередко разбивается на мелкие жилки и только за пределами этого, своего рода барьера вновь возвращается к характерной для него жильной форме. В трещинах, образовавшихся при незначительном давлении близ поверхности, наблюдается тенденция к образованию неправильных жильных форм и брекчированию, особенно со стороны висячего бока. Такого рода жилы D. F. Becker предлагает

назвать камерными (chambered veins). В жилах с крутым падением наблюдается также оседание висячего бока, сопровождаемое развитием более мелких вертикальных трещин. Такие условия наблюдаются, например, в жиле Comstock (Невада) и в рудниках El Ogo в Мексике; как здесь, так и там жилы с вертикальным висячим боком были исключительно богатыми. Крупные обломки боковых пород, включенные в жильный материал, носят название «horses». Нередко жила следует по трещине вдоль боков дайки и для отложения руд особенно благоприятны лампрофировые дайки, представляющие собою последние фазы батолитовых интрузий.

Глинистые и мягкие породы не благоприятствуют развитию правильных трещин и при встрече с таким материалом прорезающая твердые породы жильная трещина внезапно обрывается. Переходя в глинистые сланцы или в зальбанд, многие жилы немедленно суживаются. Наилучшим примером служат жилы Rico (Колорадо), которые здесь не тянутся по всей осадочной свите, а внезапно обрываются среди свит пластичных пород, называемых blanket, под которыми залегают почти все рудные тела.

Во многих местностях богатые руды залегают непосредственно под определенными горизонтами глинистого сланца (рис. 73). В южной части Новой Мексики роль «показателя» играет непрерывный девонский глинистый сланец. На этом горизонте рудоносные растворы встретили преграду и близ нее отложили растворенные рудные минералы.

Когда жила следует по контакту между двумя формациями пород, например гранитом и андезитом, она называется «контактовой» (contact vein). Контакт обычно образуется вследствие движений по сбросовой трещине в плоскости трещины, и такие жилы ничем не отличаются от обыкновенных выполнений трещин. Их никак нельзя смешивать с месторождениями контактово-метаморфическими, относящимися к отдельному классу.

Бока жилы (vein walls). В простой жиле типа выполнения трещин висячий и лежачий бока ясно выражены и часто представляют гладкие поверхности, являющиеся отдельной трещиной, образованной незначительным или сильным перемещением по ее слегка искривленной поверхности. В жиле замещения трещины относительно узкие и в большинстве случаев образовались под действием значительных сжимающих усилий, сузивших открытые пространства до минимума. Рудоносные растворы проникли под давлением в боковые породы, и руды, образовавшиеся замещением, обычно постепенно переходят в незамещенные коренные породы. В этих случаях имеется одна плоскость трещины с рудой по обе ее стороны без заметного резкого контакта с боковыми породами. Контуры рудных тел можно определить только в процессе опробования, поэтому они иногда называются боками опробования (assay walls).

В сложной жиле или рассланцованной зоне может быть несколько притертых жильных боков и, если не прокладывают кваршлагов, то параллельные рудные тела, отделенные от вскрытого боковыми породами, могут остаться незамеченными.

Обнажение рудных тел. Характер выхода жил или вообще всякого месторождения на дневную поверхность определяется по преобладающим минералам и господствующим поверхностным условиям выветрива-

ния. В местностях продолжительного континентального выветривания пород и медленных эрозионных процессов, как например в Южных Аппалачах (Appalachian States), даже весьма стойкие обнажения могут оказаться разрушенными выветриванием, и на поверхности можно будет видеть лишь разбросанные по обширной площади обломки.

При относительно деятельной эрозии жилы, в которых преобладает кварц, остаются нетронутыми и их легко проследить. Жилы с преобладанием карбонатowych жильных минералов, наоборот, выветриваются быстрее, чем вмещающие их породы, и наличие месторождения можно определить по небольшим *вдавленностям* или *бороздам на краях*. Где развиты сульфидные образования, их окисление резко проявляется на поверхностных выходах. Так, в месторождениях кварца с сульфидами резко выделяются обнажения *лимонита* и *остаточного* кварца, называемые «*железной шляпой*».

Подробности относительно выветривания рудных месторождений читатель найдет в главе IV, вып. II.

Длина жил по простиранию и падению. В местах, где жилы следуют по зонам больших дислокаций, их длина может быть весьма значительной. Одна из относительно молодых вскрытых жил в Freiberg (Саксония), называемая Halsbrücker Spat, прослежена на расстоянии почти 8 км. Некоторые из свинцовых жил в горах Гарца (Германия) тянутся на 19 км. Исключительно длинные *одиночные* выполненные рудой трещины можно видеть в квадрате Silverton, район San Juan в Колорадо; некоторые из них тянутся на 5 миль. Некоторые из жил Mother Lode (Калифорния) могут быть прослежены на много миль. Кажется, самой длинной отдельной кварцевой жилой считается жила в Pfall (в Bavarian Forest), которую, по имеющимся сведениям, можно проследить по прямой линии и почти непрерывно на расстояние 140 км (в докембрийских породах) ⁴.

О присутствии в кварце металлов сведений не имеется.

Громадное большинство рудных жил — короткие и их выходы редко прослеживаются на расстояние, превышающее километр. Как правило, они приурочены не к крупным дислокациям, а скорее выполняют второстепенные трещины. Большие дислокации имеют место в период горообразования, под действием тангенциальных усилий, тогда как рудные жилы обычно образуются в эпохи интрузивной активности. В районе Coeur d'Alene (Idaho) богатые жилы галенита мало связаны с главнейшими структурными сбросами этого района и, вероятно, образовались неодновременно.

Жилы далеко не всегда продолжают на большую глубину. Существуют всевозможного рода трещины, из которых некоторые исчезают уже близ поверхности, другие продолжают до весьма значительной глубины, достигая 7 000' (Morro Velho, Бразилия). В некоторых местах для пересечения жил, которые, судя по поверхности, кажутся многообещающими, проходили длинные штольни, но продолжения их в глубину обнаружить не удалось.

Определенного соотношения между глубиной трещины и ее длиной не существует, хотя следует сказать, что трещины, в которых наблюдаются крупные передвижки и раздробления, вероятно, идут на значительную глубину. Глубина, до которой отложилось рудное тело, может быть ограничена, а пустая трещина может идти дальше.

Перегибы и искривления, простираения и падения наблюдаются в жилах нередко, но, как правило, жила сохраняет свой общий угол падения. Падение может быть под любым углом, но чаще всего жилы падают под углом 50—80°. Жила North Star (Grass Valley, Калифорния) является одним из лучших примеров пологопадающей длинной жилы; она прослежена на 5 000' с падением 20°. Еще более пологие жилы называются blanket veins, они редко бывают правильными.

¹ Другие авторы называют „pitch“ или „rake“.

² См. дискуссию в „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 39, 1908, pp. 898—906.

³ Reno Sales. Ore deposits of Butte, Montana, „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 46, 1913, pp. 1—109.

⁴ E. Suess. Das Antlitz der Erde. Leipzig 1908, 1, pp. 270—272.

W. von Gümbel. Geologie von Bayern. Cassel 1894, 2, pp. 461—464.

ТЕКСТУРА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*

ВЫПОЛНЕНИЕ И ЗАМЕЩЕНИЕ

Введение. Рудные и жильные минералы, входящие в состав рудных месторождений, образуют целый ряд текстур с их типичными подразделениями. Текстура руд обуславливается многими факторами. При определении первичной текстуры приходится учитывать: наличие открытых трещин для осаждения, концентрацию и состав растворов, время, температуру и давление.

Кроме того, в месторождениях могут иметь место разного рода изменения: вторичные процессы растворения и последующего осаждения, а также давление и вызываемые им деформации и изменения.

Текстура месторождений магматического происхождения. Руды, отвердевшие из магм, в общем имеют текстуру изверженных голокристаллических пород. Их главнейшими минералами являются халькопирит, пирит, пирротин, магнетит, хромит и ильменит. Текстура обычно крупнозернистая, гипидиоморфная; халькопирит и пирротин редко выкристаллизовываются, но могут включать фенокристаллы пирита и магнетита, которые оба часто встречаются идиоморфными. Руды могут, конечно, включать фенокристаллы и ангедральные кристаллы породообразующих минералов, в особенности известково-натровых полевых шпатов, оливина и пироксена. Эвтектические текстуры образуются в том случае, если магма являлась эвтектической смесью, из которой одновременно выкристаллизовалось два минерала, как мы это видим в письменном граните. Приблизительно такую же текстуру представляют породастания магнетита с апатитом.

Если руды подверглись динамическому метаморфизму, то следствием являются: гранулирование и метасоматическое развитие роговой обманки, граната, биотита, серицита и эпидота *последовательно* или мелкими агрегатами и вся масса руды может приобрести сланцеватую структуру.

* Английский термин «texture» принято переводить на русский язык словом «структура» и английский термин «structure» — русским словом «текстура». Начало такому переводу положили наши петрографы, заимствуя немецкую терминологию. Мы полагаем, что геология рудных месторождений, получившая наибольшее развитие в странах английского языка — Америки, Англии и колониях, может сохранить свою терминологию и в переводе на русский язык. Термины «structure» и «texture» мы переводим поэтому соответственно — структура и текстура. Прим. ред.

Текстура пегматитовых даек. Полагают, что пегматитовые дайки образовались при низкой температуре чрезвычайно текучими магматическими растворами (температура около 600° С). В отдельных случаях пегматиты представляют собою переход от изверженных пород к жилам, отложенным горячими растворами. Их текстура крупнокристаллическая, часто друзовая, и в минералах наблюдается резкая тенденция к идиоморфному развитию.

Преобладают крупные кристаллы, нередко достигающие громадных размеров; кристаллы сподумена в руднике Etta (Южная Дакота) достигают длины 30' и даже больше. В этих же месторождениях находили кристаллы кварца длиной в несколько метров. Часто наблюдается тенденция к образованию крустификации, в этих случаях бока даек выложены кристаллами полевого шпата и слюды. В друзах находят более поздние минералы, например альбит и турмалин.

Текстура осадочных месторождений. Руды и минералы осадочных месторождений обычно мелкозернисты; они часто отложились в виде коллоидов, выкристаллизовавшихся с течением времени в мелкозернистый агрегат. В месторождениях, состоящих из кальцита, соли и гипса, может развиться крупнокристаллическая аллотриоморфная структура.

Нередко, с развитием между зернами вновь образующихся минералов, структура бывает кластической. Если присутствует новообразовавшийся кварц, то он почти всегда принимает микрокристаллическую или криптокристаллическую текстуру. Последующий метаморфизм может укрупнить кристаллические зерна, и в результате образуются крупнозернистые руды.

Конкреции¹. Конкреции — это округленной формы агрегат какого-либо минерала или группы минералов, встречающийся в глинистых сланцах и песчаниках. Из минералов, чаще других образующих конкреции, назовем кальцит, кремнезем, сидерит, пиролюзит, барит, пирит, марказит, лимонит. Структура часто концентрическая или радиальная. В одних случаях поясовая слоистость проходит через конкреции, в других она сфероидально облегает их. Конкреции железной руды и марганца, в особенности сидерита, лимонита и пиролюзита, имеют и экономическое значение. В качестве ядра они нередко имеют кластический материал или обломок окаменелой ракушки или растения.

Конкреции являются продуктами процессов растворения и осаждения в мягких полутвердевших осадках. Случайное осаждение, например, пирита вокруг разлагающегося органического вещества может начать этот процесс, а законы осаждения и нарастания кристаллов его продолжают. Как правило, конкреции берут материал из окружающей породы². В них часто наблюдаются трещины и пустоты, образовавшиеся вследствие сокращения объема первоначального гелевого материала. Когда конкреции мелки, одноформенны и многочисленны, они носят название оолитов. Полагают, что такие оолиты образовались из коллоидных растворов.

Оолитовая текстура характерна для многих месторождений кальцита, сидерита, боксита, фосфорита (фосфорнокислого кальция), барита³, лимонита и псиломелана; пирит и марказит редко принимают эту форму. Оолиты часто подвергаются позднейшим изменениям и рекристаллизации.

Текстура остаточных и окисленных месторождений. В остаточных

месторождениях окисленных зон рудные тела обычно чрезвычайно неправильны по структуре и текстуре. Значительная их часть отложилась в виде коллоидов, которые с течением времени частично приняли мелкозернистую кристаллическую текстуру.

Нередко встречаются землистые, глинисто-конкреционные, сосковидные, сталактитовые или пизолитовые структуры. Последняя представляет собою более крупные оолиты. Более крупнокристаллическую форму принимают такие минералы, как кальцит, барит, смитсонит, силикат цинка и церуссит. Местами часто встречаются крустификации или друзовая структура. Кварц — обычно мелкозернистый и криптокристаллический.

ТЕКСТУРА ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Первичная текстура месторождений выполнения. Эпигенетические месторождения имеют различные формы и генезис, но большинство из них образуется из водных растворов путем выполнения открытых трещин или замещения окружающих пород. Осаждение из комплексных растворов в открытых трещинах происходит в определенном порядке последовательности, и поэтому такого рода месторождения легко принимают полосчатую текстуру; в открытых трещинах кристаллизация легко осуществима, но присутствие более ранних кристаллов задерживает развитие более поздней кристаллизации. Поэтому наиболее обычными текстурами являются гипидиоморфная и панидиоморфная.

Осаждение минеральных слоев последовательно один на другой создает полосчатость, называемую «крустификацией». Этот термин стал впервые употреблять Rosebury. Во многих типах жил, независимо от того, полосчатые ли они или нет, часто наблюдается друзовая текстура. В *глубоко-залегающих жилах* (deep-seated veins), образующихся при температуре лишь немного ниже температуры образования пегматитов, текстура обычно бывает крупнокристаллической или массивной; иногда отсутствуют даже друзовые пустоты. Отсутствуют также многочисленные тонкие полосы, а вместо них наблюдается грубополосчатая или «гребенчатая» (comb structure) структура. Такую структуру узнают по развешивающимся с боков кристаллам кварца или турмалина, вольфрамита и касситерита на стенках трещины.

В *жилах, образующихся при умеренной температуре*, наиболее часто наблюдается крупнокристаллическая массивная текстура; довольно часто мы видим также гребенчатость и грубую полосчатость, являющуюся результатом последовательного отложения, в особенности в месторождениях, содержащих кальцит и барит. В кварцевых жилах выполнение, видимо, происходило быстро и полно, и руда состоит из неправильной массивной смеси кварца с сульфидами. Здесь отложение также началось с боков, о чем свидетельствует существование частично выполненных жил, представляющих рыхлые агрегаты призм. В любом шлифе такого кварца обычно можно видеть длинные кристаллы более раннего нарастания, вокруг которых отложились крупные кристаллы новообразовавшегося кварца (рис. 51 в табл. II). Линии включений часто проникают из одного зерна в другое. Эти включения состоят из водных растворов нередко с взвешенными в жидкости мелкими кубиками и зернами прозрачной соли. Имеются сведения о включениях CO_2 , но они чрезвычайно редки.

Оптическая однородность кристаллов или зерен часто нарушается волнистым угасанием.

Сульфиды крупнокристаллические, иногда грубополосчатые развиваются параллельно бокам жилы. Включения боковых пород могут быть окаймлены концентрическими кольцами различных сульфидов, образуя первичную брекчированную жильную структуру⁴. Пирит и арсенопирит (оба — одни из наиболее ранних минералов) часто присутствуют в виде развитых кристаллов, между тем как галенит, цинковая обманка, халькопирит и тетраэдрит гораздо реже обладают кристаллическими гранями.

Полосчатая структура иногда получается от выполнения нескольких смежных трещин. В кварцевых жилах, залегающих в расщепленных породах, многочисленные параллельные пропластки плотно сланца, чередующиеся с кварцем, могут дать возникновение особой книжной структуры (book structure).

Эти особенности, трудно объяснимые наличием открытых пустот, рассматривались иногда как расширение силою кристаллизации. Эту точку зрения высказывали E. Suess, W. O. Crosby, E. J. Dunny, S. Taber и др. Представляется невероятным, чтобы такие пустоты могли быть образованы силою кристаллизации. Вернее они поддерживались сильным давлением магматических вод.

Но внутри таких трещин незначительная сила, развивающаяся при кристаллизации, легко могла оторвать от боков слои глинистого сланца. В отложениях, образовавшихся при высокой или умеренно высокой температуре, сталактиты не встречаются.

В жилах, образовавшихся при более низких температурах и на относительно небольшой глубине, преобладают крустифицированные и друзовые формы и мелкозернистые текстуры. Кварцевые выполнения обычно мелкозернистые, от криптокристаллических до халцедоновых, вблизи поверхности.

Сульфиды находят в мелких кристаллах или мелких зернах; крупные кристаллы пирита, столь обычные для месторождений других типов, здесь встречаются редко. С другой стороны, там, где жильными минералами являются кальцит, доломитовые карбонаты, родохрозит, флюорит или барит, кристаллы могут быть значительно крупнее, чем в других месторождениях. Примером служат великолепные кристаллы кальцита в Joplin (Миссури); там же встречаются необычайно красивые и правильные индивидуумы галенита.

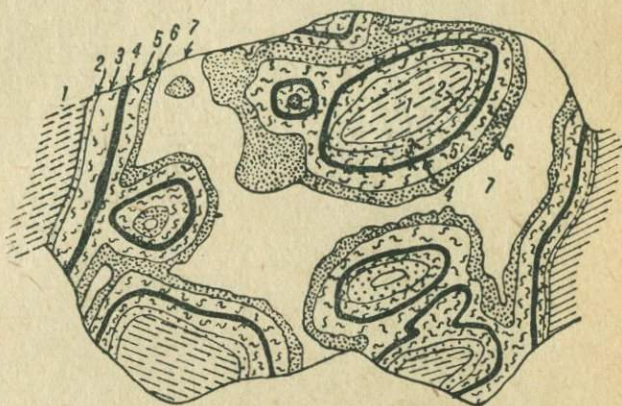


Рис. 51 А. „Кокардовая“ структура в жиле Alacran Мексика (по J. Spurr).

1—туф; 2—силикат; 3—красноватый кварц; 4—сульфиды; 5—серый кварц; 6—пиритовая оторочка; 7—белый кварц.

С крупными друзовыми пустотами нередко связаны симметричные и хрупкие кристификации. Обычно брекчированная структура первичного происхождения.

Включения боковых пород находят в жилах всевозможных типов. Иногда они образуют кусковатые скопления, цементированные рудными и жильными минералами. В других случаях они являются не связанными в жильном материале и обычно проявляют следы большего или меньшего изменения. Такие включения могли отслоиться от боков трещины, пока жила еще не была выполнена, или же были оторваны силой кристаллизации жильных минералов. Большинство трещин, вероятно, раньше заполнялось раздробленной породой и всевозможного размера обломками. В течение процесса оруденения мелкозернистый материал легко удаляется и замещается, а более крупные обломки остаются и замещаются только

частично⁵. Некоторые включения представляют собою просто остатки таких обломков, избежавших замещения⁶.

Вторичные текстуры и структуры выполненных месторождений. Раздробление и брекчирование ранних минералов наблюдаются весьма часто; жил, в которых они отсутствуют, немного. Часто имеет место повторное вскрытие трещин (рис. 54) и отложение новых генераций жильного материала; руда может обогатиться за счет первичных генераций. Путем развития в ранних выполнениях новых плоскостей скольжения может образоваться слоистая или полосчатая структура; примером служат многие золотокварцевые жилы Калифорнии (рис. 52 и 53 в табл. II). По таким плоскостям скольжения кварц деформирован и гранулирован и золото может по ним отлагаться путем процессов, которые можно было бы назвать вторичными, хотя они обычно имеют место вскоре после образования жилы.

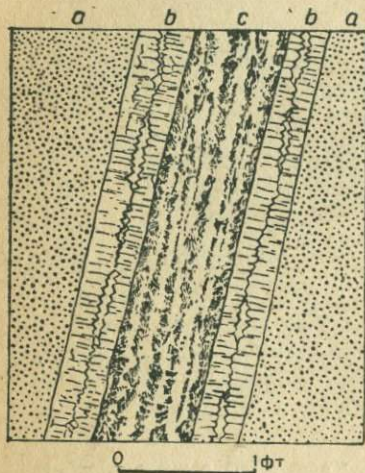


Рис. 54. Поперечный разрез жилы Japan, Silverton, Colorado. Наблюдаемая структура получилась вследствие повторного вскрытия первоначальной трещины.

a—коренная порода; *b*—кварц; *c*—руда (по Ransome).

В некоторых месторождениях, в особенности где присутствуют цеолиты, кальцит или барит, вторичные процессы замещения играют весьма значительную роль. Жила, выполненная кальцитом, может оказаться замещенной кварцем; в этом случае вторичное происхождение последнего будет ясно видно по его занозистой или слоистой структуре, трещинам кливажа, кускам кальцита или по следам линий, оставленных кливажем. Такие псевдоморфные текстуры иногда сопровождаются значительным обогащением месторождения металлом.

Метасоматизм в рудных месторождениях. Сущность метасоматизма или замещения уже описывалась выше. Многие месторождения образовались из растворов, содержащих различные соли и газы, способные разрушать некоторые виды пород. Проходя по трещинам или другим открытым путям, растворы отлагают часть несомого ими растворенного материала в открытых субкапиллярных пустотах, в том случае, если раствор

находится в состоянии пересыщения; таков процесс выполнения трещин. Ввиду того что большинство пород пористы и растворы часто находятся под высоким давлением, они будут просачиваться в породы и вызывать в них химические и минералогические изменения. Одновременно пористые породы, без сомнения, играют роль полупроницаемых перегородок, через которые с различной скоростью могут диффундировать разнообразн-ые вещества; электролиты и газы диффундируют чрезвычайно легко, коллоиды и трудно ионизируемые соединения — весьма медленно. Таким образом, всякая жила обычно сопровождается коркой измененных боковых пород, в которых растворы произвели определенные метасоматические изменения. В открытых трещинах минералы обычно уже иные по сравнению с минералами, образующимися в метасоматических зонах. Например, при выполнении открытой жильной трещины кварцем, различными сульфидами и золотом боковые породы будут минерализованы пиритом, серицитом, кальцитом при весьма небольшом содержании золота, а может быть, и при полном его отсутствии. Бывают случаи, когда вовсе не наблюдается сколько-нибудь заметного изменения боковых пород.

Основные различия в характере процессов минерализации выполненных жил, сопровождаемых метасоматизмом боковых пород и так называемыми месторождениями замещения, сводятся к тому, что в последних выполнение узких открытых пустот незначительно и основная масса руды образуется в результате метасоматических процессов.

Метасоматические процессы. В массивной породе замещение может быть вызвано весьма разнообразными растворами, причем характер и полнота замещения всех или некоторых минералов породы обуславливаются различной стойкостью их в среде проникающих растворов. Наиболее активными в водных растворах являются кислород, двуокись углерода, серная кислота, углекислое окисное железо, сероводород, щелочные сульфиды и щелочные карбонаты. Замещение может иметь место при любой температуре выше точки отвердевания раствора и ниже точки плавления породы. Естественно, что в горячих растворах этот процесс протекает более деятельно. Замещение может протекать под любым давлением. Оно может быть вызвано обыкновенными поверхностными водами, морской водой, горячими восходящими водами и магматическими эманациями газообразными, жидкими или превышающими критическую температуру.

В зависимости от преобладающего минерала в результате метасоматоза процесс будет характеризоваться силификацией, карбонитизацией, хлоритизацией, серицитизацией, пиритизацией и пр.

Не существует пород абсолютно стойких в присутствии одного из естественных замещающих растворов. Всего легче замещаются известняк и доломит, даже при обыкновенных температурах, например сидеритом и смитсонитом. Гранит, диорит и другие интрузивные породы также способны к замещению. Могут замещаться даже кварцит, плотный сланец и глинистый сланец, хотя они более стойки, чем другие породы. Замещение сульфидами может до известной степени иметь место при обыкновенной температуре (например, замещение пирита халькоцитом), но обширные месторождения сульфидной руды обычно образуются горячими растворами.

Способ замещения. Как сказано в предыдущих главах, замещение осуществляется концентрированными растворами, проникающими в чрез-

вычайно мелкие калиплярные пустоты (пространства между плоскостями наслоение крупнее 0,0001 мм, стр. 25), являющиеся выше или ниже пределов видимости под микроскопом.

Известны случаи, когда замещение начинается от трещинки, занятой пленкой раствора, связывающей целый ряд еле заметных включений жидкостей. Растворение и отложение происходят почти одновременно, в зависимости от непрерывно меняющегося равновесия поступающего растворителя и возможности выхода для растворенного материала. Одновременно могут растворяться несколько минералов, уступая место новым, как при замещении глинистого сланца кристаллами пирита. Под действием давления объем породы остается без изменения. Как только освобождается место, из концентрированного раствора немедленно выделяется какой-либо минерал. Этот закон не относится к свободным кристаллам или к тем случаям, когда давление может быть преодолено силой кристаллизации, или если твердое тело замещается гелем, или растворы циркулируют с такой быстротой, что создаются условия, благоприятствующие растворению. По мере развития кристаллических зерен последние оказывают различную степень давления в разных направлениях, облегчая, таким образом, растворение в направлении наибольшего давления. Результатом этого действия является развитие кристаллов в новых минералах.

Сила кристаллизации отдельных минералов весьма различна; некоторые из них находятся в метасоматических породах только в виде аллотриоморфных зерен, другие же принимают свою кристаллическую форму. Ниже приводится перечень минералов в порядке относительной силы кристаллизации, начиная с обладающих резкой кристаллической индивидуальностью: рутил, турмалин, ставролит, арсенопирит, пирит, магнетит, барит, флюорит, эпидот, пироксен, амфибол, сидерит, доломит, альбит, слюда, галенит, цинковая обманка, кальцит, кварц, ортоклаз.

Растворение может продолжаться параллельно граням кристалла, когда кристалл уже перестанет нарастать. Как только истощится материал для нарастания данного кристалла, пустоты немедленно заполнятся минералом, занимающим следующее место в порядке осаждения. Этим объясняется появление часто наблюдаемой клетки кварца или кальцита на метасоматических кристаллах пирита. Если замещение происходит по закону постоянного объема, его нельзя изобразить обычными химическими формулами⁷. Реакции, вероятно, сложнее⁸.

В процессах метасоматизма силикатовые минералы замещаются жильными, как серицит, кальцит, сидерит, барит и флюорит. Сначала разрушаются железо-магнезиальные силикаты, затем известково-натровые полевые шпаты и в последнюю очередь ортоклаз и альбит. Степень воздействия на кварц, вероятно, обуславливается количеством присутствующих в растворе щелочных карбонатов. Все сульфиды замещают все силикаты, также и кварц (рис. 55 в табл. III). Сульфиды и сульфосоли легко замещают другие сульфиды. Последовательность, характерная для многих руд: 1) пирит (самый старый), 2) сфалерит, 3) энаргит, 4) борнит, 5) халькопирит и 6) галенит. Любой из более поздних минералов может замещать любой из более старых (рис. 56 в табл. III). Наше знание относительно этих различных замещений весьма обогатилось изучением шлифов в отраженном свете. Жильные минералы подобно серициту, хлориту, кальциту, кварцу, флюориту и бариту весьма редко замещают сульфиды.

Диффузия. Под термином «диффузия» подразумевается передвижение молекул в растворе от места высокой концентрации к месту более низкой концентрации. Этот процесс играет большую роль в явлениях замещения и вообще отложения руд. Сила диффузии варьирует смотря по концентрации и весьма неодинакова для различных веществ. Общая формула для диффузии в отсутствии химической реакции $A = k \sqrt{z}$, где A — количество вещества, диффундирующего сквозь единицу площади в течение определенного времени z , а k — константа для каждой концентрации при строго определенной температуре. Материал стремится равномерно распределяться по имеющемуся пространству. Но, как это можно видеть из формулы, процесс этот чрезвычайно медленный, не может действовать на большое расстояние и по истечении некоторого времени скоро прекращается.

Диффузия не способна создавать месторождения полезных ископаемых; ее должно дополнять передвижение растворов по трещинам и другим открытым поверхностям. Значение диффузии, вероятно, заключается в механизме замещения. В мельчайших открытых трещинках и пустотах происходит постоянное изменение в концентрации, а диффузия помогает продвижению вверх новых молекул и выведению побочных продуктов замещения. Диффузия легко протекает в гелях. Диффундирующие вещества могут сталкиваться и вызывать однообразные или ритмические замещения⁹.

Диффузия может действовать также в других средах, например, в песке или каком-либо другом мелкозернистом материале. Она может иметь место также в проницаемых породах, например известняке или песчанике, и может в них вызывать однообразное замещение или ритмическую полосчатость, как мы это видим, например, в известняке Leadville, где сфалерит иногда чередуется с пиритом, или в полосчатом магнетите в железных рудах Швеции и о. Куба. Такая полосчатость грубая, и в ней отсутствуют характеристики коллоформности.

Текстура метасоматических пород. При процессе метасоматизма новые минералы развиваются в бесчисленных точках старой породы, причем некоторые из них развиваются в форме кристаллов (кристаллобластический ряд, стр. 158), другие же образуют неправильной формы зерна. Каждое новое зерно можно назвать «метасомом» и каждый новый кристалл «метакристаллом» (псевдофенокристаллом)¹⁰. Получатся голокристаллические текстуры. Новые минералы нередко содержат включения старых (сетчатая текстура), и если замещение, как это часто бывает, неполное и сохраняются следы старой текстуры в совершенно достаточной мере, чтобы определить первоначальную текстуру породы, образуются остаточные текстуры (relict texture). Характерно, что во многих замещениях, даже в том случае, если процесс полностью закончился, первоначальная текстура может сохраниться, как мы это видим в окварцованном оолитовом известняке и в окварцованных доломитах (рис. 59 в табл. III). Однако, нередко первоначальная текстура исчезает полностью.

Структура породы может остаться неизменной даже в том случае, если текстура разрушена метасоматическими процессами. Такими сохранившимися структурами являются, например, расслоения, трещины отдельности, брекчи, складки и пузырчатость в лавах. О сохранении текстуры известняка, полностью замещенного сульфидами, упоминают

S. F. Emmons¹¹ и J. M. Boutwell¹². Во многих замещениях жильные минералы, так же как и кварц и барит, могут выкристаллизовываться первыми, затем следует пирит и, наконец, прочие сульфиды.

Irving¹³ отмечает, что в некоторых случаях замещение начинается со многих пунктов в породе, где могут развиваться «метасомы» или «метакристаллы» (рис. 60 в табл. IV); при продолжении того же процесса (рис. 61 в табл. IV) замещается вся остальная порода. В этих случаях контакт бывает неопределенным. В других случаях имеет место полное изменение, быстро надвигающееся на коренную породу наподобие волны; контакты тогда выходят резкие и процесс, вероятно, заключается в замещении первоначальной породы коллоидальным кремнеземом. Замещенная порода обычно плотная и компактная; местами, однако, встречаются друзовые пустоты.

Под действием одного и того же раствора в различных породах могут иметь место различные результаты. Известняк становится окремненным, а диорит превращается в серицит.

Замещения при высокой температуре. Для месторождений, образовавшихся замещением при высокой температуре, вероятно, превышающей 400°, характерны: полная перекристаллизация, развитие силикатовых минералов с малым количеством воды (или полным ее отсутствием) и крупная текстура. Часто вводятся такие минерализаторы, как фтор и бор.

Наиболее яркие примеры текстур встречаются в замещениях известняков в контактово-метаморфических месторождениях (см. вып. III), продуктами которых являются крупные агрегаты метакристаллов андрадитового граната, кварца, кальцита, эпидота и пироксена. Известняк может частично перекристаллизовываться в крупнокристаллический кальцит. Магнетит и сульфиды развиваются крупными зернами.

Боковые породы оловоносных жил перекристаллизовываются в *грейзен*, состоящий из крупных «метасомов» мусковита, топаза, кварца, турмалина, флюорита и касситерита (рис. 27). Известковые и зеленокаменные породы, содержащие много кальция, перекристаллизовываются в агрегаты аксинита, актинолита, граната и пр.

Замещения апатитом (содержащим фосфор), скаполитом (содержащим хлор) и пироксеном встречается в непосредственной близости к некоторым высокотемпературным жилам. Вдоль многих глубоко залегающих золотоносных кварцевых жил в боковой породе развивается большое количество альбита, биотита и цоизита.

Замещения при умеренной температуре. Замещения при более умеренной температуре, вероятно, будут иметь следствием образование мелкозернистых текстур и обилие водных силикатов вроде хлорита и серицита (рис. 64 в табл. V). Исключение представляют те случаи, когда барит и флюорит замещают известняк, вследствие того что оба эти минерала легко развиваются в виде совершенных метакристаллов (рис. 65 в табл. V и 67). Окремнение известняка, глинистого сланца и риолита представляет весьма обычный процесс, часто имеющий место с сохранением текстуры, — кварц обычно мелкозернист.

Окремненным известнякам присвоено название джаспероидов (jasperoids) (рис. 60 и 61 в табл. IV).

Известняк может оказаться замещенным сплошными сульфидами (рис. 66 в табл. V). Изменение горячими водами зернистых и порфириновых изверженных пород и сланцев такого же состава имеет следствием серици-

тизацию железистых и силикатовых минералов, иногда также кварца с развитием волокнистых агрегатов. В этих породах иногда находят пирит, вторичный кварц, рутил, альбит и адуляр. В некоторых типах таких метасоматических пород встречаются также карбонаты кальция, магния и железа. Близ некоторых золотоносных кварцевых жил змеевик изменился в крупнокристаллические агрегаты анкерита, кварца и марипозита (хромсодержащий кварцит).

В некоторых свинцовых месторождениях кварцит и кварцитовые глинистые сланцы могут оказаться широко замещенными сидеритом (рис. 63 в табл. V).

В месторождениях, отложенных горячими водами вблизи поверхности, где породы проницаемы, часто наблюдается зарождающееся изменение изверженных пород с изменением железосодержащих минералов в хлорит, кальцит или эпидот (пропилитизация). Для некоторых месторождений, образовавшихся вблизи поверхности, характерно замещение эффузивных пород алунитом, пиритом и каолинитом.

Замещения при низкой температуре. Под действием менее горячих растворов интенсивность замещения понижается. Образующиеся минералы содержат значительное количество воды, текстура их мелкозернистая. В изверженных породах под действием не столь горячих и слабых растворов могут образоваться хлорит, кварц и каолин, возможно также серицит.

Может иметь место замещение такими сульфидами, как пирит, галенит и цинковая обманка. Известняк может оказаться окремененным мелкозернистыми джаспероидами. До известных пределов одни сульфиды могут замещать другие. Например, халькозин замещает пирит, халькопирит и борнит.

В кислых нисходящих водах каолин замещает серицит и прочие силикаты. Полагают, что горячие щелочные воды не могут образовывать каолин из содержащихся в породах алюминиевых силикатов; получатся щелочные силикаты, подобные серициту. С другой стороны, обыкновенные слабо минерализованные почвенные воды развивают в породах каолин. Другими словами, каолин может образоваться только в самой верхней зоне метаморфизма и редко встречается значительно ниже зоны выветривания ¹⁴.

Признаки замещения. Первым, кто установил, что замещение является одним из видов генезиса месторождений полезных ископаемых, был F. Posepny. Несколько времени спустя S. F. Emmons ¹⁵ доказал, что этот вид генезиса весьма обычен, и иллюстрировал это примерами многочисленных рудных месторождений в Колорадо и других местах. Около 1900 г. W. Lindgren дал описание главнейших видов метасоматизма ¹⁶. В 1911 г. D. J. Irving ¹⁷ выпустил в печать свой чрезвычайно важный труд, в котором он дает сводку признаков замещения рудных тел. Некоторые из этих признаков упомянуты выше, но вкратце их можно повторить:

1. Форма рудного тела — более или менее неправильная. Постепенно расплывающиеся границы — не всегда достаточно убедительный признак.

2. Присутствие ничем не поддерживаемых остаточных массивов породы. Иногда можно установить ориентацию напластования, параллельную окружающим породам.

3. Отсутствие крустификаций. Местами может наблюдаться полосчатость, что объясняется сохранением напластования или плоскостей сланцевания.

4. Отсутствие вогнутых контактов: в известняке, например, растворение пустот вызывает образование неглубоких плоских вогнутых поверхностей. Это можно наблюдать в выполненных пещерах, тогда как замещение протекает при очертаниях выпуклых по отношению к неизменной породе.

5. Сохранение текстур и структур первоначальной породы. Последний признак наиболее решающий.

Примеры, по которым можно установить замещение, иногда трудно установить; в этом отношении делается чрезвычайно много ошибок. Верными признаками служат присутствие жилок, пересекающих более старые минералы, и зависимость заменяющего минерала от мелких трещин. Кристалл одного минерала секущий, кристалл другого не всегда верный признак замещения. Тот кристалл, который кажется позднейшим минералом, может в действительности быть более поздним в первоначальном образовании породы. Во многих случаях смежные минералы могли развиться почти одновременно. Особый вид замещения представляет псевдоэвтектическая текстура весьма схожая с прорастанием (рис. 57 и 58 в табл. III).

Замещение может начаться в зерне минерала от трещин во всей массе. Когда замещение начинается по периферии и распространяется внутрь (рис. 68 А), его называют «центростремительным». Такого рода замещения обычны для супергенных обогащений. Менее обычная форма замещения начинается с середины минерала и распространяется кнаружи, оставляя от первоначального вещества лишь оболочку; этот вид замещения можно назвать «центробежным» (рис. 68 В, 68 С в табл. VI—VII). В других случаях замещение начинается от трещин и плоскостей спайности по всему зерну.

Несмешиваемость (unmixing)¹⁸. Если минерал выделяется при высокой температуре, он часто содержит различные посторонние компоненты в твердом растворе. Медленно остывнув, эти компоненты могут внезапно выкристаллизовываться (при определенной температуре), так что в первоначальном минерале могут оказаться мелкие включения инъецированного вещества. Такое явление можно наблюдать в металлических сплавах и, несомненно, этот процесс также играет немаловажную роль в рудных месторождениях. Так например, сфалерит содержит железо и медь в твердом растворе, которые могут выделиться в виде точечных включений и рубцов халькопирита и пирротина (рис. 68 D в табл. VII). Борнит может содержать точечные включения и рубцы халькозина (рис. 68 В в табл. VII) или халькопирита. Многие полагают, что это явление следует приписать процессу, называемому «несмешиваемостью». Иногда эти новые продукты выделяются на плоскостях спайности (рис. 68 F в табл. VII). Следует добавить, что относительно многих подобных явлений мнения расходятся. Другими примерами являются присутствие халькопирита в станните, зерен аргента в галените, рубцов пентландита в пирротине, прорастание висмутита с аргентитом и тонкие пластинки кубана в пирротине и халькопирите. Если несмешивающиеся вещества нагреть и внезапно охладить, следует ожидать, что они снова образуют гомогенный твердый раствор, что, видимо, и доказано для галенита, кубана и пентландита. Естественно, что эти продукты несмешивающихся твердых растворов более свойственны месторождениям, образовавшимся при высокой температуре.

Роль коллоидов в выполнении и замещении¹⁹. Известно, что в месторождениях полезных ископаемых, образовавшихся вблизи или на поверхности, значительную роль играют коллоидальные отложения, например кремнезема, водной окиси железа и водной окиси алюминия. Коллоидальные минералы нередко отлагаются также в течение процесса окисления рудных месторождений. В данной главе коллоиды с этой стороны не рассматриваются.

Однако же все более и более накапливается доказательств, что коллоидный кремнезем или гель кремнезема играет значительную роль в генезисе месторождений, образовавшихся под действием восходящих вод относительно близко к поверхности. Некоторые кварцевые выполнения этих жил чрезвычайно мелкозернисты и свидетельствуют об отложении довольно густого желатинообразного вещества, которое вскоре выкристаллизовывалось в халцедоновую или криптокристаллическую форму²⁰. Ясное доказательство этому можно наблюдать в некоторых выполненных жилах в районе Tintic (Utah)²¹, где сквозь вещество микрокристаллического кварца еще можно видеть первоначальную тонкую слоистость, образовавшуюся отложением.

В вышеупомянутом труде о районе Tintic имеются данные о том, что в некоторых месторождениях, образовавшихся на не столь значительной глубине и не при очень высоких температурах, известняк и доломит могут быть замещены гелем кремнезема, который со временем выкристаллизовывается в халцедон. Для этого рода характерны резкие контакты с неизменной породой. Замещение не распространяется от ядер кристаллов кварца, начинаясь от нескольких точек, а продвигается наподобие волны и обрывается резко выраженными контактами (стр. 160). Позже в этот гель проникали металлоносные растворы и отложили в нем сульфиды. Иногда образуется полосчатость, сильно напоминающая так называемые кольца Liesegang в искусственных гелях, свидетельствующая о ритмическом осаждении сульфидов.

¹ J. E. Todd. Concretions and their geological effect. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 14, 1903, pp. 353—368.

James Geikie. Structural and field geology. 1905, гл. VIII, W. H. Newhouse. Some forms of iron sulphide, etc. „Jour. Geol.“ 35, 1927, pp. 73—83.

² Новейшую литературу по вопросу происхождения оолитов читатель найдет в „Fortschritte der Min., Krist. u. Petr.“, Jena, 3, 1913, p. 43.

W. H. Twenhofel. Treatise on sedimentation, Baltimore, 1926, pp. 533—543.

W. H. Bucher. On oolites and spherulites. „Jour. Geol.“, 26, 1918, pp. 593—609.

³ Oolitic and isolitic barite. „Bull. Geol. Soc. Am.“ 25, 1914, pp. 77—79.

⁴ Такого рода структуры называются „кокардовой рудой“ („cocade ore“). В старинной литературе найдем упоминание таких структур из Freiberg и Clausthal. Иллюстрации читатель найдет в труде W. Lindgren, „Grass Valley и Nevada City“, помещенном в „Seventeenth Ann. Rept.“ U. S. Geol. Surv., 1896, ч. II. Также в труде Sprigg, „Econ. Geol.“, 21, 1926, pp. 519—537. Кокардовая руда с повторным отложением касситерита и пирита описана M. J. Buerger и J. L. Maury, „Econ. Geol.“ 22, 1927, pp. 1—13.

⁵ J. C. Schagen van Soelen „Eng. Min. Jour. Press“, Nov. 13, 1926.

⁶ A. M. Bateman. „Econ. Geol.“ 19, 1924, pp. 504—520.

⁷ W. Lindgren. Volume changes in metamorphism. „Jour. Geol.“ 26, 1918, pp. 542—554.

⁸ Смигсонит часто замещает кальцит, причем сохраняются структуры, свидетельствующие о неизменяемости объема. Полагают, что реакции протекают по фор-

муле $\text{CaCO}_3 + \text{ZnSO}_4 = \text{CaSO}_4 + \text{ZnCO}_3$, причем как ZnSO_4 так и CaSO_4 представляют собою растворимые в воде соли. 1 см³ кальцита содержит 1,192 мг CO_2 и 1,518 мг CaO , тогда как 1 см³ смитсонита содержит 1,514 мг CO_2 и 2,787 мг ZnO . Ясно, что принцип одинаковых объемов требует более значительного количества CO_2 , чем то, которое может быть получено из кальцита.

Если процесс протекает по данной формуле, неизбежным следствием является сокращение объема.

⁹ R. E. Liesegang. Geologische Diffusion.

M. Watanabe. Some problems of diffusion in the special reference to the study of ore deposits. Science Repts. Tohoku Univ. Soc., III, vol. 2, Sendai 1924. (Эти две книги особенно рекомендуются).

¹⁰ Этот термин впервые предложен А. С. Лане, „Bull. Geol. Soc. Am.“ 14, 1903, p. 369.

Grubenmann and Becke пользуются терминами „xenoblast“ и „idioblast“. N. Grubenmann. Die kristallinen Schiefer. Berlin, 1910, p. 91.

¹¹ S. F. Emmons. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“, 23, 1893, p. 602.

¹² J. M. Boutwell. „Prof. Paper“ 39, U. S. Geol. Survey, 1905, p. 193.

¹³ J. D. Irving. „Jour. Canadian Min. Inst.“, 14, 1911, pp. 395—471.

¹⁴ W. Lindgren. The origin of kaolin. „Econ. Geol.“, 10, 1915, pp. 89—93.

¹⁵ S. F. Emmons. The genesis of certain ore deposits. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 15, 1887, pp. 125—147.

S. F. Emmons. Structural relations of ore deposits. Idem, 16, 1888, pp. 804—839.

S. F. Emmons. On the origin of fissure veins, „Proc., Colorado Sci. Soc.“, 2, 1888, pp. 189—208.

¹⁶ W. Lindgren. Metasomatic processes in fissure veins. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“, 30, 1901, pp. 578—692.

¹⁷ J. D. Irving. Some features of replacement orebodies and the criteria by means of which they may be recognized. „Jour. Canadian Min. Inst.“, 14, 1911, pp. 395—471; „Econ. Geol.“, 6, 1911, pp. 527—561.

¹⁸ A. E. Nissen and S. L. Hoyt. On the occurrence of silver in Argentiferous galena ores. „Econ. Geol.“ 10, 1915, pp. 172—179.

H. Schneiderhöhn. Entmischungserscheinungen etc. „Metall und Erz“, 19, 1922, pp. 501—526.

L. P. Teas. The relation of sphalerite to other sulphides in ores. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 59, 1918, pp. 68—97.

G. M. Schwartz. „Econ. Geol.“ 22, 1927, pp. 44—61 (кубанит).

A. Wandke. „Econ. Geol.“ 21, 1926, pp. 166—171 (жалькозин).

W. H. Hewhouse. „Econ. Geol.“ 22, 1927, pp. 289—299 (пентландит).

S. F. Emmons, J. D. Irving and G. F. Loughlin. „Prof. Paper“ 148, U. S. Geol. Survey, 1927 (лиллианит).

¹⁹ A. Scott. „Fourth Rept. on Colloid Chemistry“, Brit. Assoc. Adv. Sci., London, 1922.

W. Lindgren. The colloidal chemistry of minerals and ore deposits. In Theory and Application of Colloidal Behavior, R. H. Bogue, 1924.

H. C. Boydell. The role of colloidal solutions in the formation of mineral deposits. „Trans. Inst. Min. and Met.“ (London), 34th Session, 1924, pp. 145—337, с дискуссией.

W. Lindgren. Metasomatism. „Bull. Geol. Soc. Am.“, 36, 1925, pp. 247—262.

W. Lindgren. Gel Replacement, a new aspect of metasomatism. „Proc. Nat. Acad. Sci.“, 11, 1925, pp. 5—11.

²⁰ W. Lindgren. Geology and mineral deposits of the National District, Nevada. „Bull.“ 601, U. S. Geol. Survey, 1915. То же видим в кварцевых жилах Waihi, Нов. Зеландии и в некоторых оловянных жилах Боливии.

²¹ W. Lindgren. Processes of mineralization and enrichment in the Tintic mining district. „Econ. Geol.“, 10, 1915, pp. 225—240.

²² R. E. Liesegang. Geologische Diffusionen, 1913, p. 180. Реферат А. Кнопф в „Econ. Geol.“, 8, 1913, p. 803.

РУДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ — СТОЛБЫ (ORE SHOOTS)¹

Форма первичных рудных скоплений (ore shoots). Промышленная руда обычно не занимает целиком всего объема месторождения. Обычно участки руды окружены массой рудного материала, содержание руды в котором значительно ниже требований, предъявляемых к руде. Переход от руд через бедный рудный материал к вмещающим боковым породам может быть незаметный и постепенный или, наоборот, с ясно обозначающимся контактом между «рудой» и «нерудой».

В месторождениях замещения рассеянные вкрапленные зерна галенита или цинковой обманки могут быть столь малочисленны, что руду с этого участка не стоит перерабатывать. В жилах вынимают лишь определенные части, остальной материал часто состоит только из жильных минералов или из глинистых перетертых масс или брекчий.

Те части месторождений, в которых полезное ископаемое сконцентрировано так, что они подлежат эксплуатации, называются *рудными скоплениями* (ore shoots). Условия их залегания и форма чрезвычайно разнообразны; часто весьма трудно установить причины, вызвавшие их образование. Этот вопрос не может быть исчерпан в данной главе, так как в нем заключается вся проблема генезиса рудных месторождений.

В месторождениях осадочного происхождения скопления руды, конечно, имеют общую пластообразную форму, но примесь жильных минералов или не имеющего ценности материала может быть столь значительна, что выемке будут подлежать лишь отдельные участки рудного тела. На концентрации более богатых рудных масс сказались и различные условия сортировки детритовых осадков и сложные условия отложения из вод морей, озер и рек. Помимо этого, весьма обычны изменения, вызванные действием метеорных вод; в случае залежей фосфорита и сидерита результатом такого рода изменений является обогащение.

В месторождениях магматического происхождения общая форма массива и форма рудного скопления одинаковы. В некоторых месторождениях, как например в залежах магнетита северной Швеции и дайкоподобных залежах ильменита в Iron Mountain (Wyoming), пустая порода почти отсутствует и интрузивное тело целиком представляет руду. Интересна пластообразная форма некоторых залежей хромита.

Неправильно чечевицевидные или ленто-плитообразные массы изверженных пород, вмещающие сегрегации рудных минералов, часто имеют ядра более богатых скоплений руды, постепенно расплывающиеся в нормальные породы массива.

В эпигенетических месторождениях форма рудных скоплений чрезвычайно изменчива. Это особенно относится к месторождениям замещения, и трудно бывает объяснить происхождение той или иной формы и условий залегания. Форма их обуславливается присутствием трещин, дающих доступ растворам, присутствием непроницаемых пород и различной степенью замещаемости первоначальных пород.

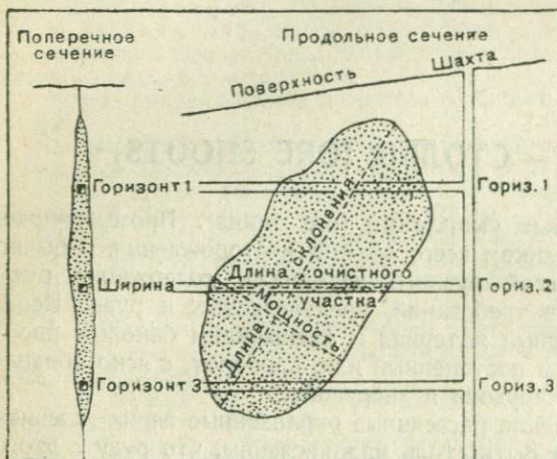


Рис. 69. Диаграмма, иллюстрирующая термины, употребляемые для характеристики направлений измерения в рудных столбах (по F. Ransome).

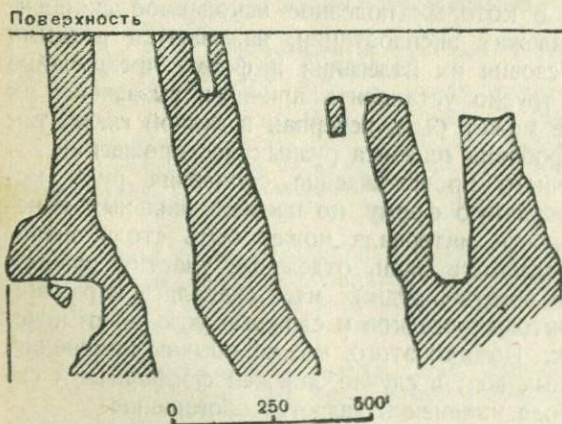


Рис. 69 А. Продольный разрез, иллюстрирующий рудное скопление, „столбы“ в жилах Nevada City, Cal.

Особенное внимание уделяется рудным скоплениям в трещинных жилах. Хотя руда в общем идет по трещине, и, следовательно, имеет плитообразную или пластовидную форму, она редко занимает всю открытую часть трещины, а концентрируется в виде скоплений различного размера, формы и постоянства. Небольших размеров рудные скопления называют гнездами (bunch), карманами (pockets) и почками (kidneys). В золотоносных кварцевых жилах эти небольшие скопления часто содержат чрезвычайно много золота. Узкие рудные скопления, вытянутые в длину, независимо от того, залегают ли они в трещинных жилах или независимо от них (например в вулканических necks), называют трубами (chimneys, pipes, necks) (рис. 71).

Рудные скопления могут иметь совершенно неправильную форму, но чаще эта форма более или менее явно столбчатая, с крутым скоплением, лучше всего наблюдаемая в проекции в плоскости жилы. Рис. 49 дается в качестве иллюстра-

ции терминов, предлагаемых² для обозначения различных измерений рудного столба. Длина по склону (pitch length) или осевая длина — расстояние между двумя наиболее удаленными частями рудного скопления. Склонение (pitch) есть угол, образуемый длиной по склону и простираемостью жилы, измеряемый в плоскости залежи. Горизонтальная длина (store length) — это длина рудного скопления на каком-либо определенном го-

ризонте выработок, измеряемая по горизонтальной линии в плоскости тела. Мощность измеряется перпендикулярно к плоскости жилы. Ширина (breadth) равна горизонтальной длине, помноженной на синус угла склонения, и измеряется перпендикулярно к длине по склонению в плоскости залежи. Рис. 49 В представляет рудный столб в золотоносной кварцевой жиле в Kirkland Lake (Ontario). Рис. 70 — прекрасный пример плоского рудного столба в знаменитой жиле Eureka-Idaho (Grass Valley, California).

В параллельно залегающих жилах рудные столбы нередко идут приблизительно в одном направлении. Иногда в ряде параллельных жил

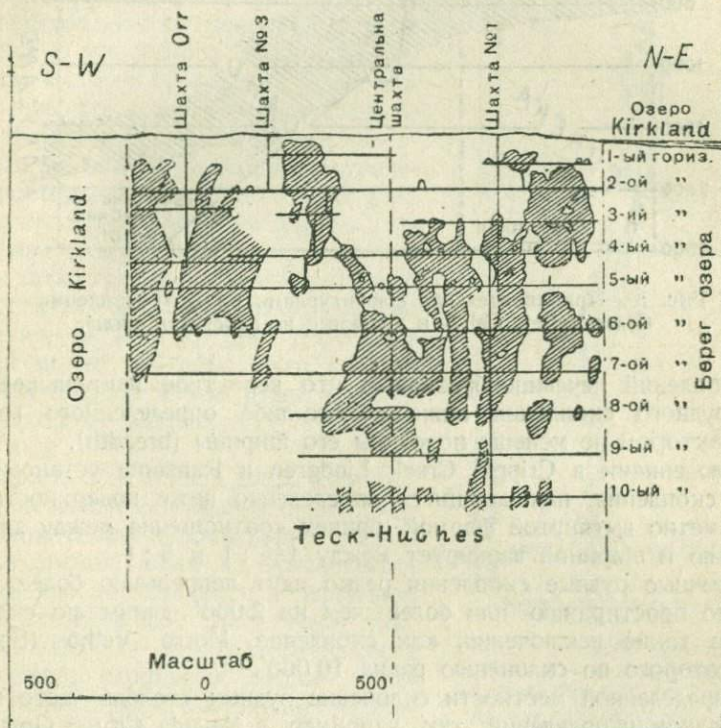


Рис. 69 В. Продольный разрез забоя в руднике Teck-Hughes (по D. L. Forbes).

столбы повторяются в местах пересечения этими жилами определенного пласта или дайки; такой пример мы видим в месте пересечения золотоносными кварцевыми жилами (Gympie, Queensland) определенных углистых пластов или, например, в Thames (New Zealand), где жилы пересекают мягкие и измененные андезиты. Многие рудные столбы следуют пересечениям жил или жил с трещинами.

Как бы ни были велики рудные столбы, они не продолжают до бесконечности, а оканчиваются на известной глубине, обычно постепенно выклиниваясь. Ниже окончания крупного рудного столба обычно находят небольшие почковидные массивы. Разведка может обнаружить второй столб, залегающий ниже первого, на той же трещине или черепицеобразно залегающий поверх параллельно идущей жилы. По достижении

значительной глубины руда обычно становится постепенно более бедной, но это явление нельзя рассматривать как строгое правило. Многие рудные скопления имеют чечевицевидную форму; в середине их находится ядро богатой руды, к краям же последняя становится беднее. Осмотрев 70 рудников, Н. С. Hoover пришел к заключению, что форма большин-

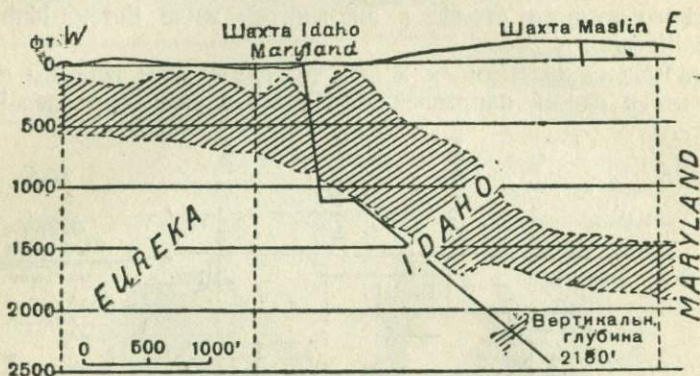


Рис. 70. Приблизительная конфигурация рудного скопления — Grass Valley, Cal. — в проекции на плоскость жилы.

ства скоплений чечевицеобразная и что вероятное наименьшее протяжение рудного скопления ниже какого-либо определенного горизонта будет фактором не меньше половины его ширины (breadth).

Наблюдениями в Cripple Creek Lindgren и Ransome установили, что рудные скопления, начинающиеся определенно ниже поверхности, обладают заметно вытянутой формой, причем соотношение между длиной по склонению и шириной варьирует между $1\frac{1}{2} : 1$ и $5 : 1$.

Первичные рудные скопления редко идут непрерывно более чем на 2 000' по простиранию или более чем на 2 000' длины по склонению. Имеются такие исключения, как скопление Morro Velho (Бразилия), длина которого по склонению равна 10 000'.

В определенной местности склонение рудных столбов часто преобладает в одном направлении; так, например, в Nevada City и Grass Valley скопления рудных столбов идут направо от наблюдателя, глядящего вниз по падению жилы. В другой местности можно наблюдать обратное: в одних столбах содержание ценного минерала изменяется прямо пропорционально, в других — обратно пропорционально раздувам и утолщениям жилы. Согласно часто приводимому правилу, рудные столбы следуют направлениям борозд скольжения на боковых стенках жилы, но в этом правиле имеются исключения.

Рудные столбы, обогащенные последовательной минерализацией. Хотя некоторые жилы на всем своем протяжении состоят из однородной руды, весьма часто, в особенности в мощных жилах, некоторые участки обогащены несравненно более резко. Эти участки могут следовать параллельно лежащему или висячему боку, середине жилы, или же перебрасываются с одной стороны на другую. Такие явления свидетельствуют о вторичном вскрытии жилы или брекчировании с последующим обогащением.

Поверхностно или вторично обогащенные рудные скопления. Нисходящие поверхностные воды разрушают и часто обогащают верхнюю часть месторождений. Нижние границы таких обогащенных поверхностных участков рудных месторождений зависят от положения уровня грунтовых вод. Вследствие обогащения в этих зонах развиты как окисленные руды, так и сульфиды, но обычно на разных горизонтах. Для поверхностных концентраций характерно горизонтальное распространение, в противоположность первичным скоплениям, в которых преобладают вертикальные рудные скопления. О минералогическом характере поверхностных оруденений будет подробно говориться в одной из последующих глав. Распространение поверхностных и вторичных образований приурочено к простиранию жил, но нередко распространяется и на боковые породы. Таким образом, на значительном протяжении по простиранию жилы могут концентрироваться богатые руды окисленной и обогащенной зон, но при углублении разведки может оказаться, что под непрерывной поверхностной рудой имеется лишь несколько маломощных первичных рудных тел.

Нередко в обнажениях вдоль жилы находят окисленные серебряные руды, представляющие собою концентрации первичного оруденения, вовсе не являющегося выгодным для эксплуатации в первичной зоне. К этому классу принадлежат также горизонтальные или пластообразные концентрации вторичных медных сульфидов (халькозина и ковеллина) образованных поверхностными нисходящими растворами в месторождениях меди вблизи уровня грунтовых вод. Первичное оруденение в одних случаях представляет собою промышленную руду, в других нет. При обширной площади оруденения их называют халькозиновыми покрывалами (chalcocite blankets).

Нисходящие растворы, несущие с собою металлы, могут случайно попасть в боковые породы и образовать здесь новые боковые тела окисленной руды.

Причины возникновения первичных рудных столбов. Рудные столбы образуются вследствие осаждения из пересыщенных растворов ценных минералов. Причины эти отчасти химического, отчасти механического характера:

1. Понижение температуры и уменьшение давления.
2. Благоприятный химический характер боковых пород.
3. Благоприятный физический характер боковых пород.

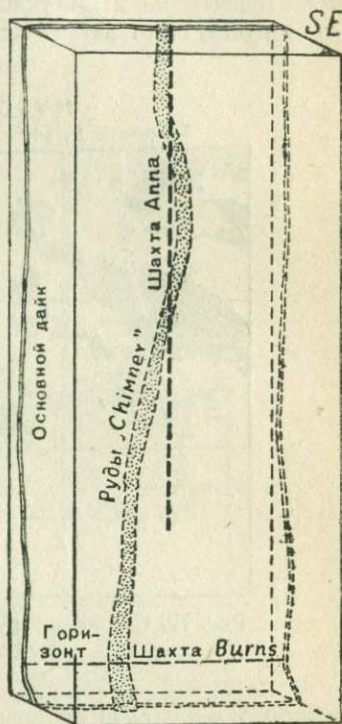


Рис. 71. Стереогрaмма рудной "трубы" — chimney Anna Lee Cripple Creek, Colo. Рудное скопление локализуется в месте пересечения дайки основной породы с трещиной (по V. G. Hills).

4. Пересеченность линиями тектонических нарушений.

Уменьшение давления и понижение температуры. Основной причиной образования руд в жилах и подобных им эпигенетических месторождениях в верхней зоне земной коры, вероятно, является то, что горячие растворы, содержащие металлы, поднимаются к поверхности и постепенно встречают на своём пути условия благоприятные для их осаждения. Первым из этих условий является понижение температуры. Если это соответствует действительности, то понятно, что по мере углубления

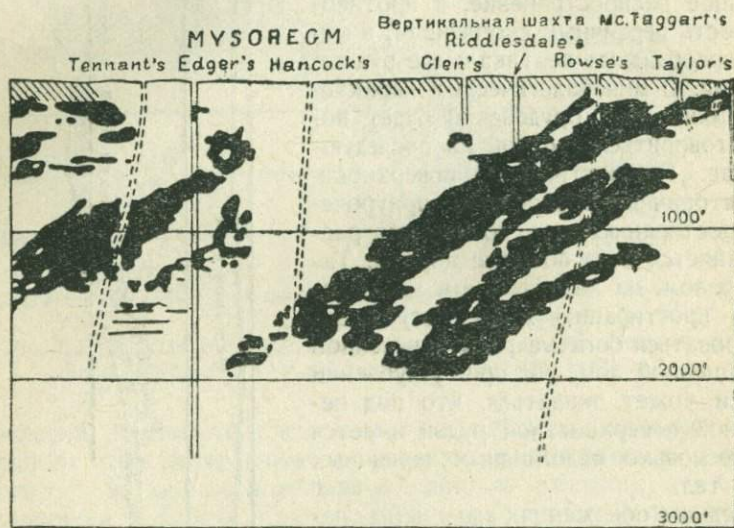


Рис. 72. Склонение рудных столбов в золото-кварцевой жиле, Kolar, India (по Т. А. Кичард).

рудной залежи руда становится все бедней и, наконец, оруденение вовсе исчезает³. В общем, это, без сомнения, соответствует действительности, но для многих веществ вертикальное пространство, в котором может иметь место отложение, чрезвычайно велико. Нам известно, что в Калифорнии золотосодержащий кварц отложился на пространстве 5 000' по вертикали; в Аляске и Bendigo (Австралия) расстояние примерно то же.

Это осаждение имело место на значительной глубине от поверхности (вероятно, несколько тысяч футов), и так как золотосодержащий кварц может также отлагаться в пределах верхней зоны, можно считать, что вертикальный предел не менее 9 000'. В вышеупомянутых местностях на самых нижних горизонтах руда обычно убогая, но в Аляске массы ее очень велики. Наиболее богатая руда безусловно отложилась близ поверхности, где мы и видим «бонанцы» третичных золотых и серебряных жил. Наиболее постоянные скопления золотосодержащих руд мы видим в жилах, образовавшихся при средней или высокой температуре. Примером может служить жила North Star in Grass Valley (California), прослеженная на 10 000' по падению при угле падения 20° (вып. III).

Постепенности обеднения здесь почти не наблюдается. Рудники Kolar (Индия) выработаны на глубину 6 000' по вертикали; рудные скопления здесь довольно правильны (рис. 72), содержание мало меняется.

Наиболее непрерывное из известных рудных тел находится в руднике Mogro Velho (Бразилия), где склоняющийся рудный столб выработан на глубину почти 7 000' по вертикали и на длину по падению до 10 000' (рис. 266). Для медных руд вертикальный предел отложения также весьма значителен, хотя в противоположность золоту и серебру они, видимо, отлагаются в наибольшем количестве на более низких горизонтах и при высоких температурах. С другой стороны, свинец, видимо, осаждается ближе к поверхности и при более низкой температуре; цинк занимает положение между медью и свинцом.

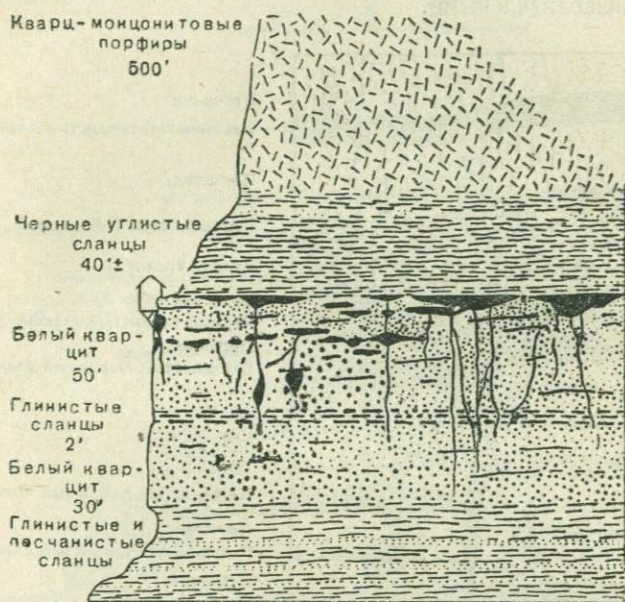


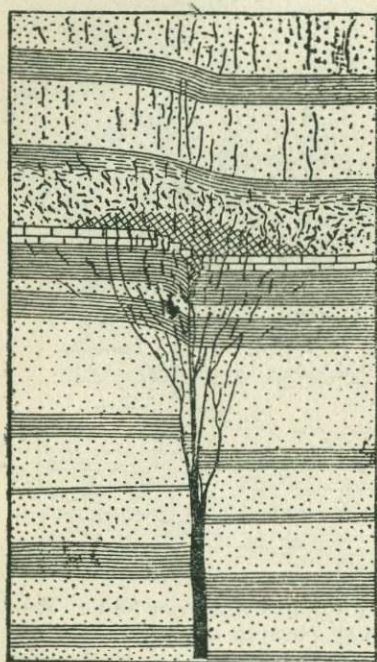
Рис. 73. Поперечный разрез рудника American Nettie, показывающий «рудные столбы» (черный цвет) под непроницаемым покровом глинистого сланца (по J. D. Irving).

Изложенные здесь соотношения объясняют, почему из наблюдений в отдельных рудниках мы получаем так мало исчерпывающих сведений относительно вертикальной последовательности отложения.

В жилах Cornwall в гранитных и боковых породах преобладают олово и вольфрам, тогда как медь отлагалась в менее горячей зоне глинистых сланцев, покрывающих гранитные батолиты. Свинцовые руды залегают на некотором расстоянии от интрузивного гранита. Во многих свинцовых рудниках наблюдается, что в пределах 700—3 000' от поверхности свинцовые минералы уступают место пириту и цинковой обманке. В ртутных рудниках руда часто становится убогой на глубине 1 000' от поверхности.

Зависимость отложения различных металлов от температуры, а следовательно и вертикального и горизонтального расстояния от источника минерализующих растворов, особенно подчеркивается многими исследователями⁴.

Характер боковых пород. Характер боковых пород нередко оказывает ярко выраженное влияние на рудные скопления, но не всегда легко установить, является ли это влияние химическим или механическим. В месторождениях замещения благоприятствующими породами обычно служат известняки и глинистые сланцы, но в районе Coeur d'Alene, где залегают свинцовые жилы, породой, наиболее легко поддающейся замещению сидеритом и галенитом, является кварцитовый сланец. В Freiberg (Саксония) благоприятной для замещения породой является серый гнейс; в красном гнейсе и слюдяном сланце жилы раскалываются или становятся непроизводительными.



- Песчаник.
- Песчаный глинистый сланец.
- Песчаник.
- Черный глинистый сланец.
- Рудная кровля.
- Слоистый известняк.
- Черный глинистый сланец.
- Песчаник.
- Песчаный глинистый сланец.
- Песчаник.
- Песчаный глинистый сланец.
- Песчаник.
- Песчаный глинистый сланец.
- Песчаник.
- Песчаный глинистый сланец.
- Песчаник.
- Песчаный глинистый сланец.

Рис. 74. Разрез жильной зоны и рудное тело, образовавшееся под непроницаемым пластом черного глинистого сланца.

Полагают, что углеродистые породы вследствие оказываемого ими восстановительного действия способствуют отложению; в связи с этим часто упоминают скопления золотоносного кварца в Cympie (Queensland), а также и то, что называют углеродистым «индикатором» в Ballarat (Victoria). К этим примерам можно прибавить всем известное замещение халькозином ископаемого дерева в некоторых типах медных месторождений, а также и влияние, предпочтительно оказываемое некоторыми нефтеносными сланцами на отложение свинцовых руд в Wisconsin. Значение углеродистых веществ в осаждении рудных растворов несколько увеличивается, но во многих случаях углеводы бесспорно оказывают благоприятное влияние на отложение руд⁶.

Жилы, проходящие через породы, содержащие пирит и прочие суль-

фиды, часто ими обогащаются. Примеры этому можно привести из Kongsberg (Норвегия), где серебрясодержащие жилы становятся продуктивными при пересечении серии сланцев с рассеянной пиритной минерализацией. В Ophir (Калифорния) золотосные кварцевые жилы становятся обогащенными при пересечении ими «железных поясов» пиритовых амфиболитов.

Там, где жила проходит через мощную свиту осадочных пород, она весьма часто расширяется и содержит богатые руды в известняках и бед-

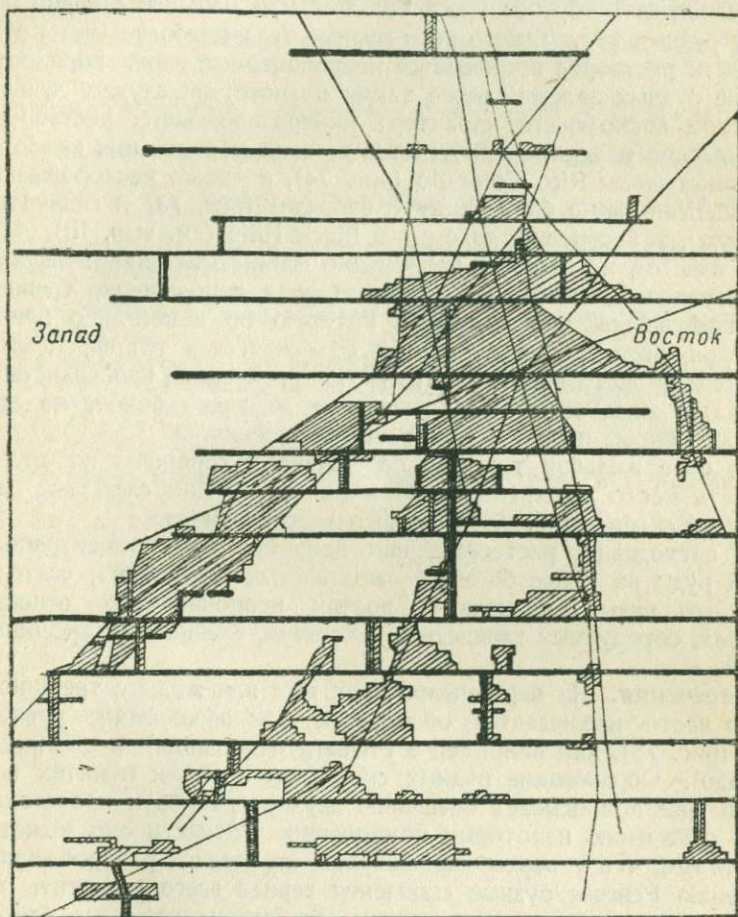


Рис. 75. Продольный разрез по жиле New Hoffnung, Freiberg (Германия), показывающий рудные столбы вдоль пересечений нескольких жил (по R. Becke).

ные руды в глинистом сланце и песчанике. Точно так же там, где мощная свита изверженных пород, как в районе San Juan (Колорадо), пересекается жилами, рудные горизонты развиваются в тех породах, которые по своим физическим и химическим свойствам наиболее благоприятны для развития трещин или замещения (рис. 192 и 197).

Риолиты и туфы не могут считаться благоприятной породой, так как

в них трещины нередко ветвятся и растворы растекаются по большим массам породы.

С другой стороны, такие породы, как андезиты и латиты, обычно благоприятствуют развитию рудных скоплений. Purington⁶ установил в горах San Juan брекчии, чрезвычайно благоприятные для отложения руд, содержащие весьма значительное количество железо-магнезиальных силикатов.

Непроницаемые перегородки. Все вышеперечисленные условия могут обуславливать образование в большей или меньшей степени горизонтальных рудных тел. Такого рода рудные тела наиболее часты в местах, где на пути растворов встречаются непроницаемые слои. Горизонтальное залегание рудных залежей ниже таких препятствий служит лучшим свидетельством восходящего характера минерализовавших растворов.

Прекрасной иллюстрацией тех же условий образования являются пластообразные жилы Rico Colorado (рис. 74), а также месторождение рудника American Nettie близ Ouray (Колорадо) (рис. 73) и силикатные золотые руды, замещающие доломит в Black Hills (см. вып. III). Непроницаемым пластом не является непременно глинистый сланец: перегородкой может служить глинистый жильный материал, заполнивший трещину, или дайка эффузивной породы, через которую по какой-либо причине не могла проникнуть трещина. Тем же объясняется и тот факт, что жильные минералы часто не распространяются за пределы пространства между примазками жильной глины висячего и лежащего боков, не проникая в боковые породы и не вызывая в них замещения.

Если одна жильная трещина пересечена и сброшена по другой, может иметь место отложение рудных минералов как следствие задержки циркуляции у сброса, т. е. частичного «застаивания».

При нисходящих растворах, как например при концентрации гематитовой руды из менее богатых «железистых формаций», часто наблюдается, что руды локализуются поверх непроницаемых оснований и в желобах, образуемых глинистыми сланцами, глинистыми трещинами или дайками.

Пересечения. На пересечении двух жил или жилы с трещиной чрезвычайно часто наблюдается обогащение или образование рудного скопления (рис. 75), как например в Freiberg (Саксония) и в Cripple Creek (Колорадо). Образование рудных скоплений в таких пунктах пересечения Van Hise приписывает смешению двух растворов и проистекающему из него осаждению некоторых компонентов. Отчасти оно может объясняться и тем, что у пересечения породы становятся раздробленными; по наблюдению Penrose рудные скопления вернее всего встретить там, где пересечение идет под острым углом, образуя клиновидные блоки, края которых легко обламываются. Хотя обогащение и весьма часто наблюдается на пересечениях, этот факт все же не является правилом; иногда на пересечении с не содержащей руду трещиной жила нередко становится разубоженной.

Присутствие таких крупных скоплений руды, какие можно видеть, например, в золотоносных кварцевых жилах Калифорнии, в Cripple Creek и в свинцовых рудниках Coeur d'Alene, нельзя объяснить всецело пересечениями или влиянием боковых пород.

Такие рудные скопления обычно считают результатом понижения температуры восходящих растворов на пути их циркуляции.

¹ C. R. Van Hise. Some principles controlling the deposition of ores. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 30, 1900, pp. 127—177.

T. A. Rickard. The formation of bonanzas in gold veins. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 31, 1902, pp. 1908—220.

The location of values in ore-bodies, etc. Дискусся J. D. Irving, F. C. Smith, Reno Sales, F. L. Ransome, H. V. Winchell, H. Sjögren, and W. Lindgren. „Econ. Geol.“ 3, 1908, pp. 143—154, 224—229, 326—330, 331—336, 425—427, 637—642; Idem, 4, 1909, pp. 56—61.

C. W. Purington. Ore horizons in the San Juan Mountains. „Econ. Geol.“ 1, 1905, pp. 129—133.

H. C. Hoover, The valuation of gold mines. „Eng. And. Min. Jour.“, May 19, 1904.

P. A. F. Penrose, Jr., Some causes of ore-shoots, „Econ. Geol.“ 5, 1910, pp. 97—133.

² W. Lindgren and F. L. Ransome. „Prof. Paper“ 54, U. S. Geol. Survey, 1906, p. 206.

³ T. A. Rickard. Persistence of ore in depth. „Trans. Inst. Min. and Met.“, 24, 1915, pp. 3—46, с дискуссией.

W. Lindgren. Ore deposition and deep mining, „Econ. Geol.“, 1, 1905, pp. 34—46.

F. L. Garrison. Decrease of value in ore-shoots with depth. „Trans. Canadian Min. Inst.“ 15, 1912, pp. 192—209.

J. F. Kemp. The influence of depth on the character of metalliferous deposits. „Compte rendu“, XII Session, Canada, Congrès géologique internat., 1914, pp. 253—260.

Malcolm Maclaren, Idem, pp. 295—304.

⁴ J. E. Spurr. A theory of ore deposition, „Econ. Geol.“, 2, 1907, p. 790.

L. De Launay. La métallogénie de l'Italie. Congrès géologique internat., Mexique, 1, 1906, p. 571. Также в „Gîtes Minéraux“, 1, Paris, 1913.

W. Lindgren. Processes of mineralization and enrichment in the Tintic mining district. „Econ. Geol.“ 10, 1915, p. 228.

⁵ W. P. Jenney. The chemistry of ore deposition. „Trans. Am. Inst. Min. Eng.“ 33, 1903, pp. 445—498.

⁶ C. W. Purington. Ore horizons in the San Juan Mountains, „Econ. Geol.“ 1, 1905, pp. 129—133.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Классификация по форме и веществу. Генетическая классификация месторождений полезных ископаемых по существу та же, что и классификация «геологических тел», излагавшаяся в гл. I настоящего труда, поэтому ей присущи все трудности, проистекающие от несовершенного понимания сущности геологических процессов. При ранних попытках систематизации накопленного материала по месторождениям полезных ископаемых всячески избегали этот трудный путь геологического построения классификации месторождений и в основу клали характер и род ископаемого, его использование и форму залегания. Такого рода классификации даются многими руководствами, даже новейшими; они бесспорно обладают некоторыми преимуществами, в особенности для горняка, химика или металлурга; для первых особенно важна форма месторождения, для вторых и третьих — изучение руд, содержащих определенные металлы.

По роду вещества и применению полезных ископаемых все месторождения можно классифицировать в следующем порядке:

- | | |
|--|---|
| 1. Строительные материалы | Камень, стекольный песок, породы, идущие на изготовление цемента, глина, асфальт. |
| 2. Горючие | Каменный уголь, естественный газ, нефть, торф. |
| 3. Абразивы | Корунд, гранат. |
| 4. Удобрения | Калийные соли, фосфориты, фосфатные пески. |
| 5. Драгоценные камни | Алмаз, опал, турмалин. |
| 6. Различные промышленные применения | Графит, бариты, бура, асбест, сера. |
| 7. Металлические руды | Железные, медные, золотые и серебряные, оловянные, алюминиевые и пр. |

Как бы ни была удобна такая классификация, совершенно очевидно, что она не может способствовать пониманию тех многообразных процессов, путем которых в природе образуются месторождения полезных ископаемых.

Самой ранней, и поныне не совсем еще оставленной, является классификация по форме геологических тел. Но форма месторождения тесно связана с его генезисом; даже в одной из самых старых классификаций, построенных на этой основе, а именно классификации Bernhard von Cott¹, чувствуется, что автору было трудно избежать генетических представлений, о чем свидетельствует, например, объяснение им понятия о жиле, которую он называет «выполненной трещиной».

Он разбивает рудные месторождения на следующие классы:

I. Правильно залегающие:

A. Пласты

B. Жилы

a. Обыкновенные трещинные жилы

b. Пластовые жилы

c. Контактные жилы

b. Чечевицеобразные жилы

II. Неправильно залегающие:

C. Штоки (неправильной формы массивы с ярко выраженными границами)

a. Наклонные

b. Вертикальные

D. Вкрапленности (неправильной формы массивы, переходящие в боковые породы).

Этой же системы классификации придерживаются и многие другие руководства, хотя и с некоторыми изменениями. В этом же роде и классификация J. A. Phillips в его трактате о рудных месторождениях, рассмотренная Н. Louis в 1896 г. De Launay² классифицирует месторождения согласно содержащимся в них элементам. Эта система хотя и не генетическая, но зато логическая, и ее отчасти придерживался автор, составляя указатель, помещенный им в виде приложения к настоящему труду.

Генетические классификации. Как с точки зрения теории, так и практики, наиболее желательной является классификация генетическая. При разведке и эксплуатации рудных месторождений горняк поневоле должен иметь представление о их происхождении, если он хочет, чтобы эксплуатация рудного тела велась рационально. Von Groddeck и Stelzner были первыми рудничными геологами, которые осознали важность для классификации генетического принципа и приложили его на деле. Тогда, конечно, не пришло время для введения генетической классификации, так как самое понятие о генезисе еще не приняло твердых и определенных форм. Stelzner совершенно правильно замечает, что на проходку глубоких шахт или длинных штреков горняк может решиться лишь только в том случае, если он имеет представление о теории происхождения рудного тела.

Истинный генезис многих месторождений до настоящего времени находится под сомнением. Но, по справедливому замечанию Groddeck и Stelzner, это можно сказать относительно всякой классификации. Такая неуверенность служит стимулом к дальнейшему изучению.

Автор не намерен подробно останавливаться на различных классификациях. Сведения относительно их читатель найдет в труде Kemp «Ore Deposits of the United States and Canada» (приложение 1), а также в трудах Von Groddeck, Stelzner, Pospelny, Wadsworth, Monroe, Kemp, Crosby, Hoefler, Spurr, Van Hise, Weed и многих других. Von Groddeck и вслед за ним Stelzner и Beck прежде всего различают, образовалось ли полезное ископаемое вместе с той породой, в которой оно залегает, или же было введено в ранее существовавшую породу. Первые минералы Stelzner называет сингенетическими, вторые — эпигенетическими. J. F. Kemp делит месторождения на I) месторождения магматического происхождения, II) месторождения, осадившиеся из растворов, и III) месторождения, отложившиеся из суспензий или оставшиеся после разрушения пород. Здесь также встречается затруднение, так как что такое магмы, как не растворы?

В качестве основы для своей классификации Beck отчасти пользуется классификацией Stelzner. В первом издании своего справочника «Die Lehre von Erzlagerstätten» в основу классификации им были положены сингенетическое или эпигенетическое происхождение. В издании, вышедшем в 1909 г., месторождения классифицируются, на основе различных фаз их генетической истории, следующим образом:

1. Магматические сегрегации
 2. Контактново-метаморфические рудные месторождения
 3. Трещинные жилы
 4. Пластовые залежи
 5. Штоки
 6. Вторично измененные
 7. Осадочные рудные месторождения
 8. Детритовые месторождения
- } Морфологические фации одной и той же генетической группы

Эта классификация хотя и лучше принятой Beck, но описание различных месторождений показывает, что несколько генетически различных типов произвольно подведены под один раздел.

Weed³ идет дальше; он устанавливает источник рудообразующих растворов. К первому классу он относит магматические месторождения, сегрегировавшиеся в магме; ко второму — рудные магматические эманации включая контактовые месторождения и оловянные жилы, к третьему — газОВО-водные или пневмато-гидатогеновые месторождения, образованные магматическими водами, смешанными с грунтовыми, к четвертому и самому малому классу он относит отложения поверхностных вод.

Примерно этой же схеме, которую нельзя назвать истинно генетической классификацией, следуют также Beyschlag, Krusch и Vogt (1909). Они подразделяют месторождения на 1) магматические; 2) контактовые (контактово-метаморфические); 3) жилы, выполнения трещин и метасоматические месторождения и 4) рудные залежи. В каждый из этих классов входит по нескольку групп, нередко не имеющих между собой ничего общего.

Классификация Beck и Berg (1922), казалось бы, мало чем разнится от предыдущей; она также объединяет в один класс многочисленные совершенно разные группы (как например под заголовками «рудные штоки» и «рудные пласты»).

P. Niggli (1925) и Schneiderhöhn (1925) делят месторождения магмати-

ческого происхождения следующим образом: 1) жидкомагматические; 2) глубинные, пегматитовые до пневматолитовых, до пирометасоматических; 3) глубинные, гидротермальные, 4) эффузивные (экструзивные). Эта попытка — выделить «глубинные» месторождения от «эффузивных» — вряд ли приемлема, но все же, по сравнению с предыдущей классификацией, здесь уже шаг вперед. К четвертому классу Schneiderhöhn прибавляет еще новый тип «подводных испарений» (submarine exhalation) — месторождений, содержащих магнетит, пирит и сидерит. Он также расширяет свою классификацию так, что в нее входят месторождения осадочного и метаморфического происхождения.

Наилучшая генетическая классификация месторождений полезных ископаемых, казалось бы, должна быть построена на основе геологических процессов. Месторождения полезных ископаемых образовались под действием магматических процессов, изменения, цементации, деформации, эрозии и отложения осадков. Сознвая это, Van Hise⁴ разбивает руды на следующие классы, являющиеся продуктом: 1) процесса отложения осадков, 2) изверженных процессов, 3) метаморфических процессов, куда входят почти все жилы и сродные им геологические тела, о которых составилось понятие, что они были отложены циркулирующими грунтовыми водами.

Надо полагать, что построение такой классификации, которая заслужила бы всеобщее одобрение, — дело невозможное. В конечном счете громаднейшее большинство месторождений образовалось путем физико-химических реакций в растворах, независимо от того, были ли последние водными, магматическими или газообразными. Исходя из этой точки зрения, единственным рациональным разделением месторождений на классы было бы следующее: 1) месторождения, образовавшиеся из ранее существовавших минералов путем механической концентрации, и 2) месторождения, образовавшиеся под действием реакций в растворах.

Генетическая классификация не должна ограничиваться установлением относительного периода отложения, т. е. имело ли оно место одновременно с образованием боковой породы или позже. Точно так же она не должна ограничиваться установлением того, какие именно силы вызвали это отложение: водные, магматические, газообразные растворы или осадочные, интрузивные или метаморфические процессы. Весьма важно установить, где имело место отложение руды — на поверхности или на известной глубине, в мелководье или в морских глубинах; это неоспоримо важно, но этого еще не достаточно.

Некоторые пытаются построить классификацию по способу отложения, т. е. замещения или выполнения пустот, но все эти попытки оканчиваются неудачей, вследствие того что оба эти процесса тесно связаны и разграничить их не представляется возможным.

Генетическая классификация должна определять границы отложения руды в каждом классе по температуре и давлению. Каждое месторождение должно рассматриваться как задача по физической химии, и для того, чтобы установить способ образования месторождения, достаточно разрешения этой проблемы (с необходимыми геологическими данными).

Мы не претендуем на то, что для такой классификации у нас в руках имеется исчерпывающий материал, но во всяком случае мы имеем несколько исходных точек. Путем опытов или наблюдением природы необходимо установить пределы существования каждого минерального вида.

Некоторые из этих видов «постоянны» при самых разнообразных условиях температуры и давления, как например флюорит, кварц и золото. Для других видов придется установить более узкие пределы. Убедиться в том, какие именно условия господствовали в период отложения руды, путем подбора данных относительно ассоциации минералов, последовательности отложения и предела стойкости компонентов месторождения.

Построение совершенной генетической классификации в настоящее время невозможно, вследствие того что для этого геологу пришлось бы принять определенное положение относительно проблем, которые пока еще не разрешены⁵.

Быть может, было бы лучше не ожидать слишком многого от физической химии, как бы ни были ценны ее услуги. Даже в простых системах возникают весьма значительные затруднения вследствие того, что помимо температуры и давления приходится учитывать также концентрацию, закон действия масс и время. Если система состоит из многочисленных компонентов, эти затруднения становятся почти непреодолимыми. Тем не менее полагают, что направление, взятое в настоящее время в области построения классификации сложных явлений отложения руд, является единственно правильным.

СХЕМА ПРЕДЛАГАЕМОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Детритовые и осадочные месторождения. В схеме, которой пользуется автор настоящего труда, имеются два главных раздела. В первый входят месторождения, образовавшиеся путем механических процессов концентрации. Он охватывает детритовые отложения, как например россыпи и кварцевые пески, образовавшиеся при умеренной температуре и не под столь сильным давлением.

Во второй раздел входит громадное большинство месторождений полезных ископаемых, возникших как следствие химических процессов концентрации. Многие важные процессы, как например те, следствием которых является образование залежей железных руд или фосфоритов, имеют место вследствие взаимодействия растворов в поверхностных водных горизонтах. Эти процессы могут носить неорганический характер или же протекают под влиянием живых организмов, причем почти всегда они происходят при умеренной температуре. Продукты этих процессов почти всегда смешаны с детритовым материалом. В еще не отвердевших пластах они могут оказаться обогащенными вторичными процессами; в тех же случаях, когда они подвергаются действию атмосферы, — процессами выветривания.

Другой класс месторождений образуется в среде поверхностных вод, вследствие испарения с последующим осаждением растворенных в них солей; такой вид отложений нередко называют «остаточными соляными отложениями». В такого рода месторождениях находят поваренную соль, гипс и соли борной кислоты.

Концентрация содержащихся в породах веществ. Процессы концентрации полезных ископаемых могут иметь место не только на поверхности или в среде поверхностных вод, но и в самих породах. Здесь мы имеем два случая: 1) вещества первоначально содержались в том же геологическом теле, в котором они теперь залегают, и 2) они могли быть принесены извне.

Против такой основы для подразделения можно возразить, что весьма трудно установить источник минерала или металла, но во многих случаях эта трудность перестала быть непреодолимой в результате многих познаний, приобретенных за последние годы. Конечно, еще существуют месторождения, относительно которых этот вопрос остается пока не решенным, но думается, что в самом недалеком будущем большинство спорных вопросов будет разрешено. Так например, никто не станет серьезно утверждать, будто бы золото, содержащееся в калифорнийских кварцевых жилах, выщелочилось из соседней боковой породы; с другой стороны, никто не отрицает, что залегающие в перидотитах окисленные никелесиликатные руды были раньше мелко вкраплены в эти породы.

Что касается веществ, залегающих в самом геологическом теле, то их концентрация могла осуществиться 1) путем разрушения пород и достаточного выветривания (т. е. поверхностными водами, содержащими кислород); 2) грунтовыми водами более глубокой циркуляции; и 3) процессами динамического и регионального метаморфизма.

Остаточное выветривание. Разрушение пород приводит к уничтожению пород как единиц; они механически и химически разлагаются и их компоненты перераспределяются в новые комбинации. В разрушающемся массиве некоторые компоненты концентрируются или осаждаются; детрит (обломки) смывается и уносится в реки, озера и океаны, где и отлагается; растворимые компоненты уносятся в более крупные бассейны и там, быть может, осаждаются, принимая различные формы.

В действительности не все без исключения осадочные месторождения произошли из разрушенных пород; каменный уголь косвенным образом образовался из содержащегося в атмосфере углерода; известная часть осадков представляет собою вулканический пепел; некоторое количество растворенных веществ приносится из глубин земной коры испарениями магматических эрупций и восходящими водами.

Процессы отложения осадков и разрушения пород протекают при умеренной температуре и под относительно небольшим давлением. Вновь образовавшиеся минералы обычно содержат значительное количество воды. При температуре ниже 0° С месторождения полезных ископаемых не образуются, исключая случаи, когда замерзание воды замедляется быстрыми течениями или находящимися в растворе солями. Лишь немногие месторождения образовались при температуре свыше 50° С, и то только относящиеся к периоду эруптивной деятельности, испарения в мелководных озерах пустынных местностей, или будучи связаны с процессами окисления пиритовых пород. Давление редко выше обыкновенного атмосферного, но в месторождениях морских глубин или в глубоких озерах давление могло быть значительно выше. При низкой температуре такое повышенное давление, видимо, мало отразилось на образовавшихся ассоциациях минералов.

Воды глубинной циркуляции. Многие месторождения образовались под действием поверхностных вод глубокой циркуляции, но относительно некоторых из них мнения расходятся. Медь может выщелачиваться из зеленокаменных пород и руд этого металла, отлагаясь в виде жил, залегающих в тех же породах. Гематит (например в районе Верхнего озера) может концентрироваться из окружающей бедной «железной формации». В качестве других примеров можно привести барит, магнетит и серу.

Региональный метаморфизм. Агентами 'регионального метаморфизма являются развиваемые в определенном направлении усилия, причем изменения пород, как многие полагают, протекают без достаточного количества воды и сопровождаются незначительной концентрацией металлов. Образуются такие породы, как плотные или глинистые сланцы, или такие минералы, как гранат или графит. При статическом метаморфизме температура и давление значительно выше по сравнению с поверхностными условиями. Региональный метаморфизм протекает на большой глубине под значительным давлением и при относительно высокой температуре и может привести к полной перекристаллизации пород.

Привнесенные руды, не связанные с изверженными породами. В большинстве случаев наблюдается привнос ценных элементов в породу извне, как это иллюстрируется большинством месторождений металлов. Такого рода руды залегают в трещинах или образуют замещения по трещинам, вообще, в зонах и условиях, благоприятных для активной циркуляции рудоносных растворов. В течение долгого периода времени господствовало мнение, что металлы в трещинных жилах происходят из окружающей породы, и лишь в настоящее время этот взгляд в большинстве случаев считается ошибочным.

Некоторые металлические руды встречаются вне всякой видимой связи с изверженными породами. Ассоциации минералов этих месторождений свидетельствуют об отложении при умеренной температуре и не столь значительном давлении; температура вряд ли превышала 100° C. К этому классу относятся некоторые свинцово-цинковые месторождения, залегающие в песчаниках, столь часто встречающихся во всех странах света. Большинство геологов относят этот тип месторождений к образованиям, связанным с деятельностью поверхностных вод на относительно небольшой глубине.

Считают, что металлы были выщелочены из соседних осадочных пород и минерализованные таким путем воды после относительно короткого пути циркуляции отлагали в трещиноватых участках пород растворенные компоненты; в такого рода месторождениях золота и серебра обычно мало.

Месторождения, генетически связанные с изверженными породами. Месторождения этого обширного класса наблюдаются поблизости или внутри массивов изверженных пород как результат процессов постинтрузивной фазы. По общему мнению геологов, эти месторождения отложены горячими восходящими водами, хотя относительно источников происхождения вод, а также и растворенных в них металлов мнения расходятся. Некоторые считают эти воды и растворенные в них металлы эманациями остывающей магмы; другие полагают, что воды атмосферного происхождения, нагреваясь на путях циркуляции, вблизи не совсем остывших массивов изверженных пород растворяли содержащиеся в последних металлы. Большинство, однако, разделяет взгляд на ювенильное происхождение вод и постепенное смешивание их с метеорными водами и растворимыми солями, по мере продвижения к поверхности.

К этому классу относятся почти все месторождения металлов в области Кордильер. Этот класс подразделяется на несколько групп, согласно ассоциации минералов и геологических соотношений. В первую группу входят руды, отложившиеся на малой глубине; температура здесь относительно низкая, быть может, в пределах $50-200^{\circ}$ C; давление вряд ли

превосходит 100 ат. Примерами могут служить золотоносные и сереброносные жилы в Топорah (Невада), золото-теллуристые жилы Cripple Creek и ртутные жилы Калифорнии. Это все эпитермальные месторождения.

Ко второй группе относятся месторождения, образовавшиеся восходящими растворами на средних глубинах, примерно 5 000—10 000', при температурах в пределах 200—300° С и под соответственно возрастающим давлением. Наблюдаемые в настоящее время выходы на дневную поверхность обнажены эрозией; мы их видим почти всегда в интрузивных телах или вблизи их. В качестве примеров можно привести золотоносные кварцевые жилы Калифорнии и метасоматические пиритовые месторождения Lead-Wille. Это — мезотермальные месторождения.

К третьей группе месторождений большой глубины относятся жилы и месторождения замещения. Их образование связано с более высокой температурой, но в большинстве случаев ниже 575° С, т. е. температурной точки кристаллизации кварца. Давление было, вероятно, очень большое. К этой группе, образованной, говоря с достаточной достоверностью, продуктами магматических эманаций, принадлежат касситеритовые жилы, некоторые золотоносные кварцевые жилы апалачского типа и турмалино-медные жилы. Залегая в известняках, месторождения этого типа содержат известково-железистые силикаты. Это — гипотермальные месторождения.

Месторождениями, образованными непосредственно магматическими эманациями, являются контактово-метаморфические, залегающие в карбонатных породах на контактах с изверженными породами. Они содержат окислы, как например магнетит и спекуларит, вместе с сульфидами меди, цинка и железа; ассоциация минералов характерна для пирометасоматизма.

Эманации эффузивных магм отлагаются в виде продуктов возгонки и не представляют большого экономического значения.

Необходимо отметить, что все эти группы связаны между собою постепенными переходами, а также и то, что высокая температура не всегда пропорциональна глубине; под влиянием магматических интрузий и эффузий изотермальные кривые могут оказаться отнесенными далеко вверх по направлению к поверхности земли.

Продукты магматической дифференциации. Последний класс — это месторождения, образовавшиеся концентрацией растворов в жидкой магме при наивысшей температуре и под наибольшим давлением. Сюда входят сегрегированные в магмах окислы или сульфиды, как например железные руды Kiruna в северной Швеции, титано-железные руды Адирондакс или медно-никелевые руды Sudbury. Сюда же относятся пегматитовые дайки, содержащие самоцветы и редкие металлы и считающиеся сегрегациями остывающих гранитных магм. В противоположность месторождениям магматические пегматиты образовались при сравнительно невысокой температуре — вероятно, в пределах 500—800° С, но при весьма большом давлении.

Метаморфизм и поверхностное обогащение месторождений. Предлагаемая классификация исходит из положения, что месторождения не пережили изменения тех условий, при которых они первоначально образовались. В естественных природных условиях химические изменения, как правило, начинаются сразу же за прекращением действия агентов, приведших к образованию месторождения. Это в особенности относится

к месторождениям осадочного происхождения, так как цементация, отвердевание и различные геохимические процессы начинаются почти немедленно за отложением. Однако, такого рода изменения не принято называть метаморфизмом.

Многие месторождения полезных ископаемых чрезвычайно сильно изменились по сравнению с первоначальным своим состоянием. Под действием процессов динамометаморфизма каменный уголь мог превратиться в антрацит, а отложения лимонитовых руд — в магнетит. Под влиянием регионального метаморфизма месторождения могли быть нарушены или рассланцованы. Наибольшие же изменения могли произойти под действием поверхностных вод. Окисляющие действия поверхностных вод, так же как и грунтовых, содержащих несколько меньше свободного кислорода, производят совершенно особые модификации и нередко значительное обогащение месторождений.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ⁸

1. Месторождения, образовавшиеся механическими процессами концентрации (температура и давление умеренны).

II. Месторождения, образовавшиеся химическими процессами концентрации (температура и давление варьируют в широких пределах).

A. В поверхностных водах:

- | | | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|--|
| 1. Взаимодействием растворов: | } | а) неорганическими реакциями | } Температура от 0° до 7°С ±
Давление от среднего до сильного |
| | | б) органическими реакциями | |
| 1. Испарением растворителя | | | |

B. В горных породах:

- | | | | |
|---|---|---|--|
| 1. Концентрацией веществ, присутствующих в самих породах: | | | |
| а) концентрацией при выветривании и разложении пород близ земной поверхности | } | } Температура от 0° до 100°С ±
Давление среднее | |
| б) грунтовыми водами глубокой циркуляции | | | |
| с) динамическим и региональным метаморфизмом | } | } Температура от 400°С ±
Давление высокое | |
| | | | |
| 2. Концентрацией веществ, посторонних вмещающим горным породам: | | | |
| а) генезис независимый от магматической деятельности циркуляцией атмосферных вод на малой и средней глубине | } | } Температура до 100°С ±
Давление среднее | |
| б) генезис, связанный с магматической деятельностью | | | |
| а. Горячими восходящими водами неопределенного происхождения: | | | |
| 1. Отложение и концентрация на малой глубине. Эпitherмальные месторождения | } | } Температура от 50 до 200°С ±
Давление среднее. | |
| 2. Отложение и концентрация на средней глубине. Мезотермальные месторождения | | | |
| 3. Отложение и концентрация на большой глубине и под большим давлением. Гипотермальные месторождения | } | } Температура от 300 до 500°С ±
Давление очень высокое | |
| | | | |
| б. Непосредственными магматическими эманациями: | | | |
| 1. Из интрузивных тел. Контакт-метаморфические и пирометасоматические месторождения | } | } Температура, вероятно, от 500 до 800°С ±
Давление очень высокое. | |
| | | | |

- | | | |
|---|---|---|
| 2. Из эффузивных тел. Продукты
возгонки, фумаролы. | } | Температура от 100 до 600° С |
| | | Давление от атмосферического
до среднего |
| С. Процессами дифференциации магмы | } | Температура от 700 до 1500°С± |
| а) Собственно магматические ме-
сторождения | | Давление очень высокое |
| б) Пегматитовые | { | Температура около 575°С± |
| | | Давление чрезвычайно высокое |

¹ Die Lehre von den Legestätten, Freiberg, 1859.

² L. De Launay. Gites Minéraux et Métallifères. 3 vols, Paris, 1913.

³ W. H. Weed. В „Ore deposits“ дискуссия, заимствованная из „Eng. and Min. Jour.“, New York, 1903, pp. 20—23.

⁴ C. R. Van Hise. A treatise on metamorphism. „Mon. 47, U. S. Geol. Survey 1904.

⁵ T. Crook. The genetic classification of rocks and ore deposits. „Mineralog. Mag.“ London, 17, 1914, pp. 55—85.

⁶ Представлена Вашингтонскому геологическому обществу, 10 мая 1911 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие редактора русского перевода	3
Глава I. Экономическая геология	5
Распределение элементов в земной коре	6
Месторождения полезных ископаемых	11
Техно-промышленные определения	13
Цена на металлы	16
Продукция руды и металла	17
Вес и меры	18
Глава II. Образование минералов	22
Растворение и осаждение	22
Глава III. Атмосфера, гидросфера и подземные воды	
Введение	28
Атмосфера	28
Гидросфера	29
Подземные воды	30
Глава IV. Циркуляция подземных вод	32
Глава V. Состав подземных вод	41
Введение	41
Карбонатные воды в изверженных породах	41
Карбонатные воды в осадочных породах	42
Хлористые воды	43
Хлористые воды в изверженных породах	46
Сернокислые воды в осадочных породах	48
Кислые, сернокислые воды в изверженных породах	50
Содовые воды в осадочных породах	51
Содовые воды в изверженных породах	52
Воды, содержащие сернистый натрий	54
Резюме	54
Интерпретация анализов вод	55
Рудничные воды	56
Глава VI. Месторождения, отложенные минеральными источниками на поверхности	63
Глава VII. Связь, существующая между минеральными месторождениями и минеральными источниками	70
Глава VIII. Происхождение подземных вод	74
Подземные воды метеорного происхождения	74
Магматические или ювенильные воды	76
Глава IX. Химическая работа подземных вод	82
Метаморфические зоны и минеральные месторождения	82
Подземные температуры	90
Глава X. Магма и ее отношение к рудным месторождениям	96
Определение и состав магмы	96
Кристаллизация магмы	97

	Стр.
Причины вулканизма	100
Дифференциация магм	100
Отношение вулканов и излияний лавы к рудным месторождениям	103
Отношение интрузивных магм к минеральным месторождениям	105
Общий обзор рудных месторождений магматического происхождения	107
Зональная теория	109
Последовательность образования минералов в рудах	111
Характер растворов, образующих рудные месторождения	112
Глава XI. Нарушения рудных месторождений	117
Складки	117
Сбросы	120
Общая терминология	122
Главнейшие подразделения сбросов	123
Глава XII. Открытые пустоты в породах	132
Происхождение пустот	132
Глава XIII. Форма и структура рудных месторождений	140
Особые соотношения жил	142
Глава XIV. Текстура рудных месторождений	152
Выполнение и замещение	152
Текстура эпигенетических месторождений	154
Глава XV. Рудные скопления — столбы (ore shoots)	165
Глава XVI. Классификация месторождений полезных ископаемых	176
Схема предлагаемой классификации	180
Классификация месторождений полезных ископаемых	185

Редактор *В. П. Некрасов*.
 Сдано в набор 6/V 1934 г.
 Формат 62×94¹/₁₆.
 Уполн. Главлита № В-87542.

Изд. № 305. Бум. л. 6¹/₈.
 Тираж 8000—авт. л. 16³/₄.

Технический редактор *Д. Фрейман*.
 Подписано к печати 5/VII 1934 г.
 Тип. вк. в 1 б. л. 110.240.
 Заказ № 2701.

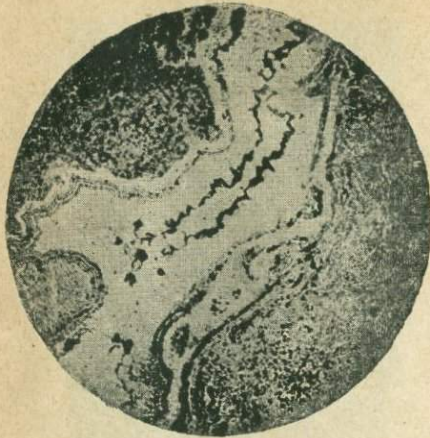


Рис. 4. Шлиф. Халцедоновые отложения источника Steamboat Springs (Nevada); можно видеть коллоформную структуру. Белый цвет — микрокристаллический кварц. Увеличение в 18 раз.



Рис. 5. Шлиф в обыкновенном свете: халцедоновые отложения источника в De Lamar (Idaho); можно видеть остатки растений. Увеличение в 35 раз.

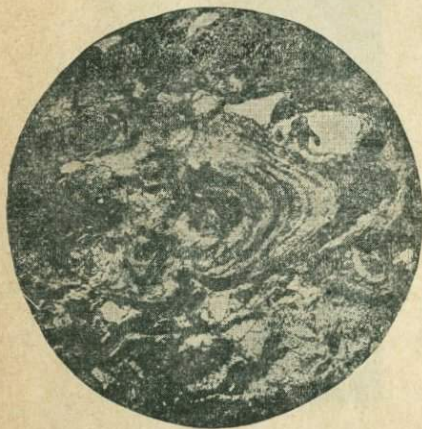


Рис. 6. Шлиф. Опал с коллоформной структурой Yellowstone, National Park. Увеличение в 22 раза (заимствовано у Н. С. Boydell „Econ. Geol.“).

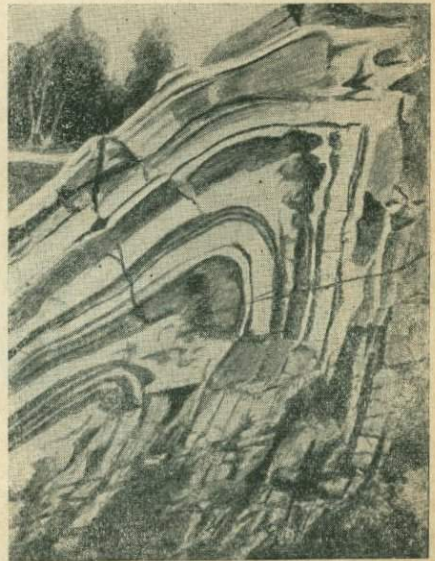


Рис. 17. Опрокинутая антиклиналь кристаллического известняка, Lenox, Mass., иллюстрирующая утолщение пластов и их разрыв в пунктах перегиба (по Т. Nelsen Dale).

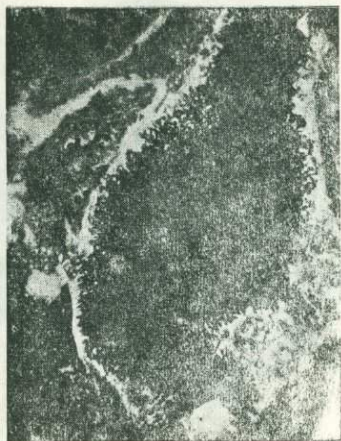


Рис. 35. Микрофотография базальта, показывающая пустотку, выполненную эпидотом, амфиболом, кальцитом и самородной медью (черный цвет), Lake Superior. Увеличение в 20 раз.

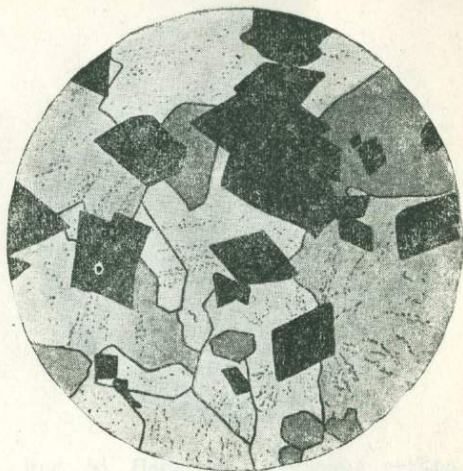


Рис. 51. Шлиф, иллюстрирующий нормальную текстуру кварцевого выполнения.

Черный цвет — арсенопирит; остальное идиоморфный кварц со включениями. Увеличение в 42 раза. Золотокварцевая жила. Cross Valley, California.

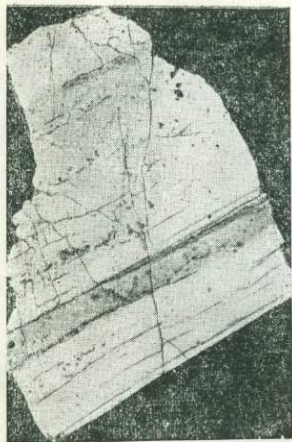


Рис. 52. Образец кварца из Nevada City, California, показывающий полосчатую структуру, образовавшуюся вследствие расланцевания. $1/2$ натуральной величины.

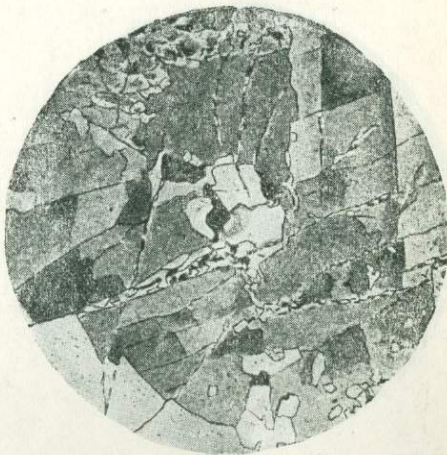


Рис. 53. Шлиф жильного кварца из Nevada City, California, в котором наблюдаются трещинки, раздавливание и начало развития полосчатой структуры. Увеличение в 7 раз. Скрененные никели.

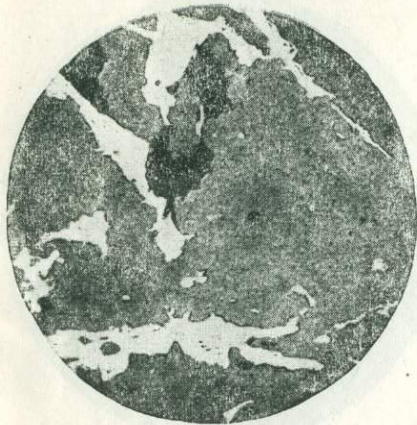


Рис. 55. Жилки замещения галенитом (белый цвет) в криптокристаллическом кварце (темносерый цвет) с жеодами (черный цвет). Tintic, Utah. Увеличение в 7 раз.



Рис. 56. Перистый свинцовый сульфид (белый цвет), замещающий галенит. Tintic, Utah. Увеличение в 24 раза.

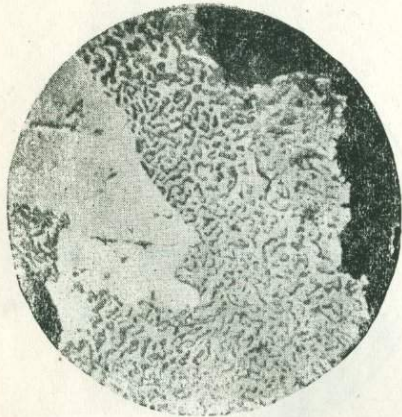


Рис. 57. Галенит (светлосерый цвет), замещенный теннантитом и пиррозитом ($9Ag_2S \cdot As_2S_3$) (темносерый цвет) в криптокристаллическом кварце. Tintic, Utah. Увеличение в 171 раз.

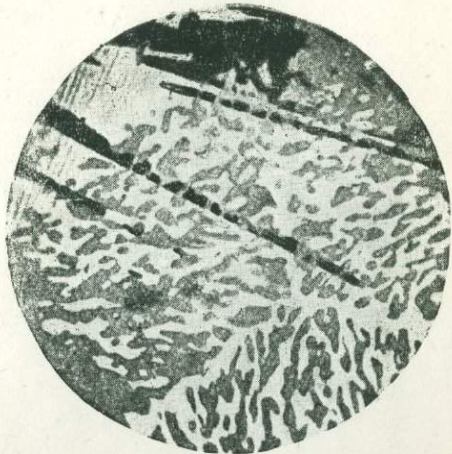


Рис. 58. То же замещение, что и на рис. 57, с увеличением в 512 раз. Следует отметить, что пластинки более раннего барита (черный цвет) замещены не галенитом, а только позднейшим теннантитом и пиррозитом.

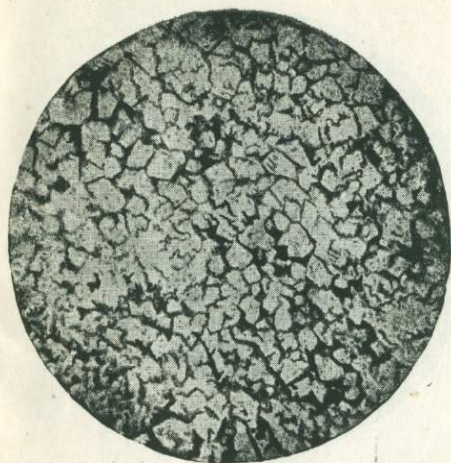


Рис. 59. Шлиф доломита, полностью окварцованного, но сохранившего структуру и кристаллическую форму (по J. D. Irving).



Рис. 60. Начальное окварцевание известняка. Aspen, Colo.

Белый цвет — кристаллы кварца с мелкими включениями известняка. Увеличение в 24 раз.



Рис. 61. Окварцованный известняк — джаспероид. Aspen, Colo; виден только кварц; в некоторых зернах мелкие включения кальцита; николи скрещены. Увеличение в 22 раза.



Рис. 62. Замещение турмалином свежего зерна андезина. Рудник Meadow Lake, Nevada County, Col.

t — турмалин, *f* — андезин, *e* — эпидот, *s* — серицит. Увеличение в 50 раз.

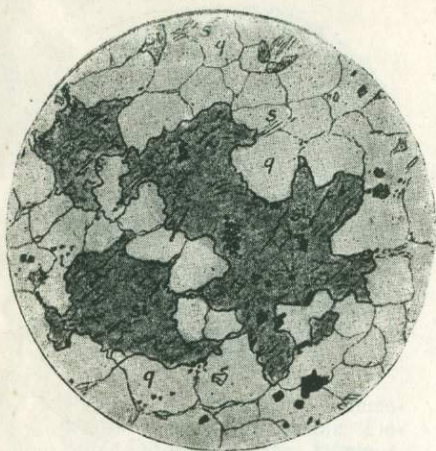


Рис. 63. Сидерит с пиритом и галени-
том, замещающие кварц. Рудник He-
line and Frisco, Coeur d'Alene, Idaho.
q—зерна кварца; *s*—серцит; *s'*—сидерит; черный
цвет — галенит и пирит. Увеличение в 100 раз.

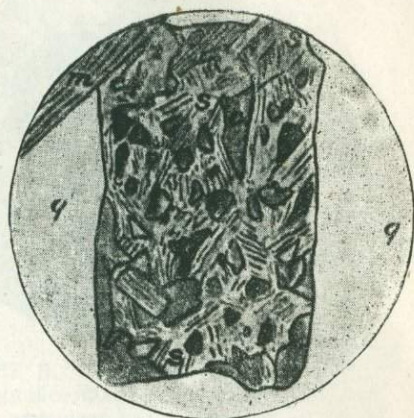


Рис. 64. [Кристалл андезина в гранодио-
рите, замещенный серицитом и каль-
цитом. Жила Pinetree, Ophir, Placer Co-
unty, Col.

q—кварц; *m*—мусковит; *c*—кальцит; *s*—серицит.
Увеличение в 80 раз.

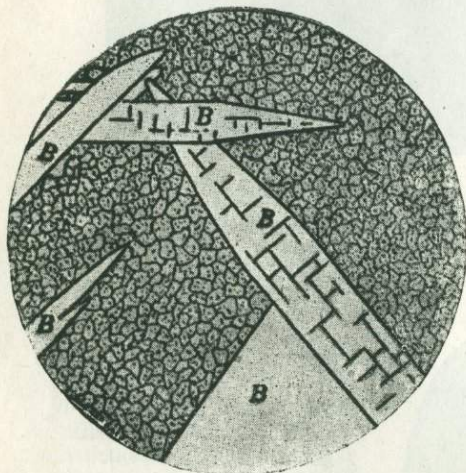


Рис. 65. Барит

B, замещающий серый, тонкозернистый извест-
няк *L. Ouray, Colo* (по *J. D. Irving*).

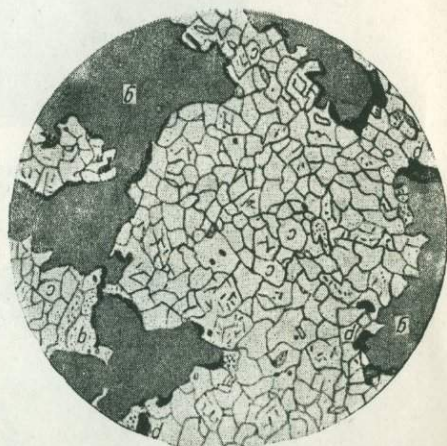


Рис. 66. Галенит, замещающий кристал-
лический доломит. Рудник Elkhorn, Мон-
тана.

g—галенит; *p*—пирит; *c*—кальцитовые зерна в извест-
няке; *q*—вторичный кварц. Увеличение в 15
раз.

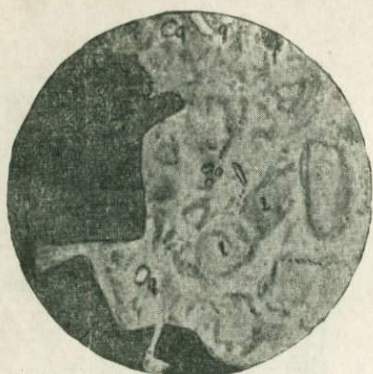


Рис. 67. А. Флюорит, замещающий известняк. Рудник Florence Judith Mountains, Montana.

f—флюорит; *l*—известняк; *q*—вторичный кварц. Увеличение в 7 раз.



Рис. 67. В. Жилы флюорита в Иллинойсе. Флюорит (темный цвет) замещает кальцит. Скрещенные николи (по L. Currier).

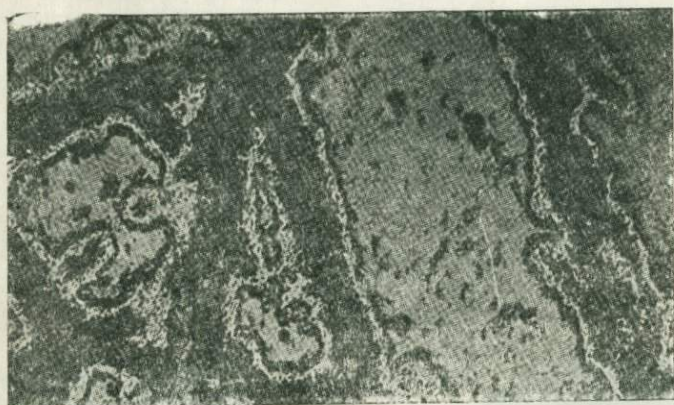


Рис. 68. А. Шлиф, показывающий каемку аргентита, замещающего сфалерит по периферии. Увеличение в 7 раз.

Рис. 68. В. Шлиф, показывающий кольцо сфалерита, замещенного внутри галенитом и защищающего галенит от замещения пираргиритом; рудник Premier В. С. Увеличение 60 раз (по W. Burton).



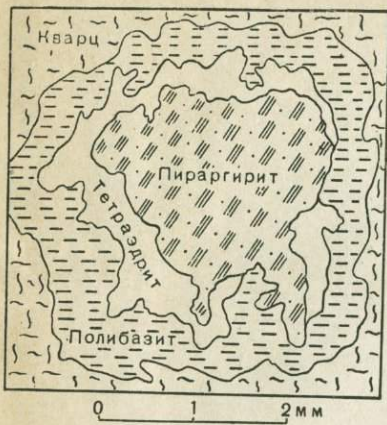


Рис. 68 С. Зарисовка со шлифа, представляющая центростремительное замещение тетраэдрита полибазитом и центробежное замещение того же минерала пираргиритом, оставляющим внешний стов тетраэдрита. Рудник Smuggler Union, Colo (по M. Hurst).



Рис. 68 D. Шлиф, представляющий точечные включения халькопирита в сфалерите. Черный цвет — сидерит. Район Siegen (Германия). Увеличение в 340 раз (по H. Schneiderhöhn).



Рис. 68 E. Шлиф, представляющий рубцы халькозина в борните Bristol, Conn. Увеличение в 320 раз (по W. L. Whitehead).

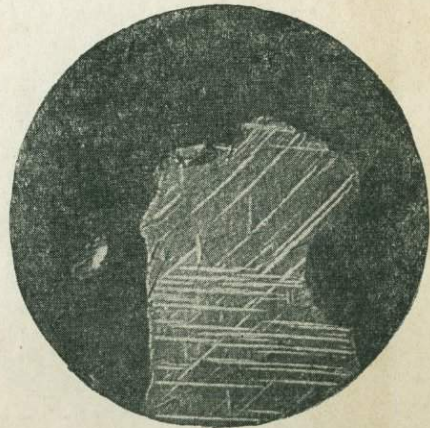


Рис. 68 F. Линии халькопирита, выполняющего трещины в борните. Замещение или несмешиваемость. Рудник Engels, Калифорния.

8234

53

81-59

8988

А Н Н О Т А Ц И Я

Классическая книга американского ученого представляет собою почти исчерпывающее описание месторождений полезных ископаемых на земном шаре (кроме нефти и угля). Все описания месторождений разбиты на генетически однородные группы, которые в свою очередь являются членами генетически обоснованного ряда физико-химических и геологических явлений, происходящих на земной коре. Последовательно рассматриваются: предмет экономической геологии, законы распределения элементов в земной коре, процессы концентрации и технические особенности различных руд. Детально рассматриваются в свете современных знаний процессы минералообразования и вопрос о магме и ее отношении к минеральным месторождениям. Большая часть книги отведена описанию отдельных генетических групп и типов месторождений и полезных ископаемых.

В первый выпуск входит вся общая часть, рассматривающая процессы распределения элементов и образования минералов, распределение и циркуляцию подземных вод, состав подземных вод в той или иной геологической среде, проявление различного вида источников на поверхности, отношение минеральных источников к минеральным месторождениям, происхождение подземных вод и их химическая работа. Систематическому рассмотрению подвергнут вопрос о магме и ее отношении к минеральным месторождениям, формы и проявления сил складко- и сбросообразования, структуры и текстуры минеральных месторождений. Выпуск завершается главой о принципах классификации месторождений.

Книга будет использована не только в качестве учебного пособия для вузов геолого-разведочной специальности, но и инженерами-практиками при разведке и разработках месторождений полезных ископаемых, при работе над вопросом установления их генезиса.