



О С Н О В Ы
ГЕОХИМИЧЕСКИХ
М Е Т О Д О В
ПОИСКОВ РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Методическое пособие

1 9 6 3 • Л Е Н И Н Г Р А Д

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ И ОХРАНЫ НЕДР СССР
Всесоюзный научно-исследовательский институт методики и техники разведки
/ В И Т Р /

550,84

ОСНОВЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ПОИСКОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
(методическое пособие)

Часть II.

Рассеянное состояние элементов и его
прикладное значение

Ореолы первичного рассеяния рудных
месторождений

Ленинград
1963



16348
1490

Составил Н.И. САФРОНОВ

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
Глава II. Ореолы первичного рассеяния рудных месторождений.....	5
Определение и общие сведения.....	5
§1. Ореолы первичного рассеяния собственно магматических (эвмагматических, протоматматических) месторождений.....	7
§2. Ореолы первичного рассеяния осадочных месторождений.....	II
А. Общие сведения по осадочному рудообразованию.....	II
I. Собственно осадочные месторождения.....	I2
II. Эффузивно-осадочные месторождения.....	I7
Б. Общие сведения по ореолам первичного рассеяния осадочных месторождений.....	18
§3. Ореолы первичного рассеяния постмагматических месторождений	22
А. Общие сведения и определения.....	22
Б. Основы теории образования ореолов первичного рассеяния постмагматических месторождений.....	23
В. Примеры практики.....	53
Г. Выводы и заключения.....	78
§4. Ореолы первичного рассеяния метаморфических и других месторождений.....	78
Общее заключение по ореолам первичного рассеяния	79
Л и т е р а т у р а	80

ГЛАВА II. ОРЕОЛЫ ПЕРВИЧНОГО РАССЕЯНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Определение и общие сведения

Как известно, естественным состоянием элементов, особенно рудообразующих, является рассеяние. В этом состоянии внутренняя энергия системы минимальна, а следовательно, и система элементов наиболее устойчива. С этой точки зрения месторождения полезных ископаемых могут рассматриваться как положительные геохимические аномалии-концентрации во всеобщем поле рассеяния, возникшие благодаря стечению определенных обстоятельств (благоприятные геологические структуры, соответствующая физико-химическая обстановка, вмешательство внешних, по отношению к полю рассеяния, источников энергии того или иного происхождения). В таком случае рудообразование, в широком смысле слова, с энергетической точки зрения является результатом взаимодействия двух противоположных процессов — естественного стремления элементов к всеобщему рассеянию и направленного, упорядочивающего действия внешней концентрирующей силы. В результате этого известная часть массы элементов, вовлеченных в общий процесс рудообразования, неизбежно должна вырваться из самого очага рудоотложения и рассеяться во вмещающих породах, образуя видимые (минеральные), или невидимые (безминеральные) оторочки собственно рудных тел. Заметим, что относительные количества масс элементов, ускользающих во вмещающие породы, в различных случаях будут различными в зависимости от многих факторов: генезиса и условий образования месторождения, напряженности процесса рудоотложения, характера вмещающих пород и т.д.

Сказанное позволяет сделать следующее определение.

Ореолами первичного рассеяния месторождений называются прилегающие к руде участки вмещающих коренных пород, характеризующиеся повышенными содержаниями рудообразующих элементов, возникающими в прямой, генетической связи с процессами образования месторождений.

Формы ореолов первичного рассеяния различны и находятся в связи с генезисом и формой рудных тел, проницаемостью вмещающих пород и развитием в них ослабленных зон. Размеры ореолов также зависят от перечисленных факторов и заключены в пределах от единиц-десятков сантиметров и до многих десятков — сотен метров. В ореолах содержания ореолообразующих элементов падают по направлению к периферии, т.е. наблюдаются более или менее выраженные закономерные градиенты содержаний. Рудное тело совместно с сопровождающим первичным ореолом приобретает значительно большие размеры и, таким образом, представляет для обнаружения значительно более легкую цель, нежели промышленное рудное тело само по себе. Это обстоятельство и определяет практическую значимость ореолов первичного рассеяния месторождений. В ряде случаев представляется возможным по строению ореола определить высоту эрозийного среза.

Виды и формы существования элементов в первичном ореоле различны, а именно: собственные первичные минералы, растворы в жидкой и твердой составляющих рудовмещающих пород, растворы в эпигенетических минералах-вкраплениях, возникающих в связи с рудообразованием, а также состояние сорбции. Первичные ореолы всегда сингенетичны с процессом рудообразования; по отношению к рудовмещающим породам они ведут себя аналогично рудным телам. Если руды сингенетичны с вмещающими их породами, как это имеет место по отношению к некоторым типам магматических месторождений и к осадочным месторождениям, ореолы первичного рассеяния являются также сингенетичными и относятся к подклассу аномального первично-конституционального рассеяния. Наоборот, если рудные месторождения эпигенетичны, как например в случае всех пост-магматических образований, первичные ореолы оказываются также эпигенетичными, вторично наложенными.

Рассмотрение ореолов первичного рассеяния ведется последовательно для месторождений собственно магматических, осадочных и постмагматических. Ореолы месторождений иных классов или рассматриваются схематично (для месторождений метаморфических) или не рассматриваются вовсе.

X X

X

§ I. ОРЕОЛЫ ПЕРВИЧНОГО РАССЕЯНИЯ СОБСТВЕННО МАГМАТИЧЕСКИХ
(ЭВМАГМАТИЧЕСКИХ, ПРОТОМАГМАТИЧЕСКИХ) МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Среди большой группы рудных месторождений, так или иначе связанных с магматической деятельностью, выделяется практически весьма важный класс собственно магматических или, по В.А.Обручеву /1/, эвмагматических (протомагматических) месторождений. Характерной особенностью этих месторождений, независимо от того, образуются ли они кристаллизационно-дифференционным (сегрегационным) или ликвационным путем, является обособление рудного материала внутри родоначальной магмы, с переходом в твердое состояние непосредственно на месте обособления, без какого-либо перемещения в последующее за обособлением время.

Таким образом, рассматриваемые месторождения являются образованиями сингенетическими по отношению к вмещающим их породам. Это же можно сказать и об ореолах первичного рассеяния, связанных с этими месторождениями.

К рассматриваемому классу месторождений принадлежат многие сульфидные медно-никелевые, хромитовые (с платиной), титано-магнетитовые, апатитовые месторождения; некоторые из них имеют большое промышленное значение. С этой точки зрения изучение их ореолов первичного рассеяния представляется весьма важным, однако степень изученности их еще недостаточна.

В качестве примера рассмотрим возникновение ореола первичного рассеяния над месторождением медно-никелевых кристаллизационно-сегрегационных руд в гипербазитах. Этот процесс есть неизбежное следствие формирования самого сингенетического сегрегационного месторождения, сводящегося к выпадению тяжелых рудных минералов раннего образования под действием силы тяжести через еще незаствывшую, вязкую, существенно силикатную магму. В этих условиях падение частиц будет происходить согласно закону Стокса, выражаемому формулой:

$$V = 2/9 \frac{\Delta d \cdot g}{\eta} \cdot r^2, \quad (I)$$

где V - скорость установившегося падения частицы;

Δd - избыточная плотность частицы (рудного минерала) относительно среды (магмы), в которой происходит падение частицы;

g - ускорение силы тяжести;

η - коэффициент вязкости среды;

r - радиус сферы, эквивалентной по объему падающей частице.

Принимая во внимание равновероятность возникновения частиц разной величины, необходимо признать широкий спектр размеров образующихся рудных зерен, вплоть до молекулярных. Каждая из этих частиц будет падать со скоростью тем большей, чем больше размер частицы, причем отношения скоростей падения частиц разных размеров будут равняться квадрату отношения их радиусов. В ре -

зультате на прохождение одного и того же пути частицам различных размеров потребуется разные промежутки времени. В табл. I приведены результаты проделанных вычислений.

Таблица I

Поперечники частиц, мм	Расчетный радиус, мм	Скорость падения V в относ. единицах	Возможная скорость V, см/сек при $\eta = 78 \cdot 10^9$ см ⁻¹ г.сек ⁻¹	Путь в год, см	Необходимое время на прохождение пути 500 м, в годах	Примечание
10	5	1	$1 \cdot 10^{-8}$	$3,15 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^5$	Условия расчета по формуле Стокса: $\Delta d = 1,5$ г.см ⁻³ (для пентландита в ультрабазитах); $g = 980$ см.сек ⁻² $\eta = 78 \cdot 10^9$ см ⁻¹ г.сек ⁻¹ (взято интерполяцией для стекла, при $t = 1500^\circ\text{C}$, по формуле $\eta T^3 = \text{const}$ и при $\eta_{710^\circ\text{C}} = 45 \cdot 10^{10}$ см ⁻¹ г.сек ⁻¹)
2	1	$4 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^6$	
0,2	0,1	$4 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^8$	
0,02	0,01	$4 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-14}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{10}$	
0,002	0,001	$4 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-16}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{12}$	

Из таблицы видно, что если принять мощность ультраосновных интрузий порядка 1000 м (средний путь 500 м), то время падения для частиц размерами в доли миллиметра оказывается настолько большим, что они физически не сумеют подвергнуться сегрегации и останутся в застывшей из магмы породе, образовав ореол выше по восстанию от рудного тела. В природе, в зависимости от конкретной обстановки, рудное тело либо вообще не сможет образоваться (короткое время, большая вязкость), и тогда ореол окажется ложным, со слабо выраженным градиентом, наблюдающимся в самых верхах ореола, либо, наоборот, формирование рудного тела пройдет до конца (длительное время, небольшая мощность, низкая вязкость). В этом случае возникнет типичный сингенетичный ореол рассеяния с ярко выраженным градиентом по всей его высоте. Сам механизм образования ореола в этом последнем случае может быть понятен на основе результатов опытов Перрена /2/, который приготавливал тонкие однородные взвеси частиц гуммигута и мастики в воде и наблюдал распределение этих частиц в столбе эмульсии. Рассуждая таким образом, что каждая из частиц во взвеси стремится упасть на дно под влиянием силы тяжести и в то же время не каждой удается это сделать в результате действия сил рассеивания (броуновское движение, диффузия и т.п.), Перрен вывел уравнение, связывающее плотность распределения частиц с высотой над дном.

Формула Перрена имеет вид:

$$\ln \frac{n_2}{n_1} = K (h_1 - h_2), \quad (2)$$

где n_1 и n_2 — числа взвешенных частичек в единице объема эмульсии на высотах h_1 и h_2 над дном;

K — постоянная величина, равная $\frac{N}{RT} V \Delta d \cdot g$, где в свою очередь:

$N = 6,024 \cdot 10^{23}$ / число Авогадро/;

R — газовая постоянная = $8,314 \cdot 10^7$ эрг.град. $^{-1}$ моль $^{-1}$;

T — абсолютная температура эмульсии;

V — объем частицы;

Δd — избыточная плотность частицы относительно среды, в которую она помещена;

g — ускорение силы тяжести /980 см.сек $^{-2}$ /.

Проверка формулы, произведенная на частицах размером 0,212–11,5 мк в воде, показала превосходное совпадение; однако на настоящих коллоидных растворах (золи серебра) она не оправдалась. Следует заметить, что выведенная на тех же основаниях барометрическая формула, позволяющая вычислить давление газа (по-существу. число газовых молекул в единице объема) на разных высотах над поверхностью земли, с успехом применяется в метеорологии.

Предполагая справедливость формулы Перрена для условий ореолообразования, получим, что частицы, начиная с некоторых размеров, не будут опускаться на дно, а образуют своеобразную "атмосферу" — ореол, где число частиц в единице объема с высотой будет меняться по логарифмическому закону. При многомерности частиц каждая фракция будет вести себя аналогичным образом, причем так, что для более мелких частиц градиент будет меньше и наоборот. В результате в реальных условиях будет наблюдаться высотный градиент как по размерам, так и по содержанию частиц, усложняемый к тому же различной плотностью их. Для случая сингенетичного ореола сегрегационных медно-никелевых месторождений с менее плотным ($d = 4,2 \text{ г/см}^3$) халькопиритом и более плотным ($d = 5,0 \text{ г/см}^3$) шентландитом в качестве основных рудных минералов, как это следует из детального анализа формулы Перрена; медный ореол должен протягиваться за пределы смешанного медно-никелевого. К сожалению, отсутствие точных сведений о физико-химических особенностях рудокосной магмы, в частности данных об ее вязкости, не дает возможности произвести более или менее достоверные количественные подсчеты.

Подчеркнем, что по виду существования элементов первично-конституциональные ореолы рассеяния сегрегационных месторождений являются минеральными и возникают и существуют на фоне сингенетичного рассеяния в силикатных минералах породы.

Вопрос о первичных ореолах рассеяния ликвационных месторождений менее ясен; образование ореолов в этом случае следует ожидать за счет неполного отделения рудной магмы, а их связь с соответствующими месторождениями — при отсутствии какого-либо перемещения рудной магмы относительно вмещающей породы. При повышенной подвижности рудной магмы с этим, вообще говоря, встречаться придется далеко не всегда.

Выше имелось в виду, что ореолы являются минеральными. Однако не исключена вероятность образования ореолов и при существовании рудных элементов в безминеральном виде, в форме всякого рода примесей в породообразующих минералах. Очевидно, что в связи с большим атомным весом металлических элементов, породообразующие минералы, имеющие примеси рудных элементов, будут тяжелее и, таким образом, при выраженности гравитационной дифференциации, могут поведи к рудообразованию, создадут ореол первичного рассеяния в безминеральном виде. В этом ореоле породообразующие минералы с большим содержанием металлических примесей окажутся ниже, а с меньшим — выше по вертикали и относительно подошвы интрузии.

В связи с недостаточностью накопленного материала в рассматриваемой области трудно привести исчерпывающие примеры практики, за исключением случая, описанного Д.В.Полферовым для Кольского полуострова /3/. Здесь в ряде базитовых и гипербазитовых рудоносных интрузий ему удалось установить наличие первично-конституционального аномального рассеяния (ореолов первичного рассеяния) над сингенетичными донными залежами медно-никелевых руд.

Исследование производилось при помощи спектроанализа; достигнутая чувствительность обеспечивала уверенное выявление $Ni, Co, Cu, Ti, Cr, Zn, V,$

$Mo, Ag, Pb.$ Из этих элементов ореолы создавали первые четыре (Ni, Co, Cu, Ti). Для них четко было установлено повышение концентраций по мере продвижения по направлению к рудному телу. Главный вид существования элементов в ореоле — минеральный и, в частности, для Ni — пентландит, Cu — халькопирит и Ti — титано-магнетит. Протяженность ореолов по высоте — десятки метров и до 140 м (по Ti); намечается большая протяженность ореолов меди, по сравнению с ореолами никеля, что и следует ожидать, поскольку плотность халькопирита (4,1-4,3) меньше, чем пентландита. На рис. I приведена схема строения подобного ореола.

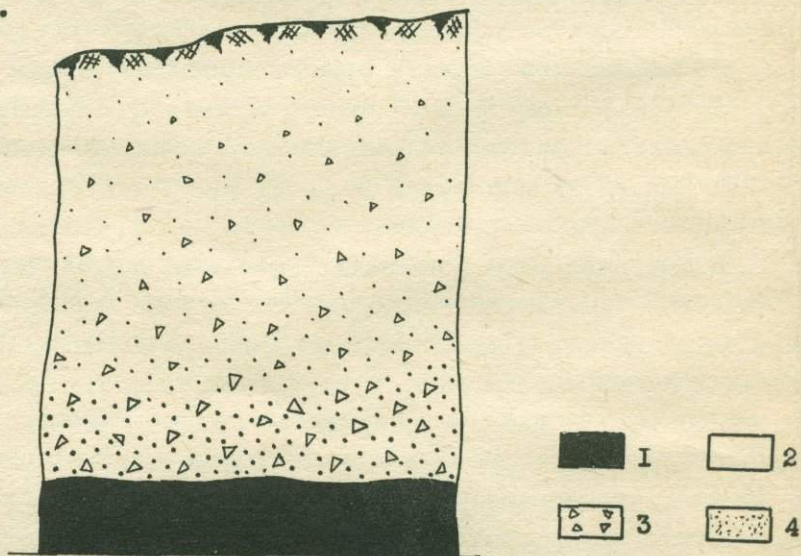


Рис. I. Схема строения пентландит-халькопиритового ореола над сульфидным медно-никелевым месторождением /разрез/:

1 — сплошные $Cu-Ni$ сульфидные руды; 2 — вмещающие породы; 3 — пентландит; 4 — халькопирит.

Ореолы первичного рассеяния месторождений эпигенетических медно-никелевых руд будут рассмотрены ниже, в разделе ореолов постмагматических (эпигенетических) месторождений.

К сожалению, не имеется соответствующих исследований над ореолами первичного рассеяния протемагматических месторождений иного, чем $Cu-Ni$ состава, в частности хромитовых, титано-магнетитовых, апатитовых и т.п. Это, безусловно, является задачей дальнейших работ.

§ 2. ОРЕОЛЫ ПЕРВИЧНОГО РАССЕЯНИЯ ОСАДОЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А. Общие сведения по осадочному рудообразованию

Месторождения осадочного, в том числе эффузивно-осадочного, происхождения составляют обширную группу. В нее входят многие, часто экономически чрезвычайно важные месторождения окисных руд железа и марганца, бокситов, фосфоритов, самородной меди, урана и ванадия, колчеданов, несущих тяжелые цветные металлы, сульфидов меди, свинца, цинка и др. По подсчетам В.М. Гольдшмидта из месторождений указанной группы добывается до 80-90% всего тоннажа минерального сырья, извлекаемого из недр.

Для большинства типов осадочных месторождений геологический контроль, в широком смысле этого слова, включая стратиграфические, минералогические, палеогеоморфологические и прочие особенности, достаточно ясно установлен и является надежным средством при поисках. Поэтому для обоснования геохимических критериев поисков осадочных месторождений, особенно ореолов первичного рассеяния, побуждающих мотивов не было, и в этом направлении сделаны лишь первые шаги. Ниже сделана попытка подытожить достигнутые результаты и сделать общие выводы. В связи с этим представляется полезным рассмотреть основные закономерности образования самих месторождений с тем, чтобы в конечном итоге подметить особенности возникновения ореолов первичного рассеяния. Будут рассмотрены, как наиболее важные, морские осадочные месторождения, руководствуясь при этом трудом Н.М. Страхова /4/. Использование других источников будет оговариваться особо.

Морские осадочные рудные месторождения обязаны своим возникновением благоприятному стечению следующих пяти главных факторов:

1. Высокой интенсивности осаждения рудных элементов как в годичный цикл, так и за весь период рудообразования.
2. Спокойной гидродинамической обстановки на участках рудогенеза (отсутствие размывающих течений).
3. Слабого привноса разбавляющего безрудного материала.
4. Концентрирующей переработки рассеянного рудного материала в процессе диагенеза.
5. Перемывания рудного материала с уносом пустого материала (вымывание пустых илов).

Из перечисленных пяти факторов последние два рассматриваются как второстепенные, в то же время первому вполне справедливо отводится главенствующая роль, поскольку ни о каком рудообразовании не может идти речь, если нет привноса главных рудообразующих компонентов.

Наиболее благоприятными участками, контролирующими распределение большинства типично осадочных месторождений, считаются зоны шельфа, в то время как эффузивно-осадочные месторождения контролируются зонами палеовулканизма.

Исходный материал для рудообразования поступает из трех источников:

а) для элементов с ничтожной растворимостью и, следовательно, с ничтожными запасами в водоеме (алюминий, железо, марганец, большинство микроэлементов) — за счёт привноса водотоками с континента;

б) для элементов с повышенной растворимостью (фосфор, кальций и др.) — за счёт собственных запасов в водоеме, с одновременным усилением действия за счёт привноса водотоками;

в) для железа, марганца, особенно для тяжелых цветных металлов, кремнекислоты и сероводорода — за счёт гидротерм и эманаций подводных вулканических извержений.

В целом собственно рудные скопления локальны и ограничены по масштабам проявлений. В то же время между рудой и фоновым рассеянием внутри рудоносного пласта существуют более или менее широкие переходные полосы зачаточного или незавершенного рудообразования, характеризующиеся промежуточными содержаниями металла. Эти полосы могут служить поисковыми признаками.

Ниже приведены некоторые конкретные сведения по главнейшим видам осадочных месторождений.

1. Собственно осадочные месторождения

Под собственно осадочными месторождениями понимаются такие, которые образуются в конечных бассейнах стока за счёт материала, приносимого водотоками с денудированной площади.

Типичными представителями подобных месторождений являются месторождения бокситов (Средиземноморье, Урал, Средняя Азия, Саяны); железных оолитовых гидрогетит-шамозит-сидеритовых руд (Западный склон Урала, Керченский полуостров, минетты Франции и Германии, Клинтон в США) и железных джеспилитовых руд (Кривой Рог, КМА, Верхнее Озеро); марганца (Чиатуры, Никополь, Северный Урал); фосфоритов (Европейская часть СССР, Кара-Тау, Флорида, Северная Африка); медистых песчаников (Западное Приуралье, Удокан). Ниже приводятся особенности подобных месторождений.

1. Фациальный профиль месторождений в большинстве случаев сложный и определяется условиями образования в мелководных морях (медистые песчаники) или в пределах прибрежного шельфа (бокситы, оолитовые железные, марганцевые и фосфоритовые руды). Только для железных джеспилитовых руд характерна литолого-петрографическая выдержанность, связанная с образованием в условиях глубоководья. В пределах шельфа ближе всего к береговой линии,

с заходом в зоны выветривания денудированной площади, располагаются бокситы, далее в море — оолитовые железные руды и еще дальше руды марганца. Фосфориты располагаются в средней части шельфа и перекрываются хлорито-сидеритовыми и марганцевыми отложениями.

2. Образование месторождений всех перечисленных руд (кроме бокситов) рассматривается как следствие химических процессов, разно протекавших в различные эпохи жизни земли. Так, в протерозойское время воды рек, морей и океанов в силу избытка CO_2 были, вероятно, кислыми с $\text{pH}=(4-6)$. Это должно было благоприятствовать химическому выветриванию пород литосферы и созданию значительных по концентрации металлоносных растворов, в частности солей закиси, их устойчивости и прямо зависящей от этого возможности дальнейшей транспортировки, вплоть до самых глубоких участков морей.

Джеспилитовые железные руды образовались, видимо, в подобных условиях. Предполагается, что само осадкообразование происходило по следующей схеме: химическое окисление растворов железа — образование коллоидов железа — коагуляция коллоидов — выпадение в осадок. Выпадение железистых осадков происходило пульсационно, чередуясь с таким же выпадением кремниевой кислоты. Впоследствии, в результате метаморфизма, возникли современные джеспилиты; диагенез вряд ли играл существенную роль. Возможно, часть железа (и кремниевой кислоты) поступала прямо в водные бассейны за счет подводных вулканических извержений. При коагуляции железных коллоидов происходил захват ими растворенных в водах малых элементов.

Бокситовые и марганцевые месторождения рассматриваемой эпохи известны мало; они, очевидно, сильно метаморфизованы, в результате чего и возникли наждаковые залежи на месте бокситов и силикатные марганцевые залежи на месте окисных месторождений марганца. Вероятно, первоначальный генезис всех этих залежей был химический.

Полагают, что в конце протерозоя произошла резкая смена условий на земле, в результате чего образование собственно осадочных месторождений различных руд также резко переместилось из глубин морей к их периферии. Эту смену условий связывают с возникновением растительности, под влиянием которой содержание углекислоты как в атмосфере, так и в водах значительно снизилось. В результате этого кислотность послепротерозойских вод упала до $\text{pH}=(6-8)$, соответственно понизилась их растворяющая и удерживающая способность, и, таким образом, металлы либо перестали переходить в растворы, либо стали выпадать в осадок на коротких участках транспортировки.

В этих условиях генезис бокситов связывается с механическим перестроением и последующей диагенетической переработкой продуктов латеритного выветривания богатых алюминием пород. Хемогенез отвергается по соображениям неустойчивости растворов окисного алюминия в современных речных водах, из которых, уже при $\text{pH} = 5$ и выше, выпадает каолинит.

Генезис оолитовых гидрогетит-шамозит-сидеритовых руд рассматривается как химический. Железо транспортируется в моря в закисной форме — $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$.

растворимой и устойчивой в восстановительной среде, лишенной свободного кислорода, что наблюдается в природе на заболоченных территориях. Поэтому, чем заболоченнее водосборная площадь и чем она ближе к морскому бассейну, тем больше шансов выноса железа в море и образования его месторождения. В противном случае железо успеет окислиться еще на промежуточном этапе и, выпадая в виде "ржавца", будет "размазываться" в аллювии речной системы. Болотистость вод облегчает совместный перенос марганца в форме соли закиси, а также фосфора, удерживаемого в растворе уголекислотой, и малых элементов, защищенных в растворе органическим веществом. В море происходит окисление закисей железа и марганца за счёт свободного кислорода, и они выпадают в виде коллоидных гидратов окисей, сорбируя по пути фосфор и малые элементы. В результате образуется геохимически сложные железистые осадки. Преобразование их в оолитовые руды железа, состоящие из гидрогетита, шамозита и сидерита, происходит в результате диагенеза.

Генезис марганцевых руд также рассматривается как химический. Предполагается, что удаление марганца из коры выветривания и его транспортировка происходит в форме $MnCO_3$, соединения, хорошо растворимого в щелочных растворах, в которых железо, а также большинство малых элементов (кроме Со и Ва) в растворенном виде существовать не могут. Это обстоятельство, наряду с повышенной миграционной способностью марганца в земных условиях, определяет и более дальний, чем у железа (и алюминия), вынос в море и отделение марганца от железа и большинства малых элементов. Первоначальной формой выпадения металла в осадок была, очевидно, перекись марганца. В окончательном оформлении месторождения решающую роль играл диагенез, свидетельством чего являются конкреции.

Генезис фосфоритов предполагается химический, однако происходящий особым сложным путем за счёт запасов фосфатов, растворенных в морях и океанах (оцениваются в 137 млрд. т.) и особенно приуроченных к глубинной (500-1500 м) зоне. Фосфаты, выносимые с континента речными потоками, вначале усваиваются планктоном (биофильтр в устьях рек), а затем им разносятся по всему морю. Отмирая, планктон падает на дно и на этом пути разлагается морской водой с отдачей биофосфора в раствор. В связи с этим верхняя зона моря (до 50 м) бедна растворенным фосфором, и он накапливается лишь на глубине. Одновременно здесь же установлено обогащение уголекислотой, а следовательно и кальцием. Выпадение накопленного таким образом фосфора в осадок происходит, по гипотезе А.В.Казакова, следующим образом.

Возникающие часто в морях и океанах длительно действующие ветровые поверхностные течения от берега в море отгоняют верхнюю воду, бедную фосфатами. Немедленно возникающее при этом уравновешивающее глубинное течение доставляет к поверхности воду, богатую фосфатами и уголекислотой. Эта вода, следуя подтёму дна, попадает в области шельфа в иные термодинамические условия, характеризующиеся пониженным давлением и повышенной температурой. В этих условиях количество растворенной уголекислоты уменьшается; вода стано-

вится пересыщенной углекислым и фосфорно-кислым кальцием, которые и начинают выпадать в осадок вначале первый, а затем, выше по шельфу, второй. Образование желваков фосфоритов приписывается диагенезу.

В дополнение к этой схеме А.В.Казакова Н.М.Страхов указывает, что во внутриплатформенных морях садка фосфатов могла иметь место в результате естественного пересыщения ими нижних горизонтов водоема.

Генезис медистых песчаников до последнего времени вызывает споры. По В.А.Обручеву /1/ весьма правдоподобным является представление о сингенетичном с вмещающими породами выпадении меди и сопровождающих ее металлических элементов с последующей переработкой осадков, приводящей к образованию сульфидов. Окисленные минералы образуются в результате вторичных изменений. Металлоносные растворы возникали при выветривании прибрежных образований.

3. Зачаточное и незавершенное рудообразование для всех рассмотренных видов осадочных рудных месторождений выражается периферическими полосами большей или меньшей ширины с низшими, чем промышленные, содержаниями ценных элементов.

Конкретно, для джеспилитовых месторождений эти полосы представлены роговиками с непромышленными содержаниями железа, более развитыми со стороны древнего моря; для бокситовых - флинт-глеями в виде сухарных и огнеупорных глин (каолинитов) с некоторой примесью гидратов окиси алюминия и низкосортных бокситов; для ослитовых гидрогетит-шамозит-сидеритовых - тонкодисперсными шамозитовыми глинами; для марганцевых - глинами с рассеянными марганцевыми конкрециями; для фосфоритов - полями с редкими желваками фосфоритов; для медистых песчаников - у ч а с т к а м и с непромышленными содержаниями.

4. Геохимические особенности всех рассмотренных выше месторождений заключаются прежде всего в том, что в рудах помимо главного элемента происходит накопление и других металлических элементов, в том числе малых. Особенно отчетливо это наблюдается в железных рудах и очень слабо выражено в марганцевых рудах. В табл. 2 приведены сравнительные значения кларков концентраций для месторождений некоторых элементов (по Н.М.Страхову).

Таблица 2

Месторождения	Кларки концентрации для металлов				
	Al_2O_3	Fe	Mn	P	Ti
Железные, джеспилитовые	0,47	10,1	1,3	1,7	0,2
Бокситовые	1,1-4,0	1,2-10,7	0,07-3,3	0,03-6,7	1,0-7,3
Железные, ослитовые	0,12-0,5	6,1-11,3	1,2-41,7	1,1-17,3	0,08-1,0
Марганцевые	0,08-0,45	0,1-1,7	94-535	0,7-5,7	-

Вместе с тем, переоценивать значение приведенных данных не следует. Так, по Н.М.Страхову, в процессе диагенеза железо, марганец, фосфор не только в разной степени концентрируются в одних и тех же местах осаждения, но и стремятся обособиться друг от друга, очиститься от загрязняющих примесей. Особенно это ясно следует из анализов марганцевых конкреций.

Наряду с этим внутри самих месторождений наблюдается характерная зональность. Конкретно, по отдельным видам месторождений необходимо отметить следующее:

Для джеспилитовых железных месторождений характерно обогащение кремнекислотой; наряду с этим отмечается некоторое накопление марганца и малых элементов, захватывавшихся из раствора при коагуляции коллоидов гидратов окислов железа и кремнекислоты. Внутри самой джеспилитовой формации железо ближних к берегу зон находится в закисной форме (сидеритовые с пиритом, затем хлорито-сидеритовые образования), сменяемой далее в глубь закись-окисной формой (сидерито-магнетитовые отложения) и, наконец, окисной (гематитовые образования); в этом же направлении возрастает и содержание железа.

Для бокситов характерно накопление титана, с параллельным изменением содержаний Al_2O_3 и TiO_2 и с очень малыми изменениями отношений содержаний. При этом месторождений, формировавшихся на ложе из карбонатных пород, замечается уменьшение содержаний алюминия и переход железа из окисной в закисную форму, по направлению от лежащего к висящему боку.

Для оолитовых гидрогетит-шамозит-сидеритовых руд отмечается обязательное и значительное обогащение марганцем и фосфором, а также микроэлементами, в частности ванадием. Зональность выражается в том, что руды прибрежных зон пласта обогащены окисно-закисным железом (гидрогетитом), замещаемым, по мере удаления в пелагическую часть бассейна, закисными соединениями в виде шамозита и далее — сидерита. Последний непосредственно контактирует с чистыми глинистыми отложениями.

Обогащение руд марганца примесями выражено слабее всего. Отмечается повышенное содержание фосфора, а также кобальта и бария. В связи с повышенной глубиной отложения отмечается ассоциация с кремнеземными осадками; в прибрежных частях пласта преобладают псиломелан и манганин, сменяемые далее в глубь бассейна родохрозитом и манганокальцитом.

Для фосфоритов характерны ассоциации с кальцием в виде кальцита и с железом в виде глауконита. Внутри желваков фосфорита часты скопления сульфидов Fe, Pb, Zn. Иногда присутствует уран (вторичный).

Геохимические особенности медистых песчаников выражаются в сопровождении меди (в формах сульфидных и окисных минералов и самородной меди) железом, свинцом, ванадием, никелем, кобальтом, серебром, а также барием, кальцием, кремнекислотой, местами битумами.

II. Эффузивно-осадочные месторождения
(по Н.М.Страхову /4/ и В.А.Обручеву/1/)

Под эффузивно-осадочными понимаются такие месторождения, которые образуются в морских бассейнах осадочным путем за счет материала, привносимого в них в результате вулканических извержений, прежде всего подводных.

В последние годы интерес к подобным месторождениям в значительной мере повысился и участились попытки приписать эффузивно-осадочное происхождение самым различным по составу месторождениям.

I. Типичными представителями месторождений являются: месторождения гематитов в Рейнских Сланцевых Горах, Тюрингии, Гарце; колчеданные - Рам-мельсберга, Меггена, Трондьема, Рио-Тинто; марганцевые карбонатно-силикатные-Мазульское, Южно-Уральские, некоторые месторождения Германии и Испании; яшмовые и кремнистые; возможно некоторые фосфоритовые США, Австралии, Японии, а также некоторые месторождения свинца и цинка. Основные особенности рассматриваемых месторождений описываются ниже объединенно по схеме, принятой для собственно осадочных месторождений.

1. Фациальный профиль месторождений разный в различных случаях и определяется размещением палеовулканических подводных областей.

2. Образование месторождений рассматривается как исключительно химическое. Действительно, как известно, при подводных вулканических излияниях в морскую воду неизбежно вводятся гидротермальные растворы, несущие в составе растворенной нагрузки всю гамму рудообразующих элементов (железо, марганец, алюминий, тяжелые цветные металлы, их металлические и металлоидные элементы-спутники, кремнекислоту, сульфоионы и т.п.) и, одновременно, газообразные эманации (в в и д е закиси и окиси углерода, сероводорода, хлористого водорода, сернистого газа и т.п.). Все это является основным условием возникновения локальной обстановки, благоприятствующей осуществлению в растворе соответствующих химических реакций, по крайней мере между элементами (или группами их), превалирующими в гидротермах.

При этом, при обогащенности сероводородом и тяжелыми металлами вероятнее всего выпадение сульфидов железа, меди, свинца, цинка и т.п., увлекающих за собой, путем соосаждения, всю гамму малых элементов-примесей. При недостатке сероводорода, или за пределами сероводородной области, вероятно выпадение окисных соединений железа и марганца, также с одновременным обогащением осадков малыми элементами, в полном согласии с вышеописанными схемами. Последующие процессы тектоники и метаморфизма могут в значительной мере изменить первоначальный облик месторождений.

3. Зачаточное и незавершенное рудообразование для месторождений рассматриваемого генезиса представлены зонами с непромышленным оруденением по периферии собственно рудных линз, а также возможными вкрапленниками в породах лежащего и висящего боков их. Последнее будет наблюдаться в тех случаях, когда процесс собственно рудоотложения предваряется и завершается про-



цессами ослабленного выпадения рудных компонентов.

4. Геохимические особенности месторождений эффузивно-осадочного типа выражаются в одновременном обогащении руд главных компонентов многообразными элементами-примесями, в полном согласии с природной сложностью гидротерм и вулканических эманций. Это положение распространяется и на возможные зоны вкрапленников в боках собственно рудных тел.

Б. Общие сведения по ореолам первичного рассеяния осадочных месторождений

Приведенные сведения, основанные на накопленных фактических материалах, позволяют сделать следующие выводы и заключения, относящиеся к интересующему нас вопросу об ореолах первичного рассеяния осадочных месторождений:

1. Зоны зачаточного и незавершенного рудообразования характеризуются следующими особенностями:

а) они образуются одновременно с окаймляемыми ими осадочными месторождениями, за счёт того же самого материала, из которого сложены рудные тела и в результате одних и тех же процессов;

б) располагаются по периферии рудных залежей;

в) содержания рудообразующих элементов в зонах закономерно изменяются от высоких вблизи рудных тел и до низких, близких к кларковым, на периферии.

Все эти особенности характеризуют ореолы первичного рассеяния; поэтому зоны зачаточного и незавершенного рудообразования осадочных месторождений с полным основанием могут рассматриваться как ореолы первичного рассеяния месторождений **э т о г о т и п а**.

2. Ореолы первичного рассеяния осадочных месторождений образуются одновременно с вмещающими их пустыми породами и постепенно с ними сливаются. Это позволяет рассматривать указанные образования как аномальную разновидность первично-конституционального рассеяния.

3. Геохимические особенности ореолов первичного рассеяния осадочных месторождений оказываются различными для собственно осадочных и эффузивно-осадочных образований.

4. Геохимические особенности ореолов первичного рассеяния собственно осадочных месторождений определяются тем, что рассматриваемые образования, равно как и сами месторождения и вмещающие их породы:

а) представляют собой перенесенные в морские бассейны и отложенные там при стечении благоприятных условий, с известным перераспределением элементов, продукты выветривания **г о р н ы х** пород обычного химического состава, причем перераспределение касается весьма ограниченного круга элементов;

б) отложение происходит длительное время в практически однородной по составу водной среде, постоянно перемешивающейся, с содержаниями рудообразующих элементов во много раз низшими, чем содержания их в породах;

в) обогащение рудных тел и их ореолов малыми элементами-спутниками происходит в результате сорбции их природными сорбентами, в качестве которых

выступают сами рудные образования. Измельченные фракции безрудного состава сорбируют малые элементы с одинаковой силой как в пределах рудного тела и его ореола, так и за их границами.

Таким образом, для месторождений собственно осадочного происхождения ореолы первичного рассеяния по своим химическим особенностям будут весьма простыми, подобными рудным телам с той разницей, что кларки концентраций главного рудообразующего элемента и его парагенетических элементов-спутников будут пониженными против кларков в руде. Нет оснований рассчитывать на возникновение ореолов первичного рассеяния, геохимически резко отличных по составу от полос зачаточного и незавершенного рудообразования как внутри, так и вне их; особенностью ореола собственно осадочного месторождения является его приуроченность только к рудовмещающему пласту (см.рис.2).

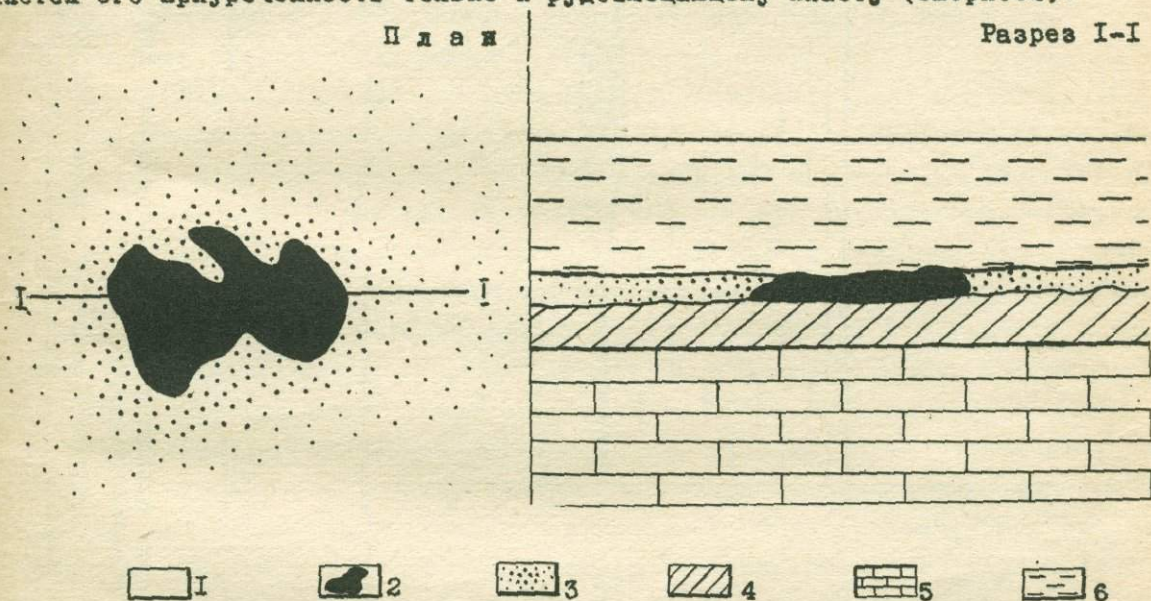


Рис.2. Схема строения ореола собственно осадочного месторождения, /к моменту формирования/:

I - вмещающие породы; 2 - промышленные руды; 3 - ореол первичного рассеяния (зоны зачаточного и незавершенного рудообразования); 4 - песчано-сланцевые породы; 5 - известняки; 6 - вода.

Виды и формы существования элементов в ореолах первичного рассеяния рассматриваемых месторождений аналогичны наблюдаемым в самих рудных телах. Именно главные рудообразующие элементы присутствуют в основном в минеральном виде, в то время как второстепенные элементы-примеси являются сорбатами; в качестве сорбентов могут выступать минералообразования главных элементов и минеральный поглощающий комплекс.

5. Геохимические особенности ореолов первичного рассеяния эффузивно-осадочных месторождений определяются теми обстоятельствами, что рассматриваемые ореолы, равно как и сами месторождения и непосредственно вмещающие их породы:

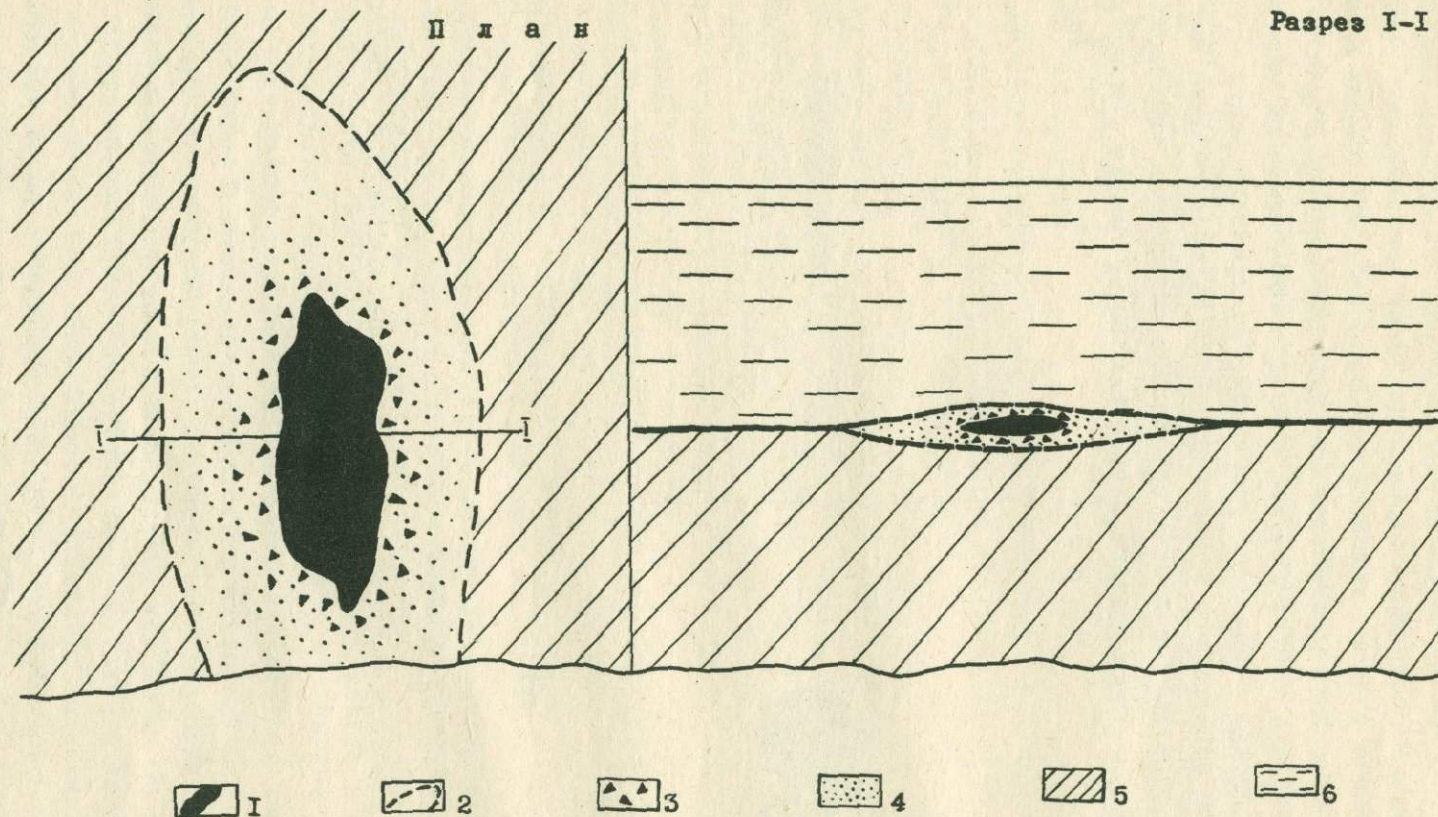


Рис.3. Схема строения ореола эффузивно-осадочного месторождения /к моменту формирования/

1 - массивные руды; 2 - контур эффузивно-осадочной линзы; 3 - включения сульфидов; 4 - безминеральный ореол в эффузивно-осадочной линзе; 5 - вмещающие осадочные породы; 6 - вода.

а) представляют собой образования, чуждые по своему происхождению и составу тем собственно осадочным породам, которые вмещают эффузивно-осадочную линзу в целом;

б) образуются в результате местного привноса дополнительных масс широкой гаммы элементов, напластывающихся на возникший к моменту эффузии геохимический фон в водоеме и в собственно осадочных породах;

в) отлагаются в неоднородном (с одним или многими максимумами содержания) геохимическом поле сложного состава, в течение геологически короткого времени, недостаточного для уравнивания концентраций.

г) обогащение рудных тел и их ореолов малыми элементами происходит как за счёт соосаждения с минеральными новообразованиями и сорбции ими, так и за счёт сорбции совместно осаждающимися пепловыми частицами; при этом насыщение пепловых частиц элементами-примесями тем сильнее, чем ближе эти частицы выпадали к эпицентрам ввода в бассейн гидротерм.

Таким образом, для месторождений эффузивно-осадочного происхождения ореолы первичного рассеяния по своим геохимическим особенностям будут весьма сложными, отличающимися как от рудных тел, так и вмещающих их пород. Так, в височем и лежащем боках залежи должны наблюдаться вкрапленники, сопутствующие обогащению малыми элементами как вкрапленных минералов, так и "пустой" породы. Вкрапленники развиваются и в плоскости рудного тела, во всех пределах зоны зачаточного и незавершенного рудообразования, с падающими к периферии содержаниями малых элементов-примесей. Эти элементы обогащают собой не только указанную зону, но и выходят за ее пределы, будучи в этом обязаны сорбции пепловыми частицами. В то же время рассчитывать на какую-либо зональность в распределении элементов в ореолах нет оснований, поскольку неизбежно перемешивание растворов за счёт турбулентности движения, внутренних течений и т.п. На рис.3 приведена схема ореола эффузивно-осадочного месторождения.

Виды и формы существования элементов в ореолах первичного рассеяния эффузивно-осадочных месторождений весьма разнообразны. Это, прежде всего, собственные минералы элементов (если они могут образоваться), затем примеси в минералах-вкрапленниках и, наконец, сорбированное состояние в пеплово-туфовых разностях эффузивно-осадочной линзы в количествах, закономерно возрастающих в направлении к рудным телам.

6. Геохимические особенности ореолов первичного рассеяния осадочных месторождений смешанного происхождения (типа джеспилитовых железных месторождений) будут также смешанными с преобладанием черт, свойственных главному рудообразующему фактору.

Конкретный пример ореолов первичного рассеяния, связанных со "слевыми" железорудными залежами криворожского типа приведен ниже, в разделе ореолов постмагматических (эпигенетических) месторождений поскольку, по современным взглядам, собственно рудные тела рассматриваются как образования вторичные по отношению к вмещающим их джеспилитам.

а) представляют собой образования, чуждые по своему происхождению и составу тем собственно осадочным породам, которые вмещают эффузивно-осадочную линзу в целом;

б) образуются в результате местного привноса дополнительных масс широкой гаммы элементов, напластывающихся на возникший к моменту эффузии геохимический фон в водоеме и в собственно осадочных породах;

в) отлагаются в неоднородном (с одним или многими максимумами содержания) геохимическом поле сложного состава, в течение геологически короткого времени, недостаточного для уравнивания концентраций.

г) обогащение рудных тел и их ореолов малыми элементами происходит как за счёт соосаждения с минеральными новообразованиями и сорбции ими, так и за счёт сорбции совместно осаждающимися пепловыми частицами; при этом насыщение пепловых частиц элементами-примесями тем сильнее, чем ближе эти частицы выпадали к эпицентрам ввода в бассейн гидротерм.

Таким образом, для месторождений эффузивно-осадочного происхождения ореолы первичного рассеяния по своим геохимическим особенностям будут весьма сложными, отличающимися как от рудных тел, так и вмещающих их пород. Так, в височем и лежащем боках залежи должны наблюдаться вкрапленники, сопутствующие обогащению малыми элементами как вкрапленных минералов, так и "пустой" породы. Вкрапленники развиваются и в плоскости рудного тела, во всех пределах зоны зачаточного и незавершенного рудообразования, с падающими к периферии содержаниями малых элементов-примесей. Эти элементы обогащают собой не только указанную зону, но и выходят за ее пределы, будучи в этом обязаны сорбции пепловыми частицами. В то же время рассчитывать на какую-либо зональность в распределении элементов в ореолах нет оснований, поскольку неизбежно перемешивание растворов за счёт турбулентности движения, внутренних течений и т.п. На рис.3 приведена схема ореола эффузивно-осадочного месторождения.

Виды и формы существования элементов в ореолах первичного рассеяния эффузивно-осадочных месторождений весьма разнообразны. Это, прежде всего, собственные минералы элементов (если они могут образоваться), затем примеси в минералах-вкрапленниках и, наконец, сорбированное состояние в пеплово-туфовых разностях эффузивно-осадочной линзы в количествах, закономерно возрастающих в направлении к рудным телам.

6. Геохимические особенности ореолов первичного рассеяния осадочных месторождений смешанного происхождения (типа джеспилитовых железных месторождений) будут также смешанными с преобладанием черт, свойственных главному рудообразующему фактору.

Конкретный пример ореолов первичного рассеяния, связанных со "слевыми" железорудными залежами криворожского типа приведен ниже, в разделе ореолов постмагматических (эпигенетических) месторождений поскольку, по современным взглядам, собственно рудные тела рассматриваются как образования вторичные по отношению к вмещающим их джеспилитам.

§ 3. ОРЕОЛЫ ПЕРВИЧНОГО РАССЕЯНИЯ ПОСТМАГМАТИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А. Общие сведения и определения

Постмагматические месторождения генетически тесно связаны с затухающей магматической деятельностью и образовались в подходящих условиях из магматических эманаций, гидротерм и расплавов.

Среди постмагматических встречаются месторождения любого металлического состава, самых различных форм и запасов. Некоторые металлы, как например, золото, серебро, олово, молибден, вольфрам, тантал, ниобий, редкие земли, сурьма, мышьяк и некоторые другие элементы (индий, галлий, рений, рубидий, цезий) добываются только из постмагматических месторождений. Некоторые месторождения (например, меди) уникальны по запасам. Эти обстоятельства резко подчеркивают экономическую важность месторождений рассматриваемой группы.

По своим временным отношениям постмагматические месторождения всегда эпигенетичны, т.е. являются более поздними образованиями по отношению к вмещающим их породам.

Как показывает опыт, в процессе образования постмагматических месторождений происходит не только формирование рудного тела месторождения, но так или иначе изменяются и вмещающие породы. Эти эпигенетические изменения сказываются, прежде всего, на химизме непосредственно вмещающих месторождение пород и выражаются в обогащении их элементами, входившими в состав образований /расплавов, пневматолитов, гидротерм и т.п./, которые дали начало месторождению.

Первичными ореолами постмагматических месторождений называют участки вмещающих пород, прилегающие к самим месторождениям и обогащенные, в той или иной мере, элементами, входящими в состав месторождения или парагенетически связанными с этими последними. В соответствии с эпигенетической природой рассматриваемых месторождений их ореолы первичного рассеяния также являются эпигенетичными, т.е. вторично наложенными на породы-носители.

Содержания элементов в ореолах изменяются от соизмеримых с содержаниями в рудных телах, для центральных частей ореолов, до неизмеримых по малости — на периферии их; другими словами, существуют резко выраженные градиенты содержаний. Размеры ореолов определяются единицами — первыми десятками метров в боках рудных тел и многими десятками — сотнями метров по простиранию на флангах и по восставию. В целом благодаря своим большим размерам первичные ореолы представляют собой значительно более легко выявляемые объекты, нежели сами рудные тела, однако требуют особенных приемов исследования.

Примеры обнаружения коренных рудных месторождений постмагматического генезиса по их первичным ореолам рассеяния общеизвестны, однако приемы поисков, построенные на использовании этих признаков, еще не приобрели широкого и, главное, закономерного применения. Одной из причин создавшегося положения является недостаточность теоретического обоснования некоторых важных вопросов, касающихся первичных ореолов, и, в частности, вопро-

сов элементного состава, распределения и форм состояния элементов в первичных ореолах и т.п., без чего трудно сделать сколько-нибудь важные практические выводы.

Следует заметить, что в последнее время накоплено большое количество фактов, говорящих о сложном комплексном составе первичных ореолов при зональном распределении в них элементов; при этом первичные ореолы различных по метальному составу месторождения оказываются весьма близкими между собой по целому ряду признаков. Виды и формы существования элементов в первичных ореолах оказываются многообразными; установлены как собственные минералы, так и примеси в определенных минералах чужого состава или в целом в породах. Тем не менее еще многое надлежит выявить и обобщить.

Ниже сделана попытка рассмотреть пять основных вопросов теории первичных ореолов рассеяния постмагматических месторождений: источник элементов в первичных ореолах; элементный состав; движущие силы образования ореолов; распределение элементов; виды и формы существования элементов в ореолах.

Б. Основы теории образования ореолов первичного рассеяния постмагматических месторождений

а/ Источник элементов в первичных ореолах

Первичные ореолы рассеяния постмагматических месторождений настолько тесно и явно связаны с сопровождаемыми ими месторождениями, что не возникает никаких сомнений в том, что родоначальником и для тех и для других служит один и тот же источник. Действительно, в одних случаях первичные ореолы представлены вирапленниками на периферии и к центру переходят в промышленные месторождения; в других - изменение содержания тех или иных элементов возрастает к рудному месторождению. Все вместе не может быть истолковано иначе, как следствие образования из одного и того же источника, приуроченного в свое время к зоне, ныне являющейся рудной. Поэтому принимается, что пегматитовые расплавы, пневматолиты, гидротермы, возгоны разного рода и тому подобные постмагматические рудообразующие агенты являются в то же время и источниками, поставляющими элементы в первичные ореолы рассеяния рассматриваемых рудных месторождений.

б/ Элементный состав первичных ореолов

Принимая образование рудных месторождений и первичных ореолов их из одних и тех же источников необходимо также принять, что элементный состав ореолов будет отвечать составу рудообразователей. К сожалению, имеется мало фактических данных по последнему вопросу, однако некоторые суждения, основанные на известных обобщениях, могут быть высказаны.

Прежде всего необходимо подчеркнуть, что основной геохимический закон повсеместного распространения элементов является справедливым для любых геологических образований, в том числе и для рудоносных растворов.

Это означает что в последних должны присутствовать все элементы. Практические данные подтверждают общую справедливость этого заключения. На самом деле, нет рудных и жильных минералов, в которых чувствительными методами анализа (например, спектральным) не устанавливались бы примеси практически всех рудообразующих элементов. Это может говорить только в пользу многокомпонентности состава постмагматитов. Аналогичные результаты получаются, если мы обратимся к рассмотрению химизма трещинных восходящих вод, причем преимущественно речь будет идти о горячих минеральных источниках, которым, в силу целого ряда причин, можно приписать ювенильный характер и рассматривать их как "отработанные", см. А.Г.Бетехтин /5/, т.е. сбросившие свою металлическую нагрузку, гидротермы. В природе в разных местах известны многообразные примеры горячих минеральных источников, особенно натриево-хлоридного или натриево-карбонатного (по основной нагрузке) составов, из вод которых на выходах, в виде самостоятельных минералов или в качестве примесей в безрудных отложениях, выделяется широкая гамма разнообразных металлических элементов. Так отлагаются ртуть, мышьяк, сурьма, железо, медь, свинец, серебро, золото, иногда олово, никель, кобальт, марганец, вольфрам в сопровождении разнообразных нерудных минералов — опала, халцедона, кварца, кальцита, анкерита, сидерита, барита, реже флюорита, целестина, гипса, самородной серы, фосфоритов, цеолитов, что свидетельствует о наличии в воде источников кремния, натрия, кальция магния, бария, серы, хлора, стронция, фосфора и других элементов. В табл.3, составленной по данным разных авторов, приведены анализы термальных вод ряда источников, рассматриваемых в качестве ювенильных, и жидких выделений в жильном кварце.

Приведенные данные с несомненностью говорят о том, что рудообразующие растворы являются в химическом смысле многокомпонентными. Более того, если учесть состав выпадающих из этих вод осадков и принять во внимание трудность анализа малых содержаний металлов в водах, то надо принять эту многокомпонентность весьма широкой, особенно в части металлических элементов и их спутников. Наибольшей известностью пользуются горячие источники Стимбот и Салфорс-Бэнкс (США). Источник Стимбот связан с интрузией гранодиорита; главными составными частями растворенных веществ являются хлорид и борат натрия; карбонатов и сульфатов относительно мало; присутствуют свободные сероводород и углекислый газ. В отложениях этого источника, которые могут рассматриваться как первичный ореол его, обнаружены все минералы (металлы), характерные для типичных полиметаллических гидротермальных месторождений. В частности, установлены киноварь, сернистые соединения сурьмы и мышьяка, меди, свинца, цинка, железа, а также золото и серебро в сопровождении халцедона, мелких кристалликов кварца и кальцита. Горной выработкой были встречены кристаллы антимонита, пирита, марказита, а на глубине — кварцевая жила с киноварью.

В водах источника Салфорс-Бэнкс преобладают борат и карбонат натрия, при относительно низком содержании хлоридов и сульфатов. С поверхности на

Таблица 3

Компо- ненты	Содержания в весовых %% в растворе					
	Стимбот, Невада /6/	Салфорс Банкс, Калифор- ния /6/	Саратога Спрингс, Нью-Йорк /7/	Ротуроа, Новая Зеландия /6/	Узон, Камчатка /8/	Жидкое включе- ние в кварце /9/
Cl	0,10	0,07	$3,1 \cdot 10^{-1}$	-	следи	$n \cdot 10^0$
SO ₄	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	-	$3,7 \cdot 10^{-2}$	0,38	-
CO ₃	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	-	-	-	$n \cdot 10^{-1}$
B ₄ O ₇	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	-	-	-	-
PO ₄	$9 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-	-
Li	$7,7 \cdot 10^{-4}$	-	-	-	-	-
Na	$8,6 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	-	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^0$
K	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	-	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-1}$
Mg	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	-	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-3}$
Ca	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	-	$8,7 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-1}$
Al	-	-	-	следи	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-3}$
Fe	следи	-	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-3}$
SiO ₂	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	-	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^0$
S	$6,3 \cdot 10^{-4}$	-	-	-	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-2}$
As	$2,9 \cdot 10^{-4}$	-	-	-	$4,0 \cdot 10^{-3}$	-
Sb	$5,7 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	$2,3 \cdot 10^{-5}$	-
Mn	-	-	$2,7 \cdot 10^{-7}$	-	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-3}$
Cu	-	-	-	-	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-4}$
Sn	-	-	$3,2 \cdot 10^{-6}$	-	$1,0 \cdot 10^{-5}$	-
Zn	-	-	-	-	$6,3 \cdot 10^{-3}$	-
Ti	-	-	$<1,6 \cdot 10^{-7}$	-	-	$n \cdot 10^{-4}$
V	-	-	$<1,6 \cdot 10^{-7}$	-	-	-
Zr	-	-	$3,5 \cdot 10^{-5}$	-	-	-
Ni	-	-	$2,7 \cdot 10^{-8}$	-	-	-
Be	-	-	$1,0 \cdot 10^{-7}$	-	-	-
Ba+Sr	-	-	-	-	-	$n \cdot 10^{-2}$

участке ореола источника разрабатывалась самородная сера; на глубине появились прожилки и вкрапления киновари в сопровождении пирита и различных модификаций кремнекислоты.

Воды гейзеров бедны соединениями тяжелых металлов, хотя в составе их устанавливается присутствие серы, бора, мышьяка, хлора, фтора, а на выходах отлагаются аурипигмент, реальгар, самородная сера и др. В кремнистых отложениях гейзера Ротуроа обнаружены ртуть, серебро, золото. В отложениях терм, т.е. в первичных ореолах источников северной части Среднего хребта Камчатки — присутствуют ртуть, медь, молибден, сурьма, свинец.

Интересные, но весьма малочисленные материалы имеются по анализам жидких включений в кристаллах. Для последних характерны многокомпонентность, богатство хлора и натрия, обязательное присутствие тяжелых металлов или их спутников.

Наряду с многокомпонентностью состава минеральных источников устанавливается и многокомпонентность вулканических эксгалаций и продуктов фумарольной деятельности, так или иначе имеющих отношение к рудообразованию. В отложениях эксгалаций и фумаролл содержатся окислы, сульфиды, галогениды, сульфаты, карбонаты, борнокислые соединения, силикаты, как правило несущие примеси тяжелых металлов. Так в отложениях фумаролл вулкана Авачи А.Н.Заварицкий /5/ установил новообразования в виде марказита (с одновременным изменением пород в каолиноподобную массу) с примесью сернистого железа и металлов — мышьяка, сурьмы, висмута, меди, свинца, олова, цинка. В других случаях в отложениях была установлена сера, с примесью селена и теллура, а также водные сульфаты алюминия, железа, магния, кальция, натрия, калия. В выделениях высокотемпературных фумаролл, кроме того, был установлен и акцессорный бор. Подробному изучению были подвергнуты отложения фумаролл Долины Десяти Тысяч Дымов на Аляске /10/. Здесь были установлены заметные количества рассеянных тяжелых металлов в виде сульфидов свинца, цинка, меди, железа, а в газообразных выделениях — значительные количества $HC1$ и HF . Вдоль одной из трещин отложился магнетит с примесями свинца, меди, молибдена, цинка и других металлов. Наконец, хотя фумароллы Везувия и Этны в части тяжелых металлов изучены еще недостаточно, однако в их отложениях обнаружено присутствие галенита, сфалерита, пирротина, ковеллина, аурипигмента, реальгара, окислов железа, меди и другие соединения.

Из приведенного следует:

I. Состав растворенных веществ в гидротермах и выносах из фумаролл и др. является безусловно многокомпонентным. Многокомпонентными по химическому составу являются и отложения упомянутых образований. Ничто не мешает сопоставить эти отложения с первичными ореолами рассеяния постмагматических месторождений, образование которых обязано действию тех же гидротерм, эксгалаций и т.п. Отсюда следует, что элементный состав первичных ореолов должен быть многокомпонентным, в пределе, охватывающем все элементы периодической системы.

2. Элементный состав первичных ореолов должен быть качественно схожим для разных по составу коренных месторождений. Вопросы о возможной специализации гидротерм и о том, как из многокомпонентных и, в силу этого, качественно схожих постмагматических продуктов сплошь и рядом образуются месторождения различных мономинеральных руд в этой работе не разбираются.

Количества выявляемых образований, могущих рассматриваться на первых порах как первичные ореолы рассеяния, будут значительно превышать числа случаев обнаружения по ним коренных месторождений.

в/ Движущие силы и механизм образования первичных ореолов

Практика геохимических исследований убедительно показывает, что первичные ореолы рассеяния развиваются как вдоль трещин и ослабленных зон, так и внутри массивных горных пород. Из указанного следует необходимым принять, в качестве движущих сил образования ореолов, по меньшей мере две из известных причин — инфильтрацию и диффузию. Инфильтрация и ее возможное значение для геологии рассмотрены в работах Д.С.Коржинского /II, I2/ и Р.Мэкса /I4/. Диффузия через воды, пропитывающие поры горных пород, изложена в работах Д.С.Коржинского /I2, I3/; диффузия непосредственно через твердое вещество пород /диффузия в твердом состоянии/ рассмотрена у И.Бугге /I5/ и Р.Баррера /I6/.

Под инфильтрацией понимается процесс просачивания или течения растворов через среду с сопротивлением вдоль по ослабленным зонам, либо через систему сообщающихся между собой свободных пор или трещин; компоненты переносятся течением растворов. Согласно Д.С.Коржинскому /I2/ движущей силой инфильтрации постмагматических рудообразующих растворов, совершающейся в этом случае снизу вверх, является гравитационное давление образующихся в остывающей магме кристаллов. Эти кристаллы выдавливают более легкие жидкие растворы из застывающей породы, и они движутся в направлении меньших давлений — кверху. Указанное давление усугубляется давлением водных паров, которое в подходящих условиях может быть значительным. Так по опытам Горансона /I0/ гранит с 5% воды при 900° способен развить давление в 750 атм, которое превосходит давление, развиваемое силами сцепления воды в капиллярных порах $\delta 1 \cdot 10^{-6}$ см и оцениваемое примерно в 285 атм.

Минерализованный раствор силой суммарного давления, преодолевая сопротивление поровых вод, вводится в трещины и поры породы, через которую он просачивается и где, в благоприятных случаях, оставляет свою нагрузку вследствие так называемого фильтрационного эффекта. Кратко охарактеризуем понятие и значимость фильтрационного эффекта, пользуясь серией статей Д.С.Коржинского /II, I2/.

Ряд лет тому назад Эршлер благодаря точным экспериментам установил, что при фильтрации неорганических растворов сквозь коллоидные мембраны растворитель /вода/ проходит легче, чем растворенное вещество, которое задер-

живается над фильтром, В результате концентрация растворенных компонентов до фильтра повышается, а после него понижается, что и составляет сущность фильтрационного эффекта.

Согласно данным Эршлера и последующих исследований Гаккера количество растворенного вещества dm , прошедшего через фильтр, пропорционально объему протекшего раствора dV , концентрации раствора C и зависит от фильтрационного эффекта, т.е.

$$dm = \psi \cdot C \cdot dV, \quad (3)$$

где ψ — коэффициент фильтрации $\ll 1$.

В общем случае величина ψ зависит от многих факторов: растворителя; растворенного вещества и его концентрации; характера среды, через которую раствор фильтруется, пористости ее и т.п. Однако в настоящее время нет исчерпывающих данных о роде этой зависимости. Поэтому ограничимся приведением известных экспериментальных данных.

Так, по Эршлеру, при фильтрации хлоридов щелочных металлов через коллоидные мембраны ψ достигало 30–50%; для растворов неэлектролитов /сахара и др./ и для хлоридов бария и магния в этих же условиях величина ψ оказалась незначительной. По данным Цинназуки Тию /II, I2/, фильтровавшего растворы органических веществ /сахара, мочевины/ через тонкие песчаные фильтры, ψ может достигать 50%; наконец, по данным Л.Н.Овчинникова и В.Г.Максенкова /I7/, исследовавших инфильтрацию водных растворов хлоридов и сульфатов меди, железа, марганца, кобальта и никеля через кварцевый песок с размерами частиц 0,002 мм, величина ψ оказалась заключенной в пределах 0,4–0,6. Особое значение фильтрационному эффекту в рассматриваемом смысле при процессах рудообразования придает Р.Мэкей /I4/. Остановимся на ином значении коэффициента фильтрации ψ , которое вскрыто Д.С.Коржинским /II/, давшим математическую теорию процесса инфильтрации.

Исходя из вышеприведенного основного уравнения инфильтрации и введя две величины: V — скорость движения растворителя; V_I — скорость самого растворенного вещества, Д.С.Коржинский показал, что ψ есть мера уменьшения скорости движения растворенного вещества относительно скорости движения растворителя.

$$\psi = \frac{V_I}{V}; \quad V_I = \psi V \quad (4)$$

Таким образом, при течения растворов через полупроницаемые фильтры, скорость движения нагрузки становится в $1/\psi$ раз меньше скорости растворителя, то есть нагрузка должна будет неизбежно отставать от растворителя причём для многокомпонентных растворов, с разными ψ для разных компонентов, это отставание будет многообразным. В результате, при конечных объемах растворов, что всегда имеет место, растворитель /вода/, оставляя за собой "осушенные" породы или просто прекращая движение, оставляет в них и свою

оставшую нагрузку, которая и образует первичные ореолы рассеяния. Таков, по Д.С.Коржинскому, механизм образования первичных ореолов рассеяния при инфильтрации растворов сквозь пористые среды.

Поскольку само явление инфильтрации предполагает предварительное существование ослабленных зон или, в крайнем случае, системы сообщающихся пор, постольку инфильтрация будет определять собой развитие первичных ореолов, прежде всего по восстанию и по простиранию на флангах рудных тел. Вкrest мощности рудных тел, в боках залежей, инфильтрация способна создать первичные ореолы лишь в той мере, в какой в этом направлении развивается трещиноватость и, очевидно, этот фактор трудно считать ответственным за образование первичных ореолов в боках залежи, если вмещающие ее породы являются плотными. С помощью инфильтрации трудно также объяснить случай, когда поры пород или даже ослабленные зоны в них уже заполнены водными растворами, а подъёмная сила инфильтрации недостаточна для выдавливания их в окружающее пространство. В этих случаях образование первичных ореолов должно идти под влиянием других причин; таким образом, мы приходим к мысли, что при образовании ореолов известную роль играет и диффузия.

В настоящее время целый ряд исследователей приписывает диффузии, особенно в твердом состоянии, весьма значительную роль в геологических процессах. Так Бугге /15/, используя этот фактор, достаточно убедительно объясняет образование в Южной Норвегии целых полей своеобразных пород. Поэтому ниже мы останавливаемся на диффузии достаточно подробно, имея в виду именно этим фактором объяснить образование первичных ореолов в боковых породах рудных залежей, если эти породы являются массивными.

В общем смысле под диффузией понимается обусловленное тепловым движением перемещение частиц в направлении убывания их концентраций. Диффузия приводит к выравниванию концентраций и к равномерному заполнению частицами объёма. Диффундировать могут ионы, атомы, молекулы и другие более крупные частицы /коллоиды/, лишь бы они находились в броуновском движении. Диффузия имеет место в газах жидкостях, твердых телах и в чистом виде, при прочих равных условиях, управляется законом диффузии Фика:

$$dm = -D.S \frac{\partial c}{\partial x} dt \quad (5)$$

где dm — количество диффундирующего вещества;

S — площадь, через которую происходит диффузия;

$\frac{\partial c}{\partial x}$ — градиент концентрации — движущая сила диффузии;

D — коэффициент диффузии, определяющий скорость диффузии и зависящий, при прочих равных условиях, от рода диффундирующего вещества и свойств среды, в которой происходит диффузия.

dt — элемент времени.

Наиболее легко диффузия происходит в газах, более трудно — в жидкос-

тяж и наиболее медленно — в твердых телах. Однако даже в этом последнем случае, как указывают некоторые авторы, например Бугге /15/ и Р.Бэррер/16/, коэффициент диффузии отличается от нуля.

В особых случаях перемещение вещества может происходить под влиянием разности температур или разности давлений. В геологии такие случаи имеют место при дифференциации расплавов (принцип Соррэ) и при динамометаморфизме (принцип Рикке).

Р. Бэррер для собственно диффузии в твердом состоянии различает три основных пути: по поверхности, вдоль внутренних граней и сквозь кристаллическую решетку.

Поверхностная диффузия совершается с наибольшей легкостью, но в геологии играет подчиненную роль. Главное значение здесь имеет диффузия по "внутренним" поверхностям и сквозь кристаллические решетки.

Существование внутриобъемных разрывов в твердых телах Бэррер видит в том, что вода, спирт, эфир проникают в стекло или кварц на заметную глубину даже в короткие промежутки времени (порядка 15 мин) при внешнем давлении порядка 15 тыс.атм. Нет сомнений в существовании подобных разрывов и в горных породах; возникновение же высоких давлений в литосфере, особенно в ее глубоких горизонтах, является обычным. Поэтому не вызывает никакого удивления факт существования в породах волосных и волосно-пленочных вод, проникающих в породы по системе внутриобъемных трещин и представляющих в общей совокупности благоприятную для диффузии жидкую среду. Выдающаяся геохимическая роль упомянутых вод неоднократно отмечалась разными авторами.

Относительно собственно объемной диффузии, Бэррер указывает, что в идеальном кристалле, образованном правильно расположенными в пространстве в трех измерениях атомами, ионами или молекулами, увязанными в строгие решетки, никакой ионной проводимости или атомной диффузии быть не может. Эти явления происходят в кристаллах в результате имеющихся и возникающих дефектов. Последние выражаются, прежде всего, в нарушении однообразности и компактности строения кристаллических решеток и, очевидно, могут заходить очень далеко. Например, в группе шпинелей типа $MgAl_2O_4$, по Бэрреру, некоторые составные части решетки могут отсутствовать вовсе, хотя решетка будет сохранять еще свою общую структуру. В ряде случаев на практике имеет место заметное нарушение закона кратных отношений.

Примером окисей с избытком металла могут служить окиси цинка и кадмия. Другие окислы дают системы с избытком кислорода (окислы железа, закись меди, окись никеля), причём этот избыток определяется давлением и может выражаться десятками долями процента.

Пути диффузии Бугге усматривает как в межзерновой жидкостной пленке, образованной волосными и волосно-пленочными водами, так и непосредственно через кристаллическую решетку. При этом он полагает, что крупные ионы O , OH , Cl , F и т.п. диффундируют в межзерновой жидкости, тогда как малые ионы

В, С, Ве, и т.п. могут диффундировать почти одинаковой скоростью как в жидкости, так и сквозь кристаллическую решетку. Последний путь является преобладающим на больших глубинах, где пористость пород сходит на нет.

Механизм диффузии в жидкостной пленке не требует пояснений. Механизм диффузии непосредственно сквозь кристаллическую решетку Бугге объясняет следующим образом:

1. Диффундирующие ионы занимают положение между главными компонентами решетки и при диффузии перескакивают из одного промежуточного положения в другое. Этот тип диффузии свойственен ионам с малыми радиусами и открытым решеткам, в том числе и ненарушенным.

2. Диффундирующие ионы перемещаются через кристаллическую решетку скачками, от одного незанятого положения к другому. Этот тип диффузии свойственен ионам, одноименным с ионами решетки или изоморфным с ними, и происходит при дефектных решетках.

Важной формой диффузии в твердом состоянии Бэррер считает ионную диффузию, наблюдающуюся в цеолитных структурах.

Цеолиты (А.Г.Бетехтин /18/) представляют собой водные алюмосиликаты, главным образом кальция и натрия, отчасти бария, стронция, калия и крайне редко магния и марганца. Среди цеолитов много минеральных видов, отличающихся содержаниями воды и соотношениями катионов, часто не укладывающимися в простые химические формулы.

Характерной является структура цеолитов. В основе ее лежит анионная решетка, представленная каркасом алюмокремнекислых тетраэдров, с большими каналами полостей. В этих полостях располагаются катионы, уравнивающие отрицательный заряд анионного каркаса. Одновременно полости заполнены "цеолитной" слабо связанной с каркасом водой, несущей растворенное в ней вещество. Особенно все это резко выражено в цеолитах с плочатым расположением анионного каркаса. Молекулы цеолитной воды могут быть легко заменены молекулами H_2S , NH_3 и т.п.; кроме того, характерна легкость, с которой катионы из водного раствора вытесняют и заменяют собой катионы "решетки" - свойство цеолитов, используемое в технике для смягчения "жесткой" воды.

К веществам, обладающим цеолитными свойствами, относятся также некоторые минералы глины (напр. монтмориллонит); по плочатости решеток к цеолитам близки слюды и т.п.

Основная идея Бэррера сводится к обоснованию особенной легкости диффузии ионов через воду, заполняющую пространство между плоскостями решеток, и каналы в "рыхлых" структурах цеолитного типа, в том числе путем обмена катионами, особенно характерного для собственно цеолитов и некоторых глинистых минералов.

Предполагают, что диффузия водорода в виде атомов и ионов в решетках палладия и подобных ему металлов является диффузией "цеолитного" типа. Аналогичным образом рассматривают механизм течения газов через те же цеолиты, силикатные стекла и органические мембраны. Наконец, Хевеши объясняет с по-

добных же позиций исключительно быструю диффузию золота в свинце.

Итак, по Бэрреру и Бугге диффузия в твердых телах может осуществляться многими путями, а именно: непосредственно через решетки, благодаря дефектам в них; через поровые воды; через структуры цеолитного типа, характерные для некоторых минеральных видов.

Изложенное касается механизма диффузии, однако решающим является величина коэффициента диффузии, определяющая количественную сторону дела.

Хотя в настоящее время нет исчерпывающих данных по этому вопросу, тем не менее некоторые авторы приводят отдельные сведения, к сожалению, без указания, относятся ли они к диффузии в межзерновой водной пленке или непосредственно сквозь кристаллические решетки. Правда, есть основания думать, что коэффициент диффузии в водных пленках в силу тонкости их вряд ли очень различается, особенно при больших давлениях, от коэффициента для кристаллических решеток.

Бэррер подчеркивает, что по опытным данным коэффициенты диффузии металлов в металлах, в целом, реально отличаются от нуля, хотя обычно невелики. Указанное относится и к самодиффузии.

При количественных измерениях Робертс -Аустен обнаружил, что при температуре 300°C золото диффундирует сквозь свинец быстрее, чем поваренная соль через воду при 18°C (температуры плавления золота 1063°C и свинца $327,4^{\circ}\text{C}$). Далее при помощи диффунданта - радиоактивного изотопа Zn^{65} - было показано, что самодиффузия атомов цинка в монокристаллах этого же металла, в расчёте на сутки, выражается конечными цифрами. Аналогичные результаты были получены при исследовании диффузии/в твердом состоянии/атомов меди в алюминии, бериллии, кадмии, олове, кремнии, цинке. В отдельных случаях установлены аномально высокие коэффициенты диффузии в твердом состоянии, например для случаев сплавов металлов с такими полуметаллами, как селен и теллур.

Кстати упомянем, что на практике давно замечено значительное омеднение со временем олова в пайках медных изделий; к этому же порядку явлений надлежит отнести установленное обеднение цинком верхних слоев латунных изделий, происходящее за счёт диффузии цинка из глубины, с последующим испарением.

В книге Бэррера приводится много экспериментальных материалов по диффузии в твердом состоянии и в неметаллических телах, в частности в стеклах. Так указывается, что при высокой температуре кварцевое стекло становится проницаемым для газов и приводятся конкретные цифры, являющиеся хотя и малыми, но конечными для диффузии гелия в пайрексе и натровом, свинцовом и иенском стеклах. Эти цифры, как и следовало ожидать, растут с повышением температуры и давления.

Им же приводятся многочисленные примеры технического применения диффузии в твердом состоянии. Так отмечается, что Фарадеем и Стодардом в 1820г. были получены первые сплавы из спрессованных металлических порошков при нагревании их ниже точки плавления; процесс образования сплавов был объяснен с точки зрения диффузии в твердом состоянии.

В последующем было показано, что диффузия металлов в порошках растёт с уменьшением размеров зерен и повышением температуры. В настоящее время явления диффузии металлов (или в металлах) широко используются в технике, в частности при цементации стальных валков углеродом, при усилении прочности поверхности медных (алюминием) и стальных (хромом) изделий и т.п. Наряду с этим применяется электрохимический способ изготовления фотоэлементов, при котором слой металлического натрия на внутренней стенке стеклянного баллона фотоэлемента "наносится" за счёт диффузии натрия из расплава его азотнокислой соли непосредственно через стекло. Добавим, что по последним журнальным сообщениям для изготовления технических голубых алмазов в Иоганнесбурге разработан способ ввода в обычный алмаз мельчайших частиц алюминия, с помощью диффузии при высокой температуре. При этом какого-либо изменения основных свойств алмаза не наблюдается.

Бугге также приводит ряд данных о количественных значениях коэффициентов диффузии в твердых телах, особенно ценных в том смысле, что они характеризуют собой геологические объекты. Так для металлов и простых ионных соединений коэффициенты диффузии в твердом состоянии оцениваются цифрами ($n \cdot 10^{-5}$ - $n \cdot 10^{-20}$) $\text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$, хотя и отмечается, что для силикатов подобные величины точно не определялись. При перерасчёте на геологические промежутки времени (например на 1 млн. лет) интересующие нас цифры становятся ощутимыми - ($n \cdot 10^8$ - $n \cdot 10^{-7}$) $\text{см}^2 \cdot 10^{-6}$ лет.

В соответствии с данными Таммана, в книге Бугге (см. табл. 4) приводятся значения критических температур T_k для разных веществ, в зависимости от температур плавления этих же веществ T_s , при которых рассматриваемые вещества приобретают способность заметно поддерживать диффузию в твердом состоянии.

Таблица 4

Температура	Вещества		
	металлы	простые ионные соединения	силикаты
T_k в долях T_s	0,3 - 0,4	около 0,57	0,8 - 0,9

При этих условиях осуществление диффузии в кварце надлежит ожидать около 900°C , а в типичных силикатах - в полевых шпатах - около 1000°C . Однако, как показывает опыт, присутствие в реакционном пространстве некоторых веществ - катализаторов (например, углекислых щелочей) способно значительно уменьшать величины критических температур. Так в примере образования силиката бария BaSiO_3 за счёт взаимодействия в твердом состоянии кварца SiO_2 и виверита BaCO_3 (температуры плавления 1713°C и 1740°C соответственно) реакция приобретает заметную скорость при $T_k = (700-800^\circ\text{C})$, снижающуюся до $T_k = 400^\circ\text{C}$ при присадке безводной соды Na_2CO_3 , имеющей температуру

плавления $T_s = 852^\circ\text{C}$.

Таким образом, Бугге высказывает мнение, что нет никаких оснований считать коэффициенты диффузии в твердом состоянии для природных геологических образований равными или близкими нулю. Наоборот, надо ожидать, особенно в специфических условиях, что рассматриваемые величины будут вполне заметными, тем более в расчёте на геологические промежутки времени. Поэтому он считает возможным именно за счёт диффузии объяснить возникновение в природе ряда геологических образований, о чем подробно сказано выше при рассмотрении первично-конституционального рассеяния в метаморфических породах.

Подытоживая все сказанное о явлениях диффузии в твердом состоянии как в искусственных, так и природных образованиях, мы безоговорочно можем принять все соображения об отличии коэффициентов диффузии от нуля, по крайней мере в особых условиях. При этом и в применении к геологическим образованиям является безразличным, происходит ли перемещение вещества через воду, пропитывающую породу (поровую, волосную, волосно-пленочную), или же непосредственно через кристаллическую решетку (или вдоль нее, как в случае решеток цеолитного типа). Поэтому есть все основания допускать, наряду с инфильтрационными ореолами, существование ореолов чисто диффузионного типа, лишь бы к тому имелась побуждающая движущая сила.

Относительно природы этой движущей силы диффузии в твердых геологических образованиях Бугге высказывает вполне приемлемое предположение о прямой зависимости ее от возникновения, в силу тех или иных причин, разностей химических потенциалов. Диффузия будет происходить в направлении падения значений химического потенциала.

Математически движущая сила диффузии в каком-либо направлении, т.е. напряженность F в поле диффузии по направлению S имеет следующее выражение:

$$F = -\text{grad } \mu = -\frac{\partial \mu}{\partial S} \cdot \frac{1}{L} \quad (6)$$

где μ — молярный химический потенциал;

$$L = 2,69 \cdot 10^{19} \text{ мол/см}^3 \text{ /число Ломмидта/}.$$

При этом под химическим потенциалом, в полном соответствии с общепринятыми определениями, понимается особая функция состояния, количественное выражение которой прямо зависит от температуры, давления и концентрации компонентов системы. Такой подход к явлениям природной диффузии позволяет не вводить в рассмотрение частные случаи диффузии под влиянием разности концентраций (закон Фика), разности температур (принцип Сорре) или разности давлений (принцип Рикке), а заменить их обобщенным представлением.

Существует ряд способов выражения химического потенциала — через приращение внутренней энергии данной фазы на единицу массы составной части, при условии постоянства объема, энтропии и масс остальных составляющих; через энтальпию, свободную энергию и пр. при постоянных давлении, температу-

ре и массах остальных членов системы и т.п.

Казалось бы, что существующие и возникающие даже в верхних слоях литосферы перепады температур (по крайней мере до многих сотен градусов), давлений (до многих тысяч атмосфер) и концентраций (в относительной мере до многих единиц и десятков раз), открывают широкие возможности для возникновения разностей химических потенциалов, а вслед за этим и диффузии, в том числе и в твердом состоянии. Тем не менее, не следует переоценивать значения в природе этого принципиально возможного к осуществлению явления.

На самом деле, если бы диффузия в твердом состоянии осуществлялась в природе довольно легко, то мы, наверное, не столь часто наблюдали бы значительные разности концентраций некоторых элементов-примесей даже внутри одного и того же минерала; кларки различных соседствующих пород для элементов безминерального рассеяния разнились бы не скачкообразно; внутри радиоактивных минералов не сумели бы сохраниться в течение миллиардов лет скопления гелия в заметных количествах и под большими давлениями, наблюдавшимися в некоторых клеветах; не столь обычно встречались бы жидкостные и газовые включения в минералах, особенно принимая во внимание часто существующее в них высокое внутреннее давление и т.п.

Из этого следует, что для проявления диффузии в твердом состоянии необходимо возникновение особо благоприятных условий; в частности, необходимо допустить, что химический потенциал в зоне, откуда происходит диффузия, должен превышать потенциал на участках, куда диффундирует вещество, по всем трем независимым переменным: температуре, давлению и концентрации.

Под этим углом зрения произведем оценку значений химического потенциала как движущей силы диффузии компонентов постмагматических образований из этих последних в боковые породы.

Не может быть сомнения, что температура постмагматических образований, дающих рудные месторождения, высокая и при том выше, чем у пород, по которым они поднимаются. Давление в этих образованиях также не меньше, чем в породах; следовательно, можно принять, что две независимые переменные (температура и давление) в выражении химического потенциала для постмагматических образований всегда обеспечивают возможность активной диффузии во вне.

Рассмотрим влияние концентрации по табл. 5, в которой приведены концентрации некоторых элементов в гидротермах и их отношение к средним кларкам литосферы в расчёте на единицу объёма. Следует подчеркнуть, что материалы по полным анализам растворенных веществ в различных гидротермах очень скудны, поэтому пришлось ограничиться выборочным приведением элементов, а цифры содержаний в растворах брать из данных анализов, относящихся к различным источникам. Элементы расположены в порядке убывающих значений диффузионного фактора, под которым понимается отношение концентрации рассматриваемого элемента в природном растворе (в весовых %) к среднему кларку литосферы (также в весовых %), уменьшенное в 2,79 раза (средняя плотность литосферы) для приведения к одинаковым объёмам.

Таблица 5

Элемент	Средний кларк литосферы, вес. % (по А.П.Виноградову) /I4/	Содержание С _{гидр.} в водах гидротерм, вес. % (разные источники)	Диффуз. фактор $\left(\frac{C_{гидр.}}{C_{р. кларк}} \cdot \frac{I}{2,79} \right)$
Na	2,64	$n \cdot 10^0 / 9 /$	> I
Cl	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^0 / 9 /$	> I
B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3} / 19,20 /$	1,3
J	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4} / 8 /$	1,2
Br	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4} / 8 /$	1,1
Ba	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^2 / 9 /$	около I
S	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{-1} / 8 /$	0,90
As	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$(3-6) \cdot 10^{-4} / 19,20 /$	0,2-0,4
Co	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3} / 21 /$	0,17
Zn	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3} / 8 /$	0,45
Cu	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$2,89 \cdot 10^{-3} / 22 /$	0,10
Sb	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5} / 19,20 /$	0,25
Li	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-4} / 6 /$	0,04
Ge	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-6} / 23 /$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Sn	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-5} / 8 /$	$9 \cdot 10^{-4}$
Hg	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-8} / 7 /$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Be	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-7} / 7 /$	$5,8 \cdot 10^{-5}$
Ni	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-8} / 7 /$	$1,2 \cdot 10^{-6}$

Несмотря на недостаточную полноту приведенных в таблице данных, к тому же относящихся к составу уже "отработанных" гидротерм, некоторые существенные выводы могут быть сделаны:

I. Некоторые элементы - натрий, хлор, бор, иод, бром, барий, очевидно сера и , несомненно, другие - очень часто должны иметь в постмагматических растворах безусловно повышенные против вмещающих пород содержания. Это обстоятельство, наряду с высказанными соображениями о температуре и давлении в указанных образованиях, позволяют утверждать, что химический потенциал постмагматических образований в отношении перечисленных элементов должен быть повышенным. Следовательно, такие элементы как натрий, хлор, бор, иод, бром, барий, сера должны рассматриваться в природе как вероятнейшие диффунданты. В эту же группу необходимо отнести и ртуть, хотя этот элемент имеет низкий диффузионный фактор в водных растворах. Диффузия этого элемента должна упрощаться в силу высокой упругости паров ртути, существование которых не исключается даже при относительно низких температурах. Диффузия же паров происходит значительно легче, чем диффузия ионов в водных растворах.

2. Ряд элементов — мышьяк, кобальт, цинк, медь, сурьма, вероятно литий, равно как и другие элементы (в частности, никель, как близкий по характеру к кобальту; его попадание в конец таблицы объясняется, очевидно, недоразумением) — могут рассматриваться как активные диффунданты, только при стечении ряда обстоятельств. В частности, если поднимающиеся постмагматиты встречаются на своем пути полупроницаемые породы, способные благодаря свойственному им фильтрационному эффекту создать местные повышенные концентрации рассматриваемых элементов, или если постмагматиты в начале своего пути повысят свою концентрацию за счёт выщелачивания из боковых пород, а затем вступят в породы с меньшими кларками тех же элементов, то диффузия в боковые породы сможет произойти.

3. Наконец, некоторые элементы — несомненно германий, а также олово, бериллий и другие — будут диффундировать из постмагматитов в боковые породы лишь в ограниченном числе случаев. В частности, для бериллия диффузию следует допускать для случаев контактирования расплавов и твердой породы, при условии повышенного кларка бериллия в расплаве (например, отдельных гранитов и сланцев, бериллиеносных пегматитов и любых вмещающих пород и т.п.).

Таким образом, с учётом сказанного относительно всегда повышенных значений температуры и давления в постмагматитах можно считать, что для значительного числа их компонентов химический потенциал в целом будет повышенным, принципиально благоприятствующим возникновению диффузии из постмагматитов в боковые породы. Следовательно, поскольку коэффициенты диффузии в твердых телах отличны от нуля, возникновение диффузионных ореолов первичного рассеяния рудных месторождений во вмещающих их породах столь же возможно, как и ореолов инфильтрационных.

Резюмируя изложенное отметим, что движущими силами процесса образования первичных ореолов следует считать инфильтрацию и диффузию, последнюю как через поровые воды, так и непосредственно сквозь кристаллические решетки. При этом в природе эти силы чаще всего будут действовать совокупно и одновременно, хотя местами, или даже точно, инфильтрация будет ведущей, вызывая диффузию путем повышения концентрации в результате фильтрационного эффекта. Следует полагать, что при инфильтрации ореолы будут образовываться преимущественно в направлении восстания и простиранья рудных тел, в то время как при диффузии ореолы создадутся вкрест простиранья залежей.

Поскольку инфильтрация должна происходить быстрее, нежели диффузия (при рудообразовании первая, в отличие от второй, происходит по уже подготовленным путям), постольку протяженность инфильтрационных ореолов должна быть в соответствующей степени больше.

г/Распределение элементов в ореолах

Если согласиться с вышеприведенными доводами в пользу многокомпонентности состава элементов в первичных ореолах рассеяния, а также считать инфильтрацию и диффузию основными процессами, приводящими к образованию пер-

вичных ореолов, то неизбежно следует признать зональность в распределении различных элементов в этих образованиях. При этом имеются в виду первичные ореолы, возникшие в течение одного ограниченного во времени акта рудоотложения, без каких-либо последующих процессов наложения, которые могут затушевывать основные закономерности.

Для последующего принимается, что все перемещения элементов при ореолообразовании происходят только путем инфильтрации ореолообразующих растворов или диффузии в поровых водах. При этом предположении и рассмотрены соответствующие доказательства в пользу зонального строения первичных ореолов различного происхождения и соображения о порядке расположения элементов в них. Непосредственно ниже приведены некоторые общие физико-химические положения, необходимые нам в дальнейшем.

1. Поведение элементов в неподвижных и равномерно и прямолинейно движущихся растворах — одинаково; одинаковыми являются и законы диффузии этих элементов в указанных условиях. В соответствии с этим инфильтрация раствора через преграду отличается от диффузии компонентов того же раствора через эту же преграду только по скорости: в случае инфильтрации она, в первом приближении, выше на величину перемещения раствора в целом. Поэтому ниже вполне достаточно рассмотреть особенности диффузии.

2. Диффузия элементов в чистом виде определяется скоростями / подвижностями / элементарных частиц растворенного вещества в растворителе, отнесенными к одинаковым условиям. Подвижности ионов элементов определяются, при прочих равных условиях, их склонностью к гидратации. Гидратация состоит в том, что ион, поляризуя несомым им зарядом окружающие молекулы воды, притягивает их к себе: катионы притягивают отрицательные концы ближайших водных диполей, анионы — положительные. В результате вокруг иона возникает своеобразная водная оболочка, эффективные размеры его увеличиваются и подвижность падает.

3. Гидратация иона, как показывают опыты, растет с увеличением заряда и падает с увеличением размеров; иными словами, она пропорциональна величине ионного потенциала иона, понимая под этим отношение величины заряда иона к его радиусу. Следовательно, подвижность иона обратно пропорциональна его ионному потенциалу. Особенно отчетливо это проявляется на элементах, принадлежащих к одинакововалентным группам периодической таблицы элементов, например на группе щелочных металлов (табл. 6.).

Вместе с тем эту закономерность следует использовать лишь в пределах данной вертикальной группы равновалентных элементов, и она теряет непрерывность при переходе от одной группы к другой.

В своей статье Р. Мэкей приводит два основных правила, согласно которым можно определить относительную степень проницаемости для металлических элементов при инфильтрации (диффузии) растворов:

а). В данной валентной группе элементов периодической таблицы, имеющей равное число электронов во внешней оболочке, металл, расположенный ниже в таб-

Таблица 6

Одновалентные ионы	Li	Na	K	Rb	Cs
Ионные потенциалы	+ 1,3	+ 1,02	+ 0,75	+0,67	+0,61
Числа молекул воды в гидратационной оболочке ионов	120	66	17	14	13
Возрастание подвижности ионов) —————>				

Примечание: Числа молекул воды в гидратационной оболочке ионов почерпнуты из статьи Р.Мэкея /14/

лице, имеет большую проницаемость. Исключениями являются никель и кобальт.

б). В горизонтальном ряду периодической таблицы какой-либо металл обладает большей проницаемостью, чем ближайший к нему элемент, в направлении большего числа электронов в незаполненной оболочке. Сурьма и цинк являются исключениями.

4. По особенностям поведения элементов в водных растворах, в зависимости от их ионного потенциала, катионы, по Б.Мэзону /24/, могут быть подразделены на следующие три группы:

Первая группа включает катионы с ионными потенциалами до +3. Эти элементы - Li, Na, K, Rb, Cs, Mg, Ca, Sr, Ba, Mn^{+2} , Fe^{+2} - являются устойчивыми в растворах и, следовательно, хорошими диффундантами. В эту же группу по указанному признаку следует отнести такие типичные элементы гидротерм как Ni, Co, Zn, Cd, Hg, Pb, Cu, Ag, Au и, может быть, низковалентные ионы Sb, Bi, Te.

Вторая группа включает элементы с ионными потенциалами свыше +3 и до +(10-12). Эти элементы - Be, TR, Sc, Fe^{+3} , Ga, Al, Th, U, Zr, Ti, Nb, Ta, Mn^{+4} , Mo, (Si) - довольно легко гидролизуются (тем легче, чем выше ионный потенциал), выпадают из раствора и, следовательно, являются плохими диффундантами. В эту же группу следует отнести такие типично рудные металлические элементы как Sn, W, As (?), In .

Третья группа включает катионы с ионными потенциалами выше +(10-12) и до +33. Эти элементы -(Si), B, C, (V), P, N, S - чрезвычайно легко вступают во взаимодействие с растворителем (водой), образуют сложные анионы и в этом состоянии способны к устойчивому существованию в водных растворах и, следовательно, к диффузии. Элементы третьей группы, благодаря малым размерам своих ионов и вопреки большим ионным зарядам, способны к диффузии непосредственно сквозь кристаллические решетки.

5. Для общей ориентировки в свойствах главных элементов гидротерм приводится сводная табл.7 .

Элемент	Обычная валентность	Ионный радиус, Å	Величина ионного потенциала	Число изотопов
<u>I. Основные рудные элементы</u>				
Sn	+4	0,74	5,4	10
W	+4	0,68	5,9	5
Mo	+4	0,68	5,9	7
Ga	+3	0,62	4,9	2
As	+3	0,69	4,3	1
	+5	0,47	11,0	
Sb	+3	0,90	3,3	2
	+5	0,62	8,1	
Sc	+3	0,83	3,3	1
In	+3	0,92	3,3	2
Bi	+3	1,20	2,5	1
Fe	+2	0,83	2,4	4
	+3	0,67	4,5	
Ni	+2	0,78	2,6	5
Co	+2	0,82	2,4	1
Zn	+2	0,83	2,4	5
Cd	+2	1,03	1,9	8
Hg	+2	1,12	1,8	7
Pb	+2	1,32	1,5	4
Ba	+2	1,43	1,4	7
Cu	+1	0,96	1,05	2
Ag	+1	1,13	0,9	2
Au	+1	1,37	0,7	1
Tl	+1	1,49	0,7	2
	+3	1,05	2,9	
<u>II. Группа щелочных металлов</u>				
Li	+1	0,78	1,3	2
Na	+1	0,98	1,02	1
K	+1	1,33	0,75	3
Rb	+1	1,49	0,67	2
Cs	+1	1,65	0,61	1
<u>III. Группа галогенов</u>				
F	-1	1,33	-0,75	1
Cl	-1	1,81	-0,55	2
Br	-1	1,96	-0,51	2
J	-1	2,20	-0,45	1
<u>IV. Группа серы</u>				
S	-2	1,74	-1,15	4
	+6	0,34	+17,65	
Se	-2	1,91	-1,05	6
	+6	0,35	+17,12	
Te	-2	2,11	-0,95	8
	+6	(0,56)	+(10,71)	
<u>V. Группа "малых" ионов</u>				
C	+4	(0,15)	(27)	2
B	+3	0,20	15	2
Be	+2	0,34	5,9	1
Ge	+4	0,44	9,1	5

Перейдем к рассмотрению непосредственных доказательств зонального строения ореолов, учитывая данные табл. 7.

Как уже указывалось, инфильтрация растворов в пористой среде с внутренним сопротивлением сопровождается фильтрационным эффектом, количественно определяемым коэффициентом ψ и приводящим к отставанию нагрузки относительно растворителя. Поскольку коэффициент ψ , при прочих равных условиях, определяется родом растворенного вещества, иными словами является разным для различных элементов, постольку и внутри многокомпонентной нагрузки также произойдет расслоение. В результате этого некоторые элементы (соединения) окажутся впереди, некоторые - в хвосте, а третьи займут промежуточное положение в потоке; в итоге образуется зональная инфильтрационная колонна элементов, которая, будучи оставлена растворителем, а также в случае простого прекращения движения раствора в целом, поведет к возникновению зонального первичного ореола рассеяния. Указанная мысль отчетливо изложена еще в 1947г Д.С.Коржинским /II/, а общие принципы подобного поведения рудоносных растворов, применительно к рудоотложению, описал Р.Мэкей/I4/.

Попробуем расчётным путем представить себе основные особенности расслоения многокомпонентной нагрузки в зависимости от величины ψ . Для этого представим себе двухслойную среду, разделяемую плоскостью (см. рис. 4).

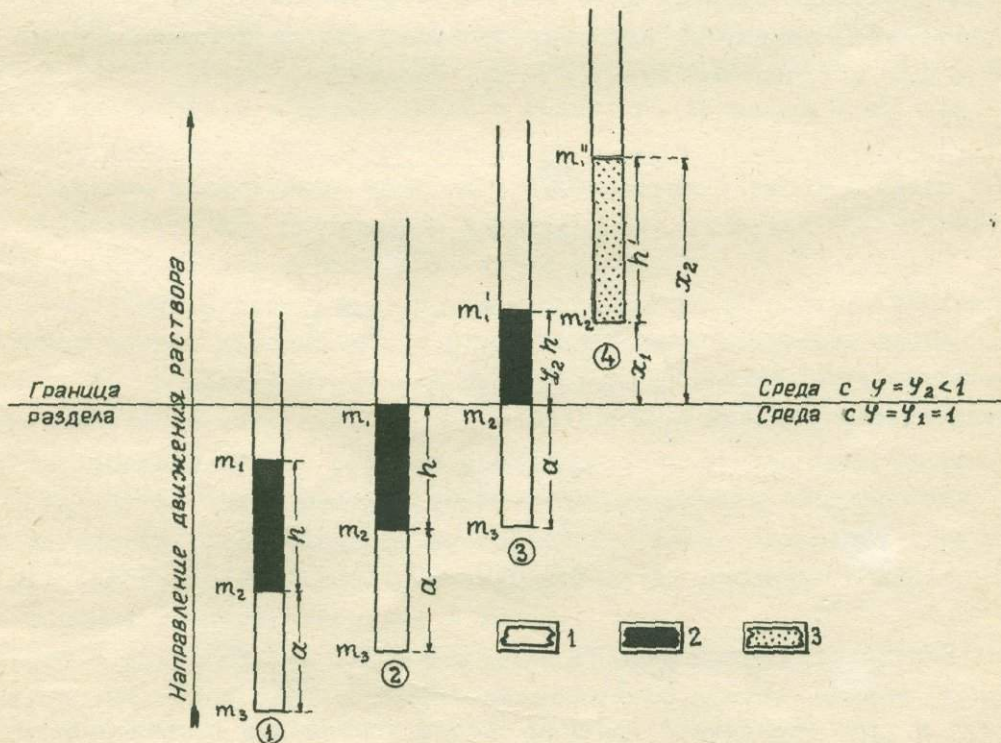


Рис.4. Схема образования инфильтрационного ореола:

- 1 - столб чистого растворителя; 2 - столб однокомпонентного раствора;
3 - инфильтрационный ореол.

Пусть снизу вверх движется водный поток с растворенным в нем компонентом. В согласии с основными представлениями положим скорость воды (растворителя) в обеих средах постоянной и равной V_0 . В то же время положим, что скорость движения растворенного компонента в нижней среде $V_I = V_0$ (принимая значение коэффициента $\varphi_1 = 1$), а в верхней среде $V_2 < \varphi_2 V_0$ (принимая значение коэффициента $\varphi_2 < 1$). Пусть высота столба жидкости "зараженного" компонентом равняется h ; высоту столба чистого растворителя, подпирающего нагрузку снизу примем равным a .

Очевидно, что при движении в нижней среде взаиморасположение растворителя и растворенного вещества будет сохраняться неизменным (положение 1). Положение существенно изменится, когда верхний край "нагрузки" подойдет вплотную к разделительной поверхности (положение 2). С этого момента "нагрузка", вступая в верхнюю среду, будет терять скорость, становящуюся равной $\varphi_2 V_0 < V_0$. Поэтому, в то время как нижний край нагрузки (точка m_2), пройдя путь h , подойдет вплотную к разделяющей плоскости, верхний край нагрузки (точка m_1) пройдет путь равный $\varphi_2 h < h$ (положение 3). Положение 3 позволяет легко решить интересующую нас задачу, которая сводится к ответам на два вопроса: когда нижний край столба растворителя (точка m_3) догонит (и обгонит) вначале нижний (точка m_2), а затем и верхний (точка m_1) края нагрузки. Очевидно растворитель с этих моментов окончательно оставит нагрузку, и она образует ореол рассеяния данного компонента. Ответы на поставленные вопросы легко получаются из следующих простых алгебраических уравнений.

Из равенства промежутка времени, требующегося на то, чтобы точка m_2 прошла путь x_1 , а точка m_3 путь $(a + x_1)$ следует:

$$\Delta t_1 = \frac{x_1}{\varphi_1 V_0} = \frac{a + x_1}{V_0}, \quad (7)$$

отсюда

$$x_1(1 - \varphi_2) = \varphi_2 a$$

$$x_1 = \frac{\varphi_2 a}{1 - \varphi_2} = \frac{a}{\frac{1}{\varphi_2} - 1} = \frac{a}{\psi_2 - 1}, \quad (8)$$

где ψ_2 величина, обратная φ_2 .

Аналогичным образом получается:

$$\Delta t_2 = \frac{x_2 - \varphi_2 h}{\varphi_2 V_0} = \frac{a + x_2}{V_0}, \quad (9)$$

Отсюда

$$x_2(1 - \varphi_2) = \varphi_2 (a + h),$$

$$x_2 = \frac{\varphi_2}{1 - \varphi_2} (a + h) = \frac{a + h}{\frac{1}{\varphi_2} - 1} = \frac{a + h}{\psi_2 - 1}. \quad (10)$$

Формулы (8) и (10) определяют границы ореола компонента в зависимости от величины a и позволяют вычислить протяженность ореола h' в среде с $\varphi_2 < 1$.

$$h' = x_2 - x_1 = \frac{a + h}{\psi_2 - 1} - \frac{a}{\psi_2 - 1} = \frac{h}{\psi_2 - 1} \quad (II)$$

В простейшем случае, когда высота столба чистого растворителя, подпирającego снизу нагрузку (а), равна 0, ореол начинается непосредственно с плоскости раздела, вне зависимости от величины ψ_2 (или $\frac{1}{\psi_2} = \psi_2$).

В табл. 8 приведены относительные величины протяженностей ореолов h' в долях высоты h цилиндра растворителя, "зараженного" растворенным компонентом, для различных компонентов, различающихся значениями ψ (ψ).

Таблица 8

$\psi =$	0,1	0,25	0,5	0,75	0,9
$\psi = \frac{1}{\psi} =$	10	4	2	1,38	1,11
$h' =$	0,11 h	0,33 h	h	3 h	9 h

Легко показать, что распределение компонента в столбе нагрузки полностью передается, в соответствующем линейном масштабе, образуемому ореолу этого элемента.

Все вышеизложенное позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

1. Для компонентов, характеризующихся $\psi_2 = 0$, никакого проникновения в верхнюю среду не происходит. Подобные компоненты накапливаются под непроницаемой для них крышкой и, при достижении соответствующих концентраций, могут вступать в реакции, образуя минералы. Наоборот, компоненты с $\psi_2 = 1$ беспрепятственно проникают в верхнюю среду и смогут задержаться в ней лишь при прекращении движения растворителя.

2. Типичные инфильтрационные ореолы рассеяния в верхней среде образуют лишь компоненты, для которых $0 < \psi_2 < 1$. При этом, чем меньше величина ψ_2 , тем протяженность ореола короче - и наоборот.

3. Если столб жидкости несет многокомпонентную нагрузку, последняя, входя в верхнюю среду, расслаивается в соответствии с присущими компонентам значениями ψ_2 с полной передачей ореолу всех особенностей распределения компонента в столбе нагрузки.

4. Взаиморасположение ореолов различных компонентов относительно друг друга определяется высотой столба чистого растворителя, подпирającego снизу столб с нагрузкой. Если нагрузка распространяется до основания столба растворителя, ореолы всех компонентов начнутся одновременно с плоскости раздела с разными распространениями в высоту.

На рис. 5 представлена схема строения трехкомпонентного ореола; высота столба нагрузки принята за 1, а высота подпирającego столба чистого растворителя равна 0.

К сожалению, очень немного можно обоснованно сказать относительно местоположения природных элементов в зональной колонне, т.к. данных о реаль-

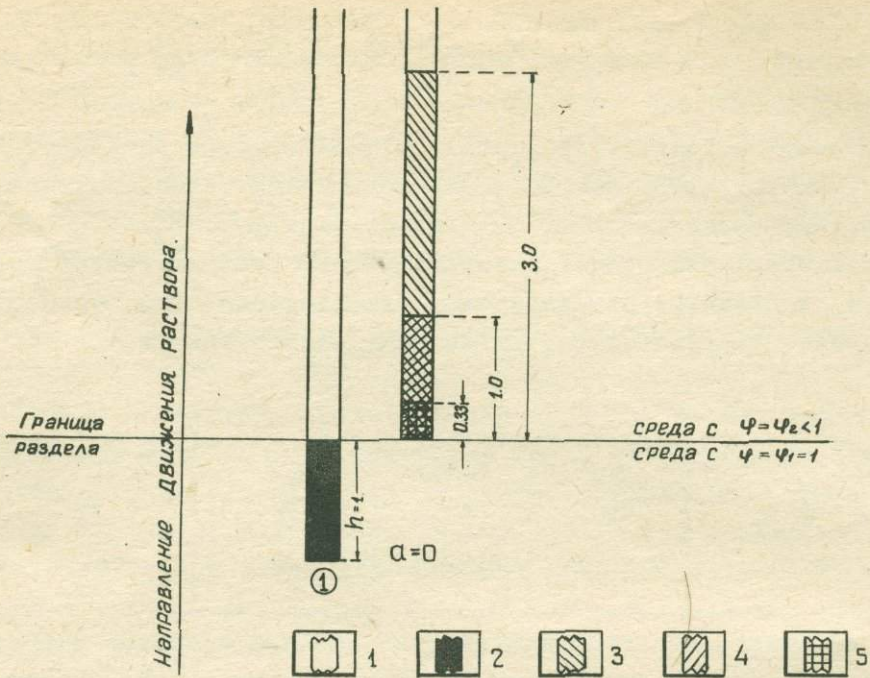


Рис.5. Схема строения трехкомпонентного ореола, образующегося из единого столба нагрузки /при условии, что $\alpha = 0$ /:

1 - столб чистого растворителя; 2 - столб трехкомпонентного раствора; ореолы элементов: 3 - $\psi = 0,75$; 4 - $\psi = 0,5$; 5 - $\psi = 0,25$.

ных значениях коэффициентов ψ для разных элементов и сред получено недостаточно, а геохимические закономерности поведения элементов при процессах рудообразования пока еще не установлены с требуемой полнотой. Р.Мэкей /14/ с своей статье сделал попытку обосновать вертикальную зональность отложения элементов, исходя из соответствующих теоретических физико-химических рассуждений с привлечением данных Фрейдлиха по гидрофильности катионов, по осмосу и с учётом влияния ионного радиуса и валентности.

Исходным пунктом статьи Мэкея является тот факт, что "Когда безразлично, истинный или коллоидный раствор, помещенный в достаточно тонкий сосуд, подвергается соответствующему давлению, вода проходит через стенки сосуда, оставляя соль внутри". В соответствии с этим автор в своей статье приходит к следующему выводу: "Когда рудоносные растворы сталкиваются с соответствующим непроницаемым (или точнее полупроницаемым) барьером, растворы, испытывают сопротивление, так что вода проходит, в то время как минерал (нагрузка) запруживается и отлагается".

Ограничившись только рассмотрением катионов, автор устанавливает, что каждый элемент (металлический) "запруживается" в степени обратной его проницаемости через те или иные барьеры. Степень проницаемости элемента, в первом приближении, обратна его ионным или молекулярным размерам, но в основном она контролируется степенью гидратации катионов. Р.Мэкей дает следующий ряд основных гидротермальных элементов в их относительной последовательности,

соответствующей вертикальной зональности (снизу вверх): олово, медь, цинк, свинец, ртуть.

Кроме того, им высказываются следующие соображения относительно местоположения в колонне других гидротермальных элементов:

Барий — должен занимать высокое положение в колонне в силу своей большой проницаемости.

Золото — благодаря своим свойствам закономерно занимает в колонне высокое положение, но способ переноса этого металла в растворах еще недостаточно изучен, и это не дает возможности объяснить его появление в гипотермальных образованиях.

Серебро — в общем характеризуется высокой проницаемостью.

Висмут — должен отлагаться в высокой зоне.

Вольфрам — по ионному объему, в сочетании с очень высоким молекулярным весом, вполне обоснованно занимает положение внизу колонны.

Мышьяк — из-за малого ионного объема и большого потенциала должен обладать низкой проницаемостью, что определяет его положение лишь выше олова. Случаи появления мышьяка в верхних зонах могут быть объяснены неизвестными формами комплексных анионов.

Сурьма — полностью выпадает из теоретического ряда. Мэкей не находит этому объяснений, полагая, что причину этого следует искать в амфотерных свойствах этого металла.

Бериллий и литий — рассматриваются как металлы с низкими проницаемостями, а для поведения никеля и кобальта не находится объяснений.

Позиция железа также требует объяснений, однако обычно интенсивное развитие пирита в мезотермальной зоне свидетельствует о высокой проницаемости этого металла. По мнению Мэкея, в этом сказывается многообразие ионных форм железа.

Напомним первую объединенную вертикально-зональную колонну, предложенную Эммонсом в 1924 г на основе фактических наблюдений и объясняемую им как следствие закономерного отложения из растворов в результате падения температуры и давления (снизу вверх): олово, вольфрам, мышьяк, медь, цинк, свинец, серебро, сурьма, ртуть. Подчеркивается, что этот ряд выведен на основании минералогических наблюдений и что во многих областях некоторые металлы отсутствуют или развиты очень слабо, хотя обычно они и подчиняются приведенному порядку. В целом ряд Эммонса совпадает с рядом Мэкея.

Здесь уместно привести высказывание В. Эммонса /25/: "Образование систем металлоносных рудных жил (и, добавим от себя, их первичных ореолов рассеяния) происходит на значительных глубинах, и процесс этот недоступен непосредственному изучению. Мы видим только конечные результаты этих процессов и, изучая их, пытаемся создать теорию, которая бы их объяснила".

Следуя этой рекомендации и предполагая, что главным фактором, определяющим подвижность элементов при инфильтрации (и диффузии), является зна-

чение ионного потенциала, представляется возможным наметить следующий ряд вертикальной (снизу вверх) зональности основных гидротермальных металлических элементов (см. табл. 9, в скобках указаны значения ионных потенциалов).

Таблица 9

W (5,9)	Bi (2,5)	Cu (1,05)
Mo (5,9)	Co (2,4)	Cd (1,05)
Sn (5,4)	Zn (2,4)	Ag (0,9)
As (4,3)	Hg (1,8)	Au (0,7)
Sb (3,3)	Pb (1,5)	Tl (0,7)
Ni (2,6)	Ba (1,4)	

Железо (и сера) должны быть сквозными элементами, встречающимися во всех зонах; элементы Ga (4,9), Sc (3,3), In (3,3) должны распределяться в ореолах по высоте, по-видимому в указанном порядке (снизу вверх), однако место этой триады в колонне может быть указано лишь предположительно — в интервале от молибдена до висмута.

Обратим внимание, что на практике удаление элементов в ореоле от их источника, как правило, пропорционально уменьшению их ионных потенциалов. Однако для ряда элементов наблюдаются и аномалии. Такие аномалии дадут: медь, уходящая дальше цинка; сурьма (и мышьяк), которые (особенно сурьма) уходят в верхнюю зону; и, наконец, ртуть, занимающая среди металлов практически самую верхнюю позицию. Аномалия меди не находит объяснения. Причины аномальности сурьмы (и мышьяка) очевидно зависят от многообразности форм их проявления в природных растворах, например в виде низковалентных комплексных ионов; легкость проникновения ртути в верхние зоны необходимо усматривать в высокой упругости ее паров (даже при условиях низкотемпературных гидротерм, например при 100°C) и низкой химической активности ртути. В результате этого ее перемещение может совершаться в виде нейтральных атомов, диффундирующих как бы в газообразном состоянии. Следует подчеркнуть, что все основные вопросы теории ореолов первичного рассеяния ртути (универсальность проявления, отгон ртути в верхние горизонты и др.) были впервые разработаны А.А. Сауковым и опубликованы им в ряде трудов /26, 27, 28, /.

На основании высказанного положения о роли влияния ионных потенциалов на подвижность элементов щелочные металлы при инфильтрации должны выноситься в верхние части ореола, причем Rb и Cs дальше, чем Li и Na.

Согласно данным Д.С. Коржинского /12/, основанным на его наблюдениях над разнообразными эндогенными метасоматическими процессами, ряд подвижности (проницаемости) различных молекул, атомов и ионов металлоидных элементов при инфильтрации следующий (в порядке убывания): H_2O , CO_2 , S, SO_3 , Cl, O, SiO_2 , P, Ti. Это определяет зональность металлоидных элементов в ореоле, которая примечательна в том отношении, что сера (а совместно с нею и селен), серный ангидрит и хлор оказываются способными к выносу на значительные расстоя-

ания. По соображениям, аналогичным вышеприведенным, можно думать, что наибольшей подвижностью должны обладать галоиды J и Br, которые будут выносятся дальше всех элементов.

Конечно, в каких бы облегченных условиях не происходила инфильтрация, необходимо ожидать известного проявления реакций минералообразования и изоморфизма. Эти обстоятельства могут, для некоторых элементов, так или иначе повлиять на их местоположение и интенсивность проявления в ореоле и тем исказить теоретический ряд.

Зональность строения первичных ореолов рассеяния, образовавшихся в результате диффузии в водной среде, неизбежно вытекает из вышеприведенных данных и соображений об отсутствии принципиальных различий в поведении элементов при инфильтрации и диффузии. Распределение элементов в этих ореолах должно повторять, как правило, зональность инфильтрационных ореолов, выведенную выше, однако со следующими специфическими чертами, связанными с меньшей скоростью чистой диффузии, по сравнению со скоростью инфильтрации.

1. Диффузионные ореолы должны быть значительно меньшими по линейным размерам, чем ореолы инфильтрационные. Коэффициент уменьшения следует ожидать, исходя из опытных данных, не менее 10.

2. Способность определенных элементов к изоморфным замещениям, в условиях теснейшего общения с минеральным веществом среды, имеющего место при диффузии, сможет проявиться в полную силу и должна привести к заметному искажению пропорций соответствующих зон диффузионных ореолов по отношению к инфильтрационным. Указанное необходимо ожидать, прежде всего, от свинца, рубидия и таллия, склонных к изоморфному замещению калия; никеля и лития, способных замещать магний; фтора, замещающего гидроксильную группу и т.п. Поэтому вероятно, что из группы щелочных одновалентных металлов наибольшие чисто диффузионные первичные ореолы должен давать цезий, а из группы галоидов — иод и бром. Оправдано следование селена за серой, при отставании теллура.

Зональность ореолов, возникающих путем диффузии непосредственно через кристаллические решетки, также вытекает из факта различной проницаемости твердого вещества для различных частиц. В этих условиях наиболее проникающими, как указано выше, должны быть ионы малых размеров C, B, Be, Ga /перечислены в порядке убывания проницаемости/. Более подробные сведения о рассматриваемом вопросе отсутствуют.

Есть полные основания предполагать что новые возможности поисков связанных с тщательным изучением ореолов рассеяния изотопов и изобаров тех или иных рудообразующих элементов (см. табл. 7, а более подробно об изотопах и изобарах в работе /29/). Для установления этих возможностей, притом в самом общем и упрощенном виде, предположим, что ореолы образуются чисто диффузионным путем в водных крайне разведенных растворах. В этих случаях мы будем иметь дело с квазигазообразным состоянием вещества

и, в силу этого, появится возможность воспользоваться законом Грэма, справедливым для определения скоростей диффузии молекул в газе.

Общее выражение закона Грэма имеет вид:

$$v = \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad (12)$$

где m — масса диффундирующей частицы;

K — коэффициент пропорциональности, определяемый свойствами растворителя и растворенных частиц: их физико-химическими свойствами, степенью ионизации (следовательно зарядом), размерами, ионным потенциалом и т.п.

Приведенное уравнение имеет силу, очевидно, и для случая инфильтрации ламинарного потока.

Введем в рассмотрение плеяду изотопов какого-либо элемента. Тогда, очевидно, справедливым будет заключение, что при неравенстве масс $m_1, m_2 \dots m_n$ (в порядке убывания) отдельных изотопов значения коэффициентов $K_1, K_2 \dots K_n$ должны быть одинаковыми. Это следует из самого определения изотопов, не отличающихся друг от друга основными физико-химическими свойствами.

Следовательно, для двух каких-либо изотопов m_1 и m_2

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \quad (13)$$

Поскольку перемещения изотопов происходят в одно и то же время, то пути S_1 и S_2 , пройденные изотопами m_1 и m_2 должны относиться как скорости, т.е.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}; \quad S_1 = S_2 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \quad (14)$$

На практике величины S_1 и S_2 конечно измерить нельзя, однако ΔS — обгон тяжелого изотопа легким — может быть легко обнаружен из результатов полевых исследований как расстояние между соответствующими точками изотопических ореолов. Отсюда:

$$S_1 = S_2 - \Delta S = S_2 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \quad (15)$$

$$S_2 \left(1 - \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}\right) = \Delta S$$

$$S_2 = \frac{\Delta S}{1 - \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}} \quad (16)$$

Формула для S_2 , куда входит получаемая из полевых наблюдений величина ΔS , и независимая величина $\sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$ позволяют оценить расстояние до приведенного центра начала движения, при условии однородности среды.

Теперь введем в рассмотрение группу изобаров какой-либо массы m . В этом случае справедливым будет заключение, что при равенстве масс в группе

(в силу самого определения изобаров) значения коэффициентов $K_I, K_2 \dots K_n$ должны быть разными. Это следует из того факта, что элементы группы изобаров, в силу самих свойств изобаров, обладают различными физико-химическими особенностями и, значит, различно ведут себя в растворах, что и учитывается коэффициентами K .

Следовательно, для двух изобаров K_I и K_2

$$\frac{V'_I}{V'_2} = \frac{K_I}{K_2} \quad (17)$$

Вводя пути S'_I и S'_2 , аналогично получаем:

$$\frac{S'_I}{S'_2} = \frac{V'_I}{V'_2} = \frac{K_I}{K_2}; \quad S'_I = S'_2 \frac{K_I}{K_2} \quad (18)$$

$$\Delta S' = S'_2 - S'_I = S'_2 \left(1 - \frac{K_I}{K_2}\right)$$

$$S'_2 = \frac{\Delta S'}{1 - \frac{K_I}{K_2}} \quad (19)$$

Полученное выражение для S'_2 позволяет вычислить интересующее нас удаление одного из изобаров от приведенного центра начала движения. Для этого из полевых наблюдений необходимо получить обгон $\Delta S'$ одного изобара другим, а из соответствующих лабораторных исследований — значения коэффициентов $K_I, K_2 \dots K_n$, характеризующие поведение родоначальных элементов в водных растворах. Формула (19) справедлива для однородной среды.

Произведя определения S_I и S_2 и S'_I и S'_2 и т.д. для последующих пар изотопов и изобаров разных элементов в вертикальной плоскости при условии, что эти элементы генетически обусловлены рудными телами, представляется возможным наметить место вероятного залегания руд в области схождения различных векторов: S_2 и S'_2 ; S_3 и S'_3 и т.д.

В качестве объектов исследования на первых порах рекомендуется выбрать изотопы легких элементов (бора, лития, углерода и т.п.), для которых $\sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$ имеет заметно отличающиеся от 1 значения, а также изобары Ni и Zn; Zn и As и др. элементов, относящихся к различным группам системы элементов Менделеева, для которых значения $K_I, K_2 \dots K_n$ ожидаются заметно отличными друг от друга.

Кратко резюмируя изложенное в настоящем разделе, можно отметить:

1. Доказательства, основанные на рассмотрении физико-химических особенностей элементов, находящихся в водных растворах, убедительно говорят о необходимости принять закономерно зональное строение первичных ореолов, как обязательное, по крайней мере для единого акта ореолообразования, завершеного во времени. При этом подчеркивается, что имеется в виду более общий, безминеральный вид существования элементов в ореоле, а отнюдь не частный, минеральный, с которым оперировали и Эммонс и Мекей.

2. Закономерности зонального строения даже одноактных ореолов еще не

установлены с должной точностью. Однако теоретические соображения, основанные на предположении о решающем значении в распределении отдельных элементов (или групп их) величины ионных потенциалов, абсолютных значений ионных радиусов, склонности к минералообразованию и изоморфным замещениям, с учётом данных полевых наблюдений, позволяют предположительно наметить следующую схему (табл. IО) расположения наиболее важных рудообразующих элементов в ореоле инфильтрационном или диффузионном.

Таблица IО

Зоны ореола по отношению к рудному телу		
Ближняя	Средняя	Дальняя
э л е м е н т ы		
W, Sn, Mo, As, Li, (Be), (Ge), (Fe), (S), (Te), (Se)	(Mo), As, Sb, Ni, Bi, (Ba), Co, Cu, Zn, Pb, Cd, (Au), (Ag), Rb, Tl, F, Cl, (Fe), (S), (Se)	B, C, Cs, Hg, Br, J, (Fe), (S), (Se)

Примечание: Отнесение отдельных элементов в ту или иную зону в известной мере условно и имеет целью лишь подчеркнуть особую приуроченность их к тем или иным участкам ореола.

3. Изучение распределения элементов (и их изотопов и изобаров) в ореолах первичного рассеяния, исходя из соображений о закономерном зональном строении ореолов, является наиболее верным путем для определения высоты эрозийного среза, по поверхности которого исследуется ореол относительно рудного тела. Предметом изучения должны являться отношения содержаний элементов, закономерно меняющихся по высоте. Последнее следует из самого существования вертикально-зонального распределения элементов в ореоле.

4. При изучении ореолов рекомендуется, в первую очередь, использовать элементы, не образующие собственных минералов или закономерных изоморфных подмесей и являющиеся хорошими диффундантами, например Hg, Cs, Br, J и др.; для изучения изотопов наиболее выгодны легкие элементы — В, С и др.

д/. Виды и формы нахождения элементов

Виды и формы нахождения элементов в первичных ореолах рассеяния зависят прежде всего от формы существования элементов в родоначальных растворах и механизма образования ореолов, а кроме того от обстоятельств, предшествовавших отложению элементов.

Согласно приведенным материалам родоначальниками ореолов следует считать разведенные водные растворы, истинные или коллоидные, а в качестве

действующих механизмов образования ореолов инфильтрацию и диффузию через поровую воду и непосредственно через кристаллические решетки.

Не требует дополнительных доказательств то, что интенсивность проявления, линейные размеры и пр. диффузионных ореолов находятся в прямой зависимости от подвижности частиц растворенного вещества в растворителе, которая, при прочих равных условиях, падает от истинных к коллоидным растворам. Далее, так как концентрация диффундирующих частиц, продвигающихся по поровым водам и сквозь кристаллические решетки по мере удаления от начальной точки, уменьшается, то нет никаких оснований ожидать, что во время перемещения диффунданта дадут минералообразования, если этого не произошло в самом начале пути. Следовательно, в чисто диффузионных ореолах ореолообразующие элементы должны находиться в том же состоянии ионов, атомов, молекул, в котором они диффундировали. Так и образуются жидкие или твердые, изоморфные или неизоморфные растворы в породах, на которые ореол накладывается. Следует заметить, что не исключена вероятность некоторых подвижек ореольных элементов и в последующие за рудообразованием периоды времени.

Поскольку между явлениями диффузии и инфильтрации много общего, можно рассчитывать, что высказанные выше соображения окажутся справедливыми и для инфильтрационных ореолов; следовательно, общий фон в этих последних образованиях также должны составлять ионы, атомы, молекулы, растворенные в жидком и твердом веществе пород, несущих ореолы. Однако для случая инфильтрационных ореолов необходимо ожидать и осложнений. Таким осложняющим фактором является фильтрационный эффект, действующий на все элементы односторонне. В результате действия этого эффекта вдоль каких-либо контактных плоскостей пород с возрастающим по направлению движения растворов коэффициентом фильтрации ψ или в отдельных точках однородной породы, в которых в силу местных условий резко меняется коэффициент ψ , концентрация растворенного вещества в отношении всех элементов может более или менее значительно повышаться. В результате этого, при достижении определенных граничных условий, из растворов смогут выпадать минералы того или иного состава. Следует ожидать, что этими новообразованиями должны являться минералы "сквозных" элементов, в частности, простые железные сульфиды (пирит, пирротин, часть железа при этом может быть выщелочена из окружающих пород), а также кварц. Поскольку выпадение этих минералов будет происходить из обогащенных растворов, постольку и сами эти минералы обогатятся элементами-примесями; формами нахождения элементов-примесей в подобных минералах будут являться растворы в интерстиционной жидкости и изоморфные и неизоморфные твердые растворы. Аналогичным образом будет происходить и образование собственных минералов простых сульфидов тяжелых металлов. Однако этот случай существования большинства элементов в типичных первичных ореолах рассеяния нужно признать не характерным. На самом деле, для осуществления этого необходимо по крайней мере два условия: способность элемента давать собственные минералы и такое стечение обстоятельств, которое повело бы к резкому возрастанию обычно ничтожной концентрации

данного элемента в гидротермальном растворе.

Рассмотрим с указанных позиций материал, который может/или должен/ явиться объектом непосредственного исследования при изучении первичных ореолов.

Представляется наиболее обоснованным использовать в указанных целях общую форму проявления элементов в ореолах в виде ионного, атомарного или молекулярного рассеянного состояния; в этом случае объектом исследования надо считать непосредственно породу в целом. Безусловно полезным должно явиться выделение тем или иным путем вторично-наложенной (ореольной) составляющей рассеяния. Этот путь исследования может наиболее уверенно привести к цели, однако требует тонкой методики разделения составляющих рассеяния и самого анализа. Изучение распределения элементов-примесей в эпигенетических вкрапленных минералах — пиритах, пирротинах, арсенопиритах, кварцах и т.п. — не требует особенной тонкости анализа. Однако при этом возникают трудности отбора мономинеральных фракций и результаты исследования безусловно во многом зависят от случайностей. Наконец, изучение ореолов рассеяния элементов по их собственным минералам надо считать второстепенным.

В заключение необходимо отметить следующее:

1. Наиболее общей формой состояния элементов в первичных ореолах рассеяния должны являться ионные, атомные, молекулярные жидкие и твердые растворы в горных породах-носителях рассеяния, а также в эпигенетических минералах-вкрапленниках. Иными словами, главным видом существования элементов в ореолах следует считать безминеральный.

2. Наиболее полные результаты при исследовании первичных ореолов должны получаться путем изучения рассеяния непосредственно в породах, особенно с разделением составляющих рассеяния.

Рассмотренная закономерность строения ореолов должна иметь место для отдельно взятых рудных тел. Условимся называть подобные образования "простыми ореолами первичного рассеяния". Внутренние закономерности их строения могут служить не только для целей обнаружения месторождений, но и для установления глубины эрозионного среза, вероятной глубины залегания слепых тел и т.п. Для месторождения, представленного рядом рудных тел, различно расположенных относительно друг друга как по простиранию, так и падению рудовмещающей зоны/особенно при одновременном образовании рудных залежей/, картина распределения элементов во вмещающих породах может быть более сложной. В этом случае могут потребоваться значительные усилия для ее расшифровки при обязательной постановке исследований не только в плоскости эрозионного среза, но и на глубину с использованием данных бурения. Предлагается для подобного рода геохимических образований ввести понятие "сложный ореол первичного рассеяния" в противоположность наименованию "простой ореол пер-

вичного рассеяния", памятуя при этом, что сложным ореол действительно представляет совокупность простых ореолов в той или иной их комбинации.

Наконец, давно уже было подмечено, что при активных контактах интрузий экзоконтакты их, за счет привноса во вмещающие породы, обогащаются, железом, серой, мышьяком, кремнием и т.п., с образованием полей вкрапленников (пирита, пирротина, арсенопирита, кварца и др.) и окремнения. К настоящему времени путем соответствующих геохимических исследований установлено, что в подобных случаях из интрузии во вне выносятся, помимо перечисленных, и многие другие элементы, как правило, не образующие собственных минералов, а существующие в различных формах безминерального вида. В результате, вокруг активных интрузий во вмещающих породах образуются специфические оторочки — полосы, окаймляющие интрузии и характеризующиеся повышенными содержаниями соответствующих элементов. Эти оторочки, ввиду крупности площадей, охватываемых ими, рационально называть ареалами первичного рассеяния интрузий. Там же элементов, привносимых из интрузии в ареал, прежде всего будет свидетельствовать об особенном богатстве интрузии этими элементами и, следовательно, для металлических элементов будет косвенно характеризовать потенциальную рудоносность интрузии. Законы образования ареалов и распределения в них элементов будут, очевидно, те же, что и для ореолов. Аналогичными будут виды и формы существования элементов. Таким образом, ареалы отличаются от ореолов только своими значительно большими размерами. При рассмотрении примеров практики в некоторых из них будут описаны ареалы.

В. Примеры практики

К настоящему времени накоплено значительное количество фактического материала по ореолам первичного рассеяния постмагматических рудных месторождений самого различного металлического состава как у нас в Союзе, так и за рубежом. Некоторые из этих примеров кратко описаны ниже в основном в хронологическом порядке.

При спектральноаналитических исследованиях на оловорудном месторождении Певекского полуострова, расположенном в гранодиоритовом массиве, Н.И. Сафроновым в 1949–50 гг. было показано, что на высоте 150–200 м над слепыми оловорудными жилами в безрудном жильном материале, заполняющем рудоконтролирующую зону (кварц, арсенопирит, турмалин), установлены повышенные содержания сурьмы (до 0,5%), при ничтожных содержаниях олова (до 0,1%). Сурьма представлена, помимо подмеси в кварцевом материале, собственными минералами (антимонитом и окислами сурьмы). По мере приближения к оловорудному телу содержания сурьмы падают и в пределах самого тела становятся фоновыми. На рис. 6 изображена схема строения сурьмяного ореола над оловорудным телом. Другие элементы не исследовались.

Аналогичным образом в аксинитах и топазах, извлеченных из скарнированных известняков в ореоле оловорудного месторождения, установлены повышенные

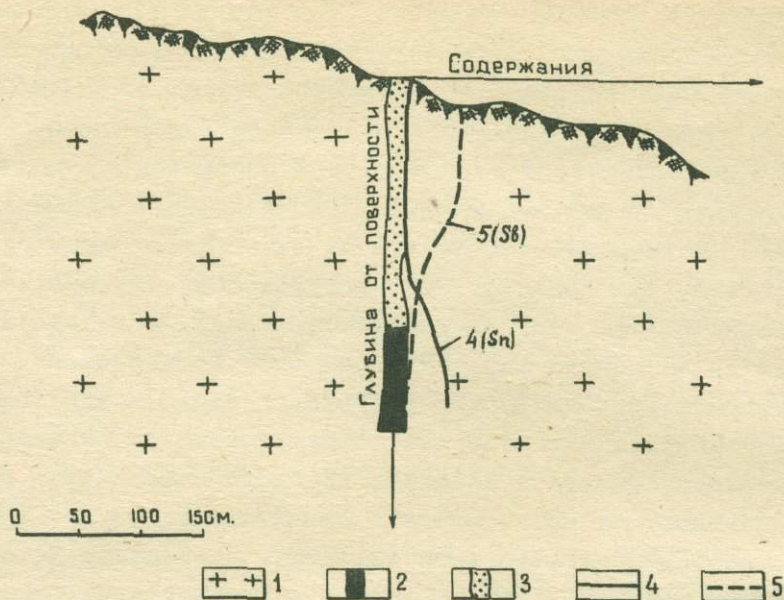


Рис.6. Схема строения ореола сурьмы над слепым оловорудным телом /разрез/:

1 - гранодиорит; 2 - оловорудное тело; 3 - рудовмещающая зона дробления; кривые содержаний: 4 - Sn; 5 - Sb.

содержания германия, по сравнению с содержаниями в тех же минералах вдали от рудных тел.

Крайне поучительными являются материалы, полученные при изучении первичных ореолов на Ачисайском (Турланском) свинцово-цинковом месторождении (А.П.Соловов и В.З.Фурсов, /30/, /31/). Указанное месторождение находится в хребте Каратау Южно-Казахстанская область Каз.ССР). Все рудные залежи месторождения, исключая основную, имеющую два разрозненных выхода, являются слепыми, с глубинами залегания верхней кромки руд от 10 до 430 м. Руды залегают в известняках, главным образом в доломитах искристого горизонта нижнекарбонového возраста и контролируются сложной системой тектонических зон и трещин. Работы проводились в период с 1953 по 1959 гг. и имели своей целью установить возможности применения геохимических методов, в варианте исследования первичных ореолов, для целей обнаружения слепых свинцово-цинковых залежей ачисайского типа.

На первом этапе исследовалось поведение в ореолах свинца. В качестве объектов исследования были выбраны 7 известных рудных тел, залегающих на глубинах от 25 до 430 м, считая до верхней кромки. Пробы отбирались из элювия-делювия и коренных пород; применялся спектральный анализ проб по общепринятой методике.

В результате было установлено, что исследовавшиеся тела отчетливо от-

мечались на поверхности по первичным ореолам рассеяния свинца и, в меньшей степени, цинка. Ореолы оказались приуроченными к выходам соответствующих рудоконтролирующих зон, и площади их составляли от 0,56 до 5,6 от площадей проекций на плоскость наблюдения соответствующих рудных тел. Содержания свинца в ореолах заключены в пределах от $2 \cdot 10^{-2}\%$ и до $15 \cdot 10^{-2}\%$, против $3,5 \cdot 10^{-3}\%$ в безрудном поле. Это соответствует кларку концентрации в ореоле от 6 до 43. Второстепенные рудообразующие элементы (V, Ge, Cd, Cu, Mo, As, Ni) в ореолах установлены не были. По предположению авторов вероятной причиной этого являлась недостаточная чувствительность анализов.

На втором этапе исследовалось поведение в ореолах ртути, выбранной благодаря её повышенной летучести. В качестве объектов исследований были взяты 6 слепых залежей, в том числе 4 из изучавшихся на первом этапе. Пробы брались из коренных пород для устранения мешающего влияния испарения ртути из рыхлого элювиально-делювиального слоя. Анализ проб — спектральный, по специальной методике, разработанной Е.А.Сергеевым и П.А.Степановым в ВИТР, с чувствительностью $(1-3) \cdot 10^{-6}\%$.

В результате было установлено, что все исследованные залежи сопровождаются ореолами первичного рассеяния ртути; площади ореолов превышают соответствующие площади проекций рудных тел на поверхность от 4 до 5,5 раз, а площади ореолов свинца — иногда до II раз, являясь в то же время более четкими. В одном из случаев был установлен протяженный и четкий ореол ртути при отсутствии ореола свинца.

Средние содержания ртути в ореолах заключены в пределах $(3-8) \cdot 10^{-6}\%$, а максимальные — $(30-50) \cdot 10^{-6}\%$; фоновые содержания, в виду их малости, примененной методикой установить не удалось.

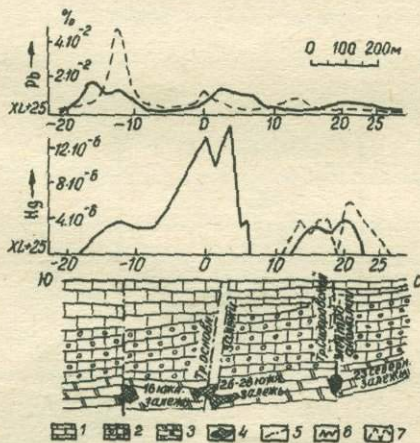


Рис.7. Содержания ртути и свинца над рудными залежами /в разрезе/:

- 1 — известняки бельмазарского горизонта $C_{I}t_{I} - d$; 2 — известняки рудничного и турланского горизонтов $C_{I}t_{I} - c$; 3 — доломиты искристого горизонта $C_{I}t_{I} - b$
- 4 — сульфидная руда; 5 — тектонические трещины; кривые содержаний Pb и Hg:
- 6 — в коренных породах; 7 — в элювио-делювии.

На рис.7 приведены результаты работ над рядом залежей. Использование геохимической съёмки по первичным ореолам привело к практическим открытиям.

Исследованием первичных ореолов рассеяния некоторых полиметаллических и медных месторождений Центрального Казахстана и Рудного Алтая в 1953-1958гг занимались К.М.Муқанов и Г.И.Росман /32/. Изучалось 8 рудных месторождений и, в том числе, 5 колчеданно-полиметаллических (Иртышское, Березовское, Николаевское, Рулихинское и Шемонаихинское на Рудном Алтае), одно свинцово-галенитовое (Алайгырское), одно медное (Успенское, халькопирит-борнитовое) и одно полиметаллическое (Кузук-Адырское) месторождения Центрального Казахстана. Большинство месторождений представлено крутопадающими линзообразными и жильными телами, остальные-сложными пологопадающими залежами; некоторые рудные тела являются слепыми.

Опробовался керн глубоких разведочных скважин и образцы из выработок, а также из обнажений. Интервалы опробования по скважинам и выработкам - от 2-3 м и до 10-30 см. Анализ - полуколичественный спектральный на 12-15 и до 30-35 элементов из числа рудообразующих; контроль производился дитизионом и полярографическим методами. Наиболее достоверные результаты получены по Pb, Zn, Cu; по As, Sb, Hg, Se, Te недостаточная чувствительность методов не дала возможности сделать уверенные выводы. Фоновые содержания в неизмененных породах определялись методом вариационной статистики по специально отобраным из них пробам. Наиболее характерными фоновыми содержаниями оказались: $(1-3) \cdot 10^{-3}\%$ для Pb и $(3-5) \cdot 10^{-3}\%$ для Zn и Cu с возрастанием до $6 \cdot 10^{-3}\%$ для Pb и Cu в районах их месторождений.

В ореолах с концентрациями выше фоновых были встречены Pb, Zn, Cu, Ba, Sr, Ag, As, Sb, Mo, Bi и реже Hg, Cd, Tl. Наиболее обычные содержания для некоторых элементов приведены в табл. II.

Таблица II

Элемент	Содержание в пределах, в %	Элемент	Содержания в пределах, в %	Элемент	Содержания в пределах в %
Pb	0,003-0,500	Ag	0,0001-0,0100	Ba	0,01-1,00
Zn	0,005-1,000	As	< 0,01-0,10	Sr	0,005-0,100
Cu	0,005-1,000	Sb	< 0,01-0,10	Mo	0,0001-0,0100

Наиболее сложные по составу первичные ореолы установлены на полиметаллических, а наиболее простые на монометалльных месторождениях; характерно наличие комплексов элементов-индикаторов. В частности, в ореолах первичного рассеяния были установлены:

- а) на полиметаллических месторождениях: Pb, Zn, Cu, Ag, Au, Ba, Sb, As, Hg, Mo, Bi, Se, Te, In, Cd, Ge;
- б) на свинцовом месторождении: Pb, Zn, Cu, Ag, Ba, Sr, Sb, As, Hg, Mo;
- в) на медном месторождении: Pb, Zn, Cu, Ag, Au, Mo, As, Sb, Hg.

Элементы Te , Se , Sb , As не всегда обнаруживались из-за недостаточной чувствительности анализа ($0,01-0,03\%$), которая не достигала даже кларковых значений этих элементов.

Существование элементов в ореолах установлено как в виде собственных минералов, так и в виде примесей к минералам чуждого состава (пиритам, селенитам, хлоритам и др.).

Морфология изученных ореолов первичного рассеяния оказалась самой разнообразной, однако, в первом приближении, все же наблюдается подобие с формами соответствующих рудных тел, осложненное рудовмещающими структурами.

Протяженность ореолов вдоль по согласным с залежами зонам смятия достигает 2 км; ширина их определяется мощностью зоны дробления и расщепления и достигает 100-200 м; иногда ореолы развиваются по оперяющим дорудными ослабленным зонам и могут тогда достигать протяженности 200-400 м. Судя по наблюдениям над ореолами пологопадающих рудных тел, протяженность ореолов может достигать по вертикали 200-500 м для Zn и 60-400 м для Pb , Cu , $Ва$. Элементы Mo , Ag , Bi , As , Sb не занимают постоянного положения в ореоле, хотя замечено, что Ag , Bi , Sb обычно встречаются только в центральных частях ореолов, в то время как Mo встречается не только в центральных участках, но и на флангах, а As проявляет тенденцию распространяться вверх по восставанию. Особенно повышенные концентрации элементов в ореолах устанавливаются на контактах пород с разными свойствами и в зонах дизъюнктивных нарушений, благодаря чему ореолы часто обладают прерывистым строением.

Авторы /32/ предполагают для ореолов существенно инфильтрационное происхождение при подчиненной роли диффузии; проницаемости пород отводится решающее значение при оценке протяженности ореолов.

Решением задачи использования ореолов первичного рассеяния для целей поисков "слепых" полиметаллических и колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая в течение 1958-61 гг. занималась Рудно-Алтайская экспедиция ВИТР (Д.А.Вигдорович, Р.Р.Зиверт, Ю.С.Рысс, А.А.Утгоф и др.) совместно с Восточно-Казахстанским управлением МГИОН Каз.ССР. Эта задача не являлась самоцелью, а входила в круг вопросов, решавшихся при разработке комплексной методики поисков "слепых" и глубоко погребенных месторождений на Рудном Алтае, успешно разрешенной к 1962 г. Ниже приводятся основные результаты работ только в интересующей нас области, изложенные в статье Д.А.Вигдоровича и Р.Р.Зиверта /33/.

Элементами-индикаторами в ореолах первичного рассеяния полиметаллических и колчеданно-полиметаллических месторождений на Рудном Алтае явились нижеперечисленные элементы, определявшиеся спектральным путем по специальным высокочувствительным методикам (для халькофильных элементов, ртути и золота), разработанным в ВИТР.

В табл.12 приведены сводные результаты исследований.

Элементы-индикаторы установлены в ореолах как в виде собственных мине-

Таблица 12

Содержания элементов	Главные элементы-индикаторы в первичных ореолах Рудного Алтая										
	Pb	Zn	Cu	Cd	As	Sb	Bi	Mo	Ag	Au	Hg
	с о д е р ж а н и е , %										
Фоновые /в главных рудовмещающих породах /	$\sim 2 \cdot 10^{-3}$	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 4 \cdot 10^{-3}$	$< 1 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$	$\leq 1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	—
Максимальные /в ореолах/	>0,3	>0,3	>0,3	0,003	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,005	0,003

Примечание: Фоновые содержания исчислены вариационно-статистическим путем.

ралов (галенит, сфалерит, халькопирит), так и в формах примесей, особенно в гидротермально-измененных породах и в отдельных минералах — в пиритах и тяжелых фракциях пород (особенно халькофильные элементы), в карбонатах (особенно ртуть), в хлоритах (особенно цинк и медь) и в серицитах (особенно стронций).

В ореолах первичного рассеяния, связанных с отдельными рудными телами (в простых ореолах), установлена тенденция к зональному распределению элементов-индикаторов, причём Pb, Ba, Sb, Ag, Bi, Cd и Se тяготеют к внутренним зонам ореолов, тогда как Cu, Mo, As, Zn и Hg присутствуют не только во внутренней зоне, но и отходят за её пределы, на фланги ореолов. В то же время в ореолах месторождений, которые состоят из ряда рудных тел, различные ореольные зоны налагаются друг на друга, в результате чего зональное распределение элементов теряет свою четкость.

Ореолы первичного рассеяния в морфологическом отношении занимают площади, во много раз превышающие площади проекций рудных тел, и в большинстве случаев находятся с рудами в сложных взаимоотношениях. Так для месторождений, приуроченных к линейно-вытянутым зонам смятия, характерны линейно-вытянутые ореолы с соотношением длины к ширине (мощности) до 10:1. В пологопадающих, параллельно-пластовых рудоносных структурах, получивших широкое развитие на Рудном Алтае, сплошь и рядом развиваются ореолы первичного рассеяния, не имеющие непосредственной связи с рудными скоплениями. По-видимому, эти ореолы питались самостоятельным рудоподводящим каналам; они располагаются параллельно рудным телам и друг другу, в перемежку с экранирующими горизонтами. В комбинированных рудоносных структурах развиваются изометрические ореолы с апофизами, отходящими вдоль по дизъюнктивам.

Происхождение ореолов, наблюдавшихся на Рудном Алтае, можно считать как диффузионным, так и инфильтрационным. Первые развиваются в бока от рудных залежей и имеют протяженность 2-6 м в каждую сторону. Вторые развиваются по зонам трещиноватости, дробления или простого ослабления, в пределах пористых пород, образуя пластообразные, струйчатые или факелоподобные формы, и имеют линейные размеры в десятки — первые сотни метров. Инфильтрационные ореолы часто характеризуются крайне неравномерными содержаниями элементов в пределах ореола. Интересно отметить, что ореолы первичного рассеяния в зоне выветривания коренных пород в условиях закрытых участков Рудного Алтая существенно не отличаются от ореолов, развитых в неизмененных коренных породах, за исключением ореолов цинка, становящихся более интенсивно выраженными. Изучение ореолов первичного рассеяния в общем комплексе рудно-поисковых работ на Рудном Алтае оказалось весьма плодотворным.

Вопросу использования первичных ореолов ртути для поисков свинцово-цинковых месторождений посвящена работа Н.А. Озеровой /34/.

Исследования производились с 1955 г. на 17 свинцово-цинковых рудопроявлениях и месторождениях Ферганского Каратау и Лекана, расположенных в карбонатной и песчано-конгломератовой толщах и приуроченных к тектоническим трещинам. Размеры рудных тел невелики, некоторые из них выходят на поверхность —

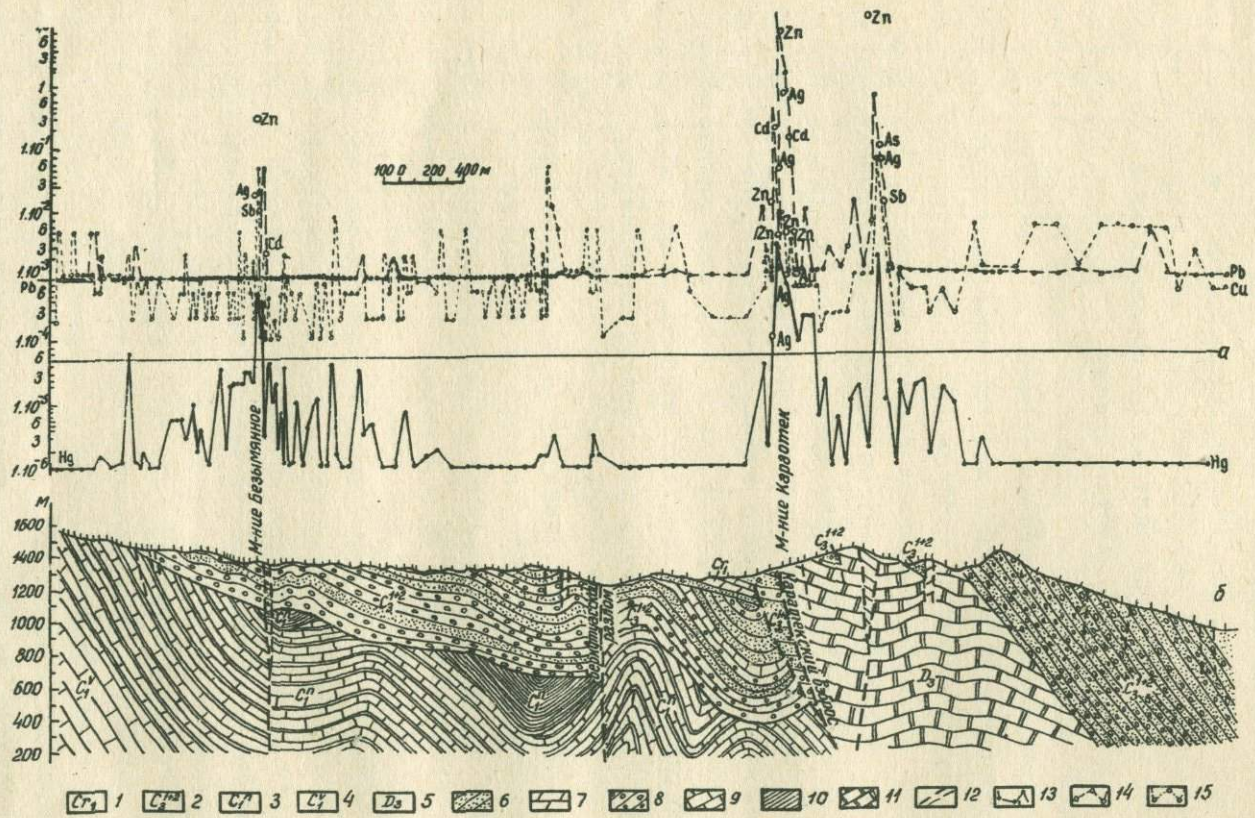


Рис.8. График распределения Hg, Pb, Cu и других элементов по профилю через месторождения Безымянное и Каротек (Ферганский Каратау)/составила Н.А.Озерова/:

а-линия чувствительности спектрального анализа в маленьких электродах; б-геологический разрез /составлен по данным А.А. Сескутова/;

I-нижнемеловые отложения; 2-верхнекаменноугольные отложения; 3-нижнекаменноугольные отложения, намюрский ярус; 4-нижнекаменноугольные отложения, визейский ярус; 5-верхнедевонские отложения; 6-песчаники; 7-мергели; 8-конгломераты; 9-толстослойные известняки; 10-глинистые сланцы; 11-доломиты с прослоями известняков; 12- тектонические нарушения; кривые содержания: 13- Hg ; 14- Pb; 15- Cu.

ность, другие являются слепыми. Главными рудными минералами являются галенит и сфалерит, подчиненными—реальгар, блеклые руды, бурнонит, пирит; среди жильных наблюдаются барит, карбонаты, кварц.

На рис.8 приведены результаты исследований первичных ореолов по одному из профилей, проходящему вкост структур через два месторождения—Безьянное и Караотек; протяженность профиля 7,4 км; пробы отбирались из коренных пород на интервалах от 10 до 100 м тем чаще, чем ближе к месторождению. Вес проб—около 50 г. Пробы анализировались полуколичественно спектрально на Hg, Pb, Zn, Cu, Ag, As, Sb и др. При этом анализы на Hg производились по специальной методике, разработанной в ВИТР в двух модификациях: с чувствительностью $(3-5) \cdot 10^{-5}\%$ и $(1-2) \cdot 10^{-6}\%$. Фоновые содержания Pb определены в $(1-2) \cdot 10^{-3}\%$; для ртути установлены значения $2 \cdot 10^{-6}\%$ и в отдельных случаях $(3-5) \cdot 10^{-6}\%$.

Выводы, сделанные автором из приведенных исследований, следующие:

а). Свинец над месторождениями образует неширокие ореолы. В частности, над месторождением Безьянное, залегающим в песчано-сланцевой толще, ширина ореола равняется ширине рудной зоны, имеющей размеры 50-70 м. Над месторождением Караотек, залегающим в карбонатной толще, ширина ореола свинца достигает 800 м при ширине рудной зоны 100 м.

Содержания свинца в ореолах заключены в пределах от тысячных до нескольких сотых процента и лишь в редких случаях достигают десятых долей процента.

б). Zn, Ag, Cd, Sb и As — установлены по профилю спорадически, в отдельных пробах; Cu распределена сложно; её содержания над месторождениями иногда повышаются до сотых долей процента, причем эти же значения отмечаются и на безрудных площадях.

в). Ртуть образует наиболее четкие и распространенные ореолы первичного рассеяния. Так, над Безьянным месторождением ширина ореола Hg достигает 1800 м, что в 30 раз шире рудной зоны и ореола свинца; над Караотеком ширина ореола Hg равняется 1200 м, что в 12 раз шире рудной зоны и в 1,5 раза шире ореола свинца. Содержания в ореолах колеблются от $5 \cdot 10^{-6}\%$ до $5 \cdot 10^{-5}\%$ и повышаются непосредственно над месторождениями до п. $(10^{-4}-10^{-3})\%$.

г). Устанавливается прямая корреляция содержаний в ореолах Hg с одной стороны и Pb и Zn — с другой. Вместе с тем содержания Hg в тяжелой фракции проб (в пиритах) до одного математического порядка ниже, чем в породообразующих минералах. Отсюда делается заключение о "пропитывании" ртутью всей массы пород.

д). Подчеркивается практическая полезность изучения ореолов первичного рассеяния ртути для поисков свинцово-цинковых месторождений и необходимость при этом анализа проб в варианте наивысшей чувствительности— $(1-2) \cdot 10^{-6}\%$. Добавим, что вертикальная протяженность отчетливых первичных ореолов ртути над средне-азиатским ртутными и мышьяково-сурьмяными месторождениями установлена О.В.Вершковской /35/ в 300-350 и более метров, считая от верхней кромки рудных тел.

В известной мере сводные материалы по проявлению ореолов первичного рассеяния ртути в природе над различными по составу рудными месторождениями Казахстана приведены в статье В.З.Фурсова /36/. Как указывается в статье, пробы брались главным образом из коренных пород; анализ — спектральный, высокочувствительный — $(1-3) \cdot 10^{-6}\%$. Ореолы ртути установлены над многочисленными полиметаллическими, медно-колчеданными и золоторудными месторождениями, в том числе над слепыми, скрытыми на глубинах до 400 м от поверхности. В одном случае слепое рудное тело было скрыто под монолитной толщей песчаников и сланцев мощностью 60-70 м; эта толща оказалась непроницаемой для Pb и Zn, но не послужила преградой для Hg, ореол которой и был обнаружен. При фоновых содержаниях ниже $1 \cdot 10^{-6}\%$ средние содержания Hg в ореолах оказались заключенными в пределах $(5-20) \cdot 10^{-6}\%$, а максимальные значения достигали $(30-650) \cdot 10^{-6}\%$. Одновременно в отдельных случаях в ореолах установлены содержания In, Bi и Tl, но с ничтожными кларками концентраций (до 2-х).

Автор отмечает закономерное увеличение площади ореолов рассеяния ртути по мере удаления от рудных залежей вверх. При сравнении с ореолами рассеяния других элементов устанавливается, как правило, большая площадь ореолов ртути, однако в отдельных случаях наблюдается и обратная картина, которую В.З.Фурсов объясняет влиянием тектоники.

Одним из примеров удачного практического использования ореолов первичного рассеяния с исследованием состава элементов-примесей в эпигенетических сульфидных минералах-вкраплениях является статья В.П.Федорчука и Н.А.Никифорова /37/.

Работы производились на одном из среднеазиатских сурьмяно-ртутных месторождений. Рудоносными породами здесь являются окварцованные брекчии, морфологически это пологие седловидные залежи, подстилаемые массивными известняками и перекрываемые преимущественно сланцами, которые играли роль водоупоров. Рудоподводящими каналами явились крутоспадающие сбросы. Основные рудные минералы — антимонит, киноварь, реже аурипигмент и реальгар, в примесях — блеклые руды и сфалерит. Жильные минералы представлены кварцем, кальцитом, флюоритом, серицитом, реже баритом.

Непосредственным объектом исследования явился надрудный пирит, образующий скопления преимущественно в углисто-глинистом веществе пород, перекрывающих месторождение. Морфологически этот пирит приурочен к тончайшим секущим трещинам и генетически связан с остаточными порциями гидротерм, проникавших в систему этих трещин в результате инфильтрации снизу вверх. Одна из трудностей заключалась в присутствии в надрудных толщах "желвачных" (первично-осадочных) и "согласных" (приуроченных к плоскостям напластования и, очевидно, смешанных по происхождению) пиритов, от которых при опробовании приходилось избавляться; пробы отбирались на анализ по признаку приуроченности пирита к секущим трещинам.

Спектроанализ надрудного гидротермального пирита показал его значитель-

ное обогащение элементами-примесями, особенно такими, характерными для подстилающей промышленной руды, как Sb, As, Zn, Hg; по своему общему составу гамма примесей в рассматриваемом пирите оказалась отличной от примесей в "желвачном" и "согласном" пиритах. Содержания перечисленных элементов-примесей в гидротермальном пирите в непосредственной близости к рудным телам достигали: Sb - 0,6%; As - 2,5%; Zn - 0,6% и Hg - $4 \cdot 10^{-3}\%$; по периферии ореола они оказывались неразличимыми на нормальном геохимическом фоне.

Протяженность ореолов рассеяния отдельных металлов над осевыми участками антиклиналов (снизу вверх) была определена для Sb в десятки метров, для Zn и As в одну-две сотни метров и для Hg - во многие сотни метров; по крутопадающим дорудным сбросам развитие ореолов происходило на значительно большие расстояния.

Изучение рассеяния в надрудном пирите, в совокупности с геологическими и геофизическими методами, повело к открытию ряда новых "слепых" рудных залежей.

Выше, в разделе ореолов первичного рассеяния протемагматических месторождений, рассмотрен пример ореола сингенетичных медно-никелевых руд. Здесь, для полноты картины, рассмотрим ореолы эпигенетичных медно-никелевых месторождений, используя данные, приведенные Д.В.Полферовым /3/.

Исследование ореолов при помощи достаточно чувствительного спектрального анализа систематически производилось на Ni, Co, Cu, Zn, Bi, Cr, Ti, V, Mo, Ag, Pb и выборочно на Se и Te. В результате было установлено, что ореолы первичного рассеяния эпигенетических медно-никелевых сульфидных тел развиваются по-разному, в зависимости от особенностей генезиса самих рудных образований и условий их залегания.

Наиболее отчетливые ореолы наблюдаются для низкотемпературных руд печенгского типа, залегающих за пределами материнской интрузии в эффузивно-осадочной толще. В этих случаях ореолы развиваются вкварт простирания (по мощности) до 10-15 м в каждую сторону от рудного тела и на сотни метров вдоль по ослабленным зонам за фланги рудных жил.

Для высокотемпературных жил мончепорского типа, залегающих в материнских породах, ореолы выражены слабее и протягиваются по мощности на десятки сантиметров и до 1,5 м, а по простиранию рудоконтролирующих структур - максимум на 100-150 м.

Во всех случаях наблюдается известная зональность, выражающаяся в том, что Co уходит от рудного тела на минимальное расстояние, Cu - на максимальное, а Ni занимает среднее положение. Роль и положение в ореолах Zn, Pb, Bi, Se, Te в деталях не выяснялась, однако подчеркивается, что и эти элементы могут рассматриваться как полезные индикаторы.

Аналогичным образом выше были рассмотрены общие принципы строения ореолов первичного рассеяния сингенетичных месторождений осадочного происхождения. Здесь приведен пример изучения ореола железорудного эпигенетического месторождения маритовых и гидрогематитовых руд в Криворожском бассейне,

в сжатой форме описанный Я.Н.Белевцевым /38/.

Как утверждает автор, собственно железорудные залежи, будучи приурочены к различным горизонтам роговиков и джеспилитов, в то же время являются более поздними эпигенетическими образованиями, обязанными своим возникновением деятельности глубинных термальных растворов метаморфического происхождения на первом этапе рудообразования и интенсивному выветриванию, проникавшему на значительные глубины (до 1400 м) на втором этапе.

По форме железорудные тела представлены крупными шарнирными залежами и столбами.

Установленные ореолы первичного рассеяния вокруг подобных рудных тел во вмещающих породах представляют зональные образования с тремя условно выделяемыми зонами:

а) внутренней (шириной 3-10 м), характеризующейся недостатком Ca, Mg, Na, K, Mn, P, S, Co, полной мартитизацией магнетита и разрушением железистых силикатов;

б) средней (шириной 10-15 м), характеризующейся недостатком Na, K, Mg, Ca, иногда избытком Ni, Cr, Mo, частичной мартитизацией магнетита и разложением железистых силикатов;

в) внешней (шириной 20-25 и до 50-60 м), характеризующейся недостатком Na, Ca, Mg и едва проявленным разложением железистых карбонатов и силикатов.

Таким образом, общая ширина ореолов эпигенетических железорудных месторождений в Криворожском районе может достигать 35-50 и до 65-85 м (в одну сторону от рудного тела), что значительно увеличивает размеры поискового объекта; это же обстоятельство делает возможным обнаружение железорудных залежей, непосредственно не выходящих на эрозионный срез коренных пород.

Обстоятельные результаты исследований ореолов первичного рассеяния урановых тел изложены в статье А.Д.Каблукова и Г.И.Вертепова /39/. Исследованные месторождения представлены жилообразными крутопадающими рудными телами гидротермального происхождения, контролируемые тектоническими трещинами. Мощность рудных тел — от нескольких сантиметров до 2 м; протяженность по простиранию и падению — до сотен метров. Минеральный состав — сложный: урановая смолка, пирит, галенит, сфалерит, реже молибденит, арсенопирит, марказит, блеклые руды в сопровождении кальцита, анкерита, барита, серицита, хлорита. Вмещающими породами являются эффузивные и интрузивные кварцевые порфиры и их туфы. Зона окисления весьма слабая. За значение нормального геохимического фона была принята мода вариационной кривой содержаний в безрудном поле.

Пробы весом 100-150 г отбирались в интервалах 3-5 м, пятью-шестью кусочками из естественных обнажений стенок выработок и керн скважин. Анализ на все элементы, кроме U, производился спектральный. Уран определялся "подвижный", т.е. выщелачиваемый из пробы слабым /2%/ раствором соды.

В результате выполненных исследований было установлено, что описанные

урановые тела сопровождаются отчетливыми ореолами первичного рассеяния. В ореолах установлено присутствие U, Pb, Mo, Zn, Cu, Ag, Ba, As, Sb ; первые три элемента оказались главными ореольными элементами .

Установленные ореолы имеют сложные очертания, следуя в основном ослабленным зонам, затухая или прерываясь на участках их пережимов. В соответствии с этим, ореолам приписывается инфильтрационное происхождение. Максимальная ширина ореолов подвижного U, Pb и Mo в пределах контура, ограниченного изолинией 5 геохимических фонов, на уровне верхнего выклинивания собственно урановых тел, достигала 70-80 м при мощности рудных образований 2-3 м.

Вверх по вертикали рассматриваемые ореолы протягивались на 100-120 и до 270 м, считая от верхнего выклинивания рудных залежей; на этих интервалах ширина ореолов рассеяния отдельных элементов менялась по-разному. Наиболее устойчивым является ореол Pb ; его ширина, (в пределах площади, ограничиваемой изолинией 5 геохимических фонов), измеренная на 270 м выше верхней кромки рудного тела, еще равняется 25 м, тогда как ореолы V и Mo здесь значительно уже. По падению от нижней кромки руды ореолы прослеживаются на 60м, причем Pb исчезает ранее V и Mo.

В табл. 13 приведены основные характеристики исследованных ореолов.

Таблица 13

Элементы	Нормальный геохимический фон, ‰	Содержания в ореолах (максимальные), ‰	Кларки концентраций
Растворимый U	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	55
Pb	$3 \cdot 10^{-2}$	до 1,0	до 33
Mo	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-1}$	330

На рис.9 показана схема распределения содержаний главных металлов в ореоле первичного рассеяния одного из урановых месторождений, на которой хорошо видна зональность строения ореолов первичного рассеяния. Эта зональность может быть уверенно использована для целей оценки высоты эрозионного среза месторождений (относительно верхней кромки рудного тела), исходя при этом из отношений содержаний элементов в ореоле . Эти отношения приведены на схеме в форме таблицы со строчками, привязанными по высоте.

Выводы из рассмотренной работы и методика использования данных безусловно имеют значение, выходящее за рамки поисков только урановых месторождений. Краткие выводы, сделанные авторами, следующие:

а) Вокруг урановых рудных тел гидротермального происхождения в корейных породах развиваются отчетливые ореолы первичного рассеяния; главными

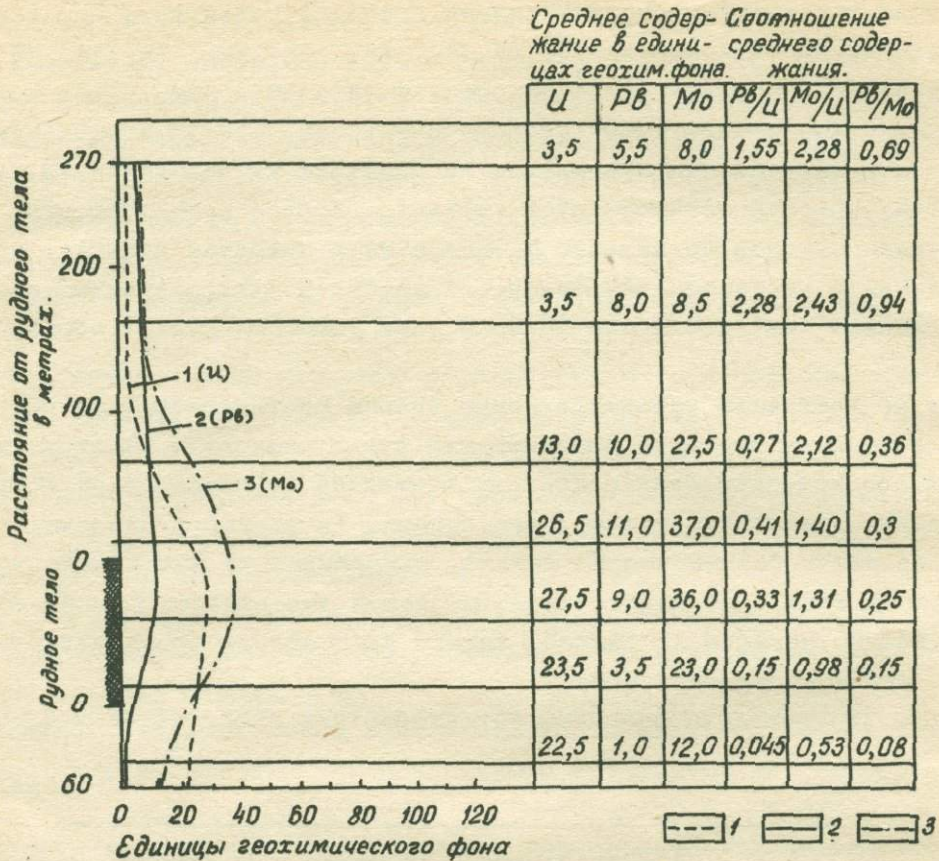


Рис. 9. Изменение среднего содержания элементов в ореолах рассеяния в вертикальном разрезе: 1—U, 2—Pb, 3—Mo.

элементами в ореоле являются растворимый уран, свинец и молибден; ореолы увеличивают поисковые размеры рудных тел в десятки раз.

б). Ореолы развиваются главным образом в ослабленных зонах по восставанию и на флангах рудных тел.

в). В строении ореолов устанавливается вертикальная зональность, выражающаяся в закономерном изменении величин отношений средних содержаний элементов по высоте относительно рудного тела. Это обстоятельство может быть успешно использовано при прогнозировании на глубину.

Пример ореола первичного рассеяния низкотемпературного гидротермального кварцево-золоторудного месторождения, находящегося в Восточном Забайкалье, приведен в статье Н.И. Сафронова, В.В. Поликарпочкина, Ю.Н. Трушкова /40/. Наиболее ярко в ореоле представлены Au, Ag, Cu, As, Sb. При этом первые три элемента образуют относительно узкие ореолы, непосредственно следующие за рудными телами и более интенсивные по падению. Наоборот, As и Sb образуют широкие ореолы, наиболее четкие участки которых находятся на некоторых удалениях от рудного тела по обеим его сторонам; содержания As и Sb в оре-

олах падают с глубиной. Таким образом создается впечатление, что мышьяк и сурьма как бы отогнаны в верхние горизонты и в стороны от рудного тела. Очевидно, что отношения содержаний As и Sb к Au , Ag и Cu могут служить критериями для прогноза золотого оруденения на глубину. ореол первичного рассеяния упомянутого золоторудного месторождения изображен на рис. 10.

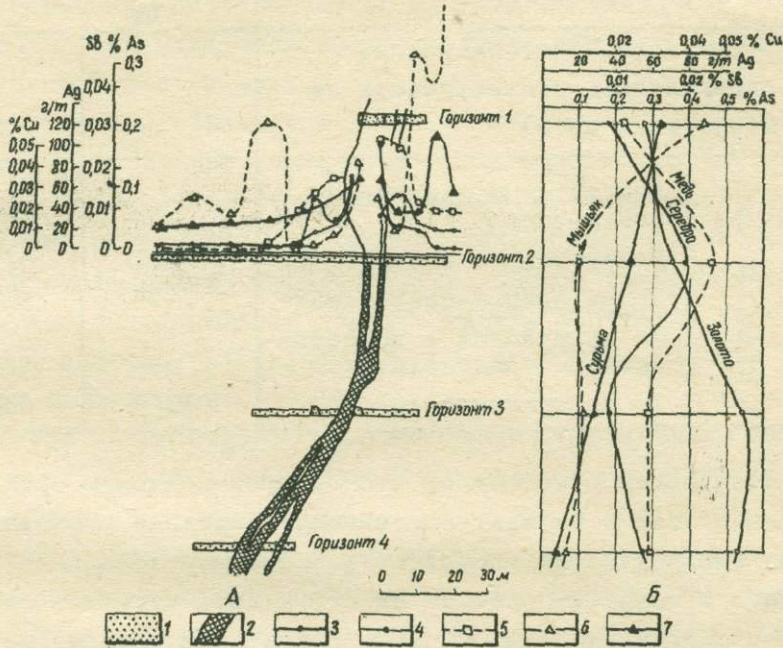


Рис.10. Первичный ореол рассеяния золоторудной жилы (по В.В.Поликарпочкину и Л.И.Петричкову): А - изменение содержания элементов вкрест простираия рудной жилы; Б - изменение содержания элементов на глубину в ореоле.

1 - песчаники; 2 - кварцево-золоторудная жила; графики содержания элементов: 3 - Au; 4 - Ag; 5 - Cu; 6 - As; 7 - Sb.

Заметим, что аналогичные результаты получены Е.М.Квятковским при изучении ореолов первичного рассеяния золоторудных месторождений в Забайкалье. Здесь также устанавливается как бы отгон в стороны от рудного тела ряда элементов - As , Hg , W , - в то время, как Au , Ag , Cu тяготеют к нему.

Изучение ореолов первичного рассеяния редкометалльных пегматитовых месторождений натрий-литиевого типа производилось М.М.Ермолаевым и С.И.Сусловой /41/.

Этими исследователями, путем многочисленных спектральных анализов по специальной высокочувствительной методике, разработанной в ВИТР, было установлено, что в породах, вмещающих пегматитовые тела, наблюдается возрастание содержаний редких щелочных элементов Li , Rb и Cs , а также Sn . Исследования подвергались пробы коренных пород, отбиравшиеся из естественных и искусственных обнажений и из кернов скважин. Интервалы опробования менялись от 20 см (вблизи жил) и до 1 м (на удалении). Сравнительное изучение показало, что из возможных вмещающих пород (амфиболиты, граниты, гнейсы и др.) наиболее четкие ореолы первичного рассеяния пегматитов наблюдаются в амфиболитах.

Для этих вмещающих пород авторы приводят следующую показательную таблицу (см. табл. I4).

Таблица I4

Амфиболиты		Кларки концентраций в ореолах		
		Li	Rb	Cs
Безрудного поля (содержания определялись статистически из маршрутных проб)		I	I	I
Рудного поля	Без видимых минералов-индикаторов	II9	I55	84
	Присутствует биотит	I97	I3I2	300
	То же эпидот-клинозоизит	I95	384	205
	То же минерал - новообразование гольмквистит I	396	420	I63
	То же гольмквистит II	II86	544	29I

Далее авторами отмечается, что по происхождению ореолы являются как диффузионными, так и инфильтрационными; последние развиваются по ослабленным зонам. Распределение элементов в ореолах - зональное. В непосредственной близости к жиле (в пределах одного - двух десятков сантиметров) устанавливается обогащение Be и Sn. Значительно далее (до 25 м) диффундирует от жилы Li, еще далее - Rb и, наконец, наиболее широко (на десятки метров) - Cs. В одном из подробно изученных случаев, в ореоле Li, линия изосодержаний, равных 35 местным кларкам, проходит висячем боку пегматитовой жилы на расстоянии 20-25 м от жилы, в лежащем боку - на 10-15 м и по простиранию - на 35 м от выклинивания. Ореол Rb значительно шире ореола Li и в эрозионном срезе имеет ширину в 20 раз большую, чем ширина выхода жилы. Ореол Cs несколько шире ореола Rb. Как правило, кривая содержаний элементов вдоль по профилю вкрест жилы имеет невыдержанный характер, пики (инфильтрационное проникновение) чередуются с падениями содержаний (диффузионный эффект); однако общая тенденция к снижению содержаний по мере удаления от жилы четко выражена. В случаях ярко выраженной инфильтрации протяженность ореолов рассеяния щелочных металлов Li, Rb и Cs достигала 80-100 м.

По мнению авторов, главной формой существования Li, Rb, Cs в ореолах являются изоморфные примеси, причём Li заменяет Mg в амфиболах вплоть до степени образования собственного минерала гольмквистита, а Rb и Cs заменяют K в контактовом биотите, а также входят в решетки эпидота, клинозоизита, гольмквистита. Наряду с этим допускается, что известная часть упомянутых элементов остается в застойных и слабо мигрирующих внутривидовых поровых растворах.

Использование вскрытых взаимоотношений между пегматитовыми жилами и их

ореолами первичного рассеяния по элементам Li, Rb, Cs на практике позволило обнаружить с помощью бурения ряд слепых пегматитовых тел на глубине до 100 м.

Очень важной, оригинальной в своей основе, и безусловно интересной является статья А.Е. Энджеда Р.Н.Клейтона и С.Эпштейна /42/, которая освещает результаты работы, проведенной авторами в районе свинцового месторождения Лэдвилл для выявления поведения изотопов кислорода при метаморфизме, сопровождающем процессы рудоотложения.

Месторождение Лэдвилл (Скалистые горы, Колорадо) представлено рядом рудных тел, приуроченных к трем горизонтам карбоновых и силурийских известняков и контролирующихся пластом кварцита и дайками порфиринов. Залежи весьма неправильной формы по вертикали и горизонтали, иногда трубообразные или гнездообразные; мощность рудных тел 0,3–0,6 м, другие размеры 15–75 м. Первичные руды представлены сульфидами железа, цинка, в меньшей мере свинца; местами встречается много халькопирита. В зоне окисления развиты карбонатные руды/церуссит, смитсонит./

Метасоматическое происхождение руд признается бесспорным; некоторые данные позволяют считать, что отложение происходило из горячих растворов или даже газов и паров.

Исследование изотопического состава кислорода производилось в неизмененных и гидротермально-измененных (осветленных и перекристаллизованных) известняках, доломитах и кремнях рудного поля Гилман. Измерения отношения изотопов O^{18}/O^{16} осуществлялись на масспектрографе. Мерой являлась величина:

$$\delta O^{18} = \left(\frac{R}{R_{ст}} - 1 \right) \cdot 1000 \text{ ‰}, \quad (20)$$

где R — отношение O^{18}/O^{16} в исследуемой пробе;
 $R_{ст}$ — отношение O^{18}/O^{16} в стандартной пробе, в данном случае в морской воде.

Анализируя приведенное выражение (20) легко показать, что δO^{18} для неизмененных осадочных известняков, отложившихся при низкой температуре, должно быть по абсолютной величине больше, чем для тех же пород, перекристаллизованных при повышенной температуре. Это следует из того, что, как известно, значения констант равновесия обменной реакции между H_2O^{18} и CO_2^{16} с повышением температуры падают, что и соответствует меньшей степени разделения изотопов. Фактические материалы, полученные исследователями, находятся в полном соответствии с выводами теории. Так, для участков неизмененных пород, вдали от рудных тел, были получены значения δO^{18} : для кальцита — порядка 24,1‰; для доломита — 28,6‰ и для кремней — 30,4‰ с колебаниями около 6%. В то же время для пород, подвергавшихся термальному воздействию, значения δO^{18} падали: для кальцитов — до 13,4‰; для доломитов — до 16,4‰ и для кремней — до 16,1‰. Линейные размеры участков, на которых прослеживались аномальные распределения изотопов, достигали

1200 м, а размеры аномальных площадей в 10–20 раз превосходили размеры рудных залежей. Нарушения в соотношениях изотопов кислорода вблизи рудных тел исследователи объясняют существованием во время обмена изотопов либо градиента температуры, что вызвало термодиффузию в твердом состоянии с перемещением легкого изотопа O^{16} в "горячие" области, либо низким соотношением изотопов кислорода O^{18}/O^{16} в метаморфизующих растворах, обусловившим при перекристаллизации обмен изотопами между богатым O^{18} осадочным известняком и богатой O^{16} горячей водой. Каковы бы ни были причины этого, твердо установлено перераспределение изотопов кислорода в массивных карбонатах и кремнях, что может быть использовано для ряда практических целей, в частности для установления очагов термального метаморфизма.

Попытка установить подобные закономерности для изотопов углерода не увенчалась успехом.

Весьма примечательным является тот факт, что обычных первичных геохимических ореолов вблизи рудных тел установлено не было, хотя и были предприняты тщательные попытки их обнаружить в околорудных доломитах для металлов Cu, Pb, Zn, Mn, Sr, Ti, Al и других элементов.

Результаты многочисленных исследований ореолов первичного рассеяния разнообразных месторождений за рубежом изложены в обзорной работе Л.Б. Дральяка /43/. В ней описаны результаты исследований на восьми полиметаллических месторождениях, из которых семь американских (район Джонсон, Аризона; Тинтик, Юта; район юго-западного Висконсина; Санта-Рита, Нью-Мексико; Лэдвилл, Колорадо; Бон-Терр, Миссури; Дарвин, Калифорния) и одно западно-германское (район Фрейберга); медно-никелевом (Сэдбери, Онтарио); двух золоторудных (Голдфилд и Иеллоунайф); двух медно-цинковых колчеданных (Дактаун и Элизабет); сидеритовом (Фюссеберг); шеедитовом (Мицишикотен) и на некоторых других.

Минералогический состав большинства месторождений — в основном сульфидного типа со сплошными и вкрапленными рудами; остальные месторождения можно рассматривать как рудно-кварцевые с преобладанием кварца.

По форме рудные тела перечисленных месторождений весьма разнообразны и представлены трубообразными и ветвистыми залежами, обычно крутопадающими, пластообразными залежами крутого и пологого падения, линзами, жиллообразными и жильными телами. Некоторые рудные тела слепые.

Вмещающими являются в основном карбонатные породы (известняки, доломиты), в отдельных случаях кремнистые, а также нормальные песчано-глинистые породы, монциты, нориты, породы эффузивных серий и гнейсы.

По генезису практически все месторождения (за исключением Сэдбери) постмагматические, главным образом гидротермальные.

Отбор проб коренных пород производился из естественных обнажений, выработок, керн скважин; в отдельных случаях анализировались мономинеральные фракции. Применялся спектральный анализ на рудообразующие элементы

(Cu, Zn, Pb, Ni, Co, V, Mo, Ti, Mn, As и некоторые другие); сумма металлов определялась при помощи реакций с дитизоном.

Не имея в виду сколько-нибудь подробно рассматривать эти примеры, но считая полезным общее ознакомление с ними, приведем краткие сведения, используя для этого материалы упомянутого обзора и обобщение, сделанное Л.Б. Дралюком.

1. Ореолы первичного рассеяния перечисленных месторождений проявляются по-разному. У некоторых месторождений они не развиваются вовсе, у других протягиваются от рудных тел всего на десятки сантиметров — первые метры, наконец, у третьих развиваются на десятки — первые сотни метров от руды.

2. Результаты исследований заставляют думать, что возникновение ореолов обуславливалось, главным образом, физико-механическим состоянием вмещающих пород в момент отложения руд и, в меньшей мере, характером месторождения и составом пород. Наибольшее значение при формировании ореола играла система дорудной трещиноватости, определявшая развитие ореолов как в боках, так и в кровле рудных тел. Иными словами, главным фактором ореолообразования признается инфильтрация; диффузии отводится подчиненная роль. В соответствии с этим количественные характеристики распределения элементов рассеяния в ореолах, при удалении от рудных тел, резко колеблются, хотя общая тенденция затухания содержаний и имеет место.

3. Пропорциональности между масштабом месторождения и размерами его ореола первичного рассеяния не наблюдается. Часто непромышленные рудные скопления создают вокруг себя ореолы, интенсивность которых такая же, как и у ореолов, сопровождающих промышленные месторождения.

4. Формы ореолов первичного рассеяния, которые контролируются в первую очередь пористостью и трещиноватостью вмещающих пород, находятся в связи также и с формой рудных тел.

Намечаются следующие морфологические особенности ореолов в зависимости от формы рудных тел:

а) линейно-вытянутые — для пластовых и жильных тел;

б) линзовидные — для рудных линз;

в) неправильные по форме ореолы — в структурах пересечения и трещинах оперения;

г) сложные ореолы — вокруг сопряженных и сближенных рудных тел.

Форма ореолов для отдельных элементов зависит от инфильтрационных и диффузионных свойств этих элементов.

5. Состав элементов в ореолах в каждом отдельном случае, очевидно из-за несовершенной методики анализа, не выяснялся с достаточной полнотой. В результате этого соображения о комплексности ореолов первичного рассеяния месторождений, в зависимости от металлического состава их, не могут быть сделаны с необходимой уверенностью. Перечень же элементов, фактически изучавшихся и установленных в ореолах в итоге проведенных исследований, включает в себя Pb, Zn, Cu, Ni, Co, V, Ag, As, Mo, Sn, Mn, S ; в отдельных

случаях исследовалось распределение летучих компонентов H_2O и CO_2 ; как правило, в каждом частном случае все эти элементы устанавливались в различных комбинациях друг с другом.

В подавляющем числе случаев в ореолах были отмечены "положительные" содержания элементов, т.е. увеличенные против местных фонов, что свидетельствует о привносе этих элементов в ореол из рудоподводящих каналов. В этих случаях увеличение содержаний по всей группе изученных элементов, вблизи рудных тел, распределялось в пределах (9-10) - (150-170) кларков концентраций. В отдельных случаях были установлены (главным образом по Mn , Al , Mg , а не по малым элементам) "отрицательные", т.е. пониженные против фона содержания, что авторы объясняют "уносом" (выщелачиванием) этих элементов из зоны ореола, причем остаточные содержания их достигали только нескольких процентов от фоновых содержаний.

6. Линейные (и площадные) размеры ореолов, выявленные проведенными исследованиями, как оказалось, зависят от формы рудных тел и условий залегания; в целом они заключены в пределах практически от 0 м в плотных породах и до первых сотен метров в проницаемых породах и зонах дробления. Конкретно установлено:

а). Для вертикальных и крутопадающих полиметаллических (главным образом, свинцово-цинковых) рудных тел и жил, залегающих в карбонатных породах, размеры первичных ореолов рассеяния по Pb , Zn , Cu обычно составляют несколько метров, реже менее 1 м, с каждой стороны рудного тела (рудник Кариса, некоторые тела в Тинтике, Санта-Рита), причем резкой разницы в размерах ореола на поверхности и на глубине не наблюдается. В отдельных случаях (месторождение Лэдвилл, представленное телами неправильной формы в известняках) геохимические ореолы рудообразующих элементов не установлены вовсе; это побудило заняться здесь исследованием ореолов изотопов ряда элементов, что, как указывалось выше, и привело к положительным результатам в отношении кислорода.

б). Для крутопадающих полиметаллических месторождений, залегающих в гнейсах и осадочных породах (Фрейберг, Эренбрейгштейн на Рейне и др.), ореолы рассеяния Pb и Zn развиваются в пределах первых метров, а ряда других элементов (Cu , Ni , Co , V , Ag , Mo , As) - в непосредственной близости к руде.

в). Для крутопадающих флюорит-баритовых жил, залегающих в гранитах (рудник Антон, Шварцвальд) ореолы Pb , Cu , Ni , As распространяются в стороны от жил всего на 2-3 м.

г). Для крутопадающих золото-алунитовых жил, залегающих в эффузивных породах (Голдфилд, Невада), установлено наличие "отрицательных" ореолов Mn и Mg , развивающихся на 8-10 м в каждом боку жилы.

д). Для пологопадающих полиметаллических месторождений, даже залегающих в свитах, богатых карбонатными породами (рудное тело Мур в районе Джонсона, Аризона; рудное тело Генслер, Висконсин; район Санта-Рита, Нью-

Мексико), установлены ореолы значительно более протяженные, чем для тел крутого падения. Протяженность этих ореолов, особенно по ослабленным зонам в висячих боках, достигает от десятков и до одной-двух сотен метров. Над слепыми рудными телами месторождения Тинтик-Стандарт, залегающими в карбонатных породах, в свою очередь перекрытых риолитами, ореолы первичного рассеяния Rb и Zn были установлены в пиритизированных риолитах на высоте до 600 м над рудами. Именно в этом районе, с помощью изучения ореолов первичного рассеяния на базе специальных буровых работ, были открыты новые слепые тела, залегающие на глубинах до 430 м.

е). Для донных руд месторождения Сэдбери, залегающих в норитах и по генезису являющихся, по-видимому, существенно протоматматическими, изученные ореолы рассеяния Mn, V, Ti, Ni были прослежены в норитах висячего бока на расстоянии до 165 м.

ж). Для золото-кварцевых жил и линз месторождения Иеллоунайф (Канада), залегающих в зеленокаменных и метаморфизованных осадочных породах, установлены закономерные ореолы рассеяния H₂O, CO₂ и S; при этом для S было выявлено различное поведение разных изотопов этого элемента.

7. По выявлению зональности строения ореолов первичного рассеяния исследованных месторождений уверенных выводов, по целому ряду причин, сделать нельзя. Однако можно считать установленным следующее:

а). Зональность распределения элементов в ореолах существует и проявляется более резко для месторождений пологого залегания, нежели для крутого.

б). В ореолах ряда полиметаллических месторождений, залегающих в карбонатных породах, проникновение Rb, Zn и Cu в боковые породы наблюдается примерно на одинаковом расстоянии от руды (Тинтик), хотя иногда то Rb уходит дальше, чем Zn (Санта-Рита), то Zn дальше, чем Rb (Висконсин).

в). В ореолах полиметаллических жил района Фрейберг, залегающих в гнейсах, установлена следующая зональность элементов (считая от руды): Co, Ni, V, Mo, Zn, As, Sn, Pb. Исследование микроэлементов в биотитовой мономинеральной фракции из гнейсов показало также большее проникновение Rb.

г). В ореолах флюорито-баритовых жил Шварцвальда, залегающих в гранитах, зональность, считая от жил, следующая: Co, Ni, As, V, Pb, Mn.

д). В ореоле сульфидно-никелевого месторождения Сэдбери элементы распределяются, считая от руды, в таком порядке: Mn, V, Ti, Ni.

x
x x

В последнее время, в связи с теоретическим обоснованием и практическим установлением зональности строения ореолов первичного рассеяния, значительное внимание уделяется выявлению группы элементов широкого рассеяния, т.е. элементов наиболее далеко и широко распространяющихся, в процессе возникновения ореола, от рудного тела.

С успешным решением подобной задачи связывается возможность разработки действенных геохимических приемов обнаружения рудоносных полос и зон при

среднемасштабных поисках, порядка 1:100 000 - 1:50 000. Действительно изучение первично-конституционального рассеяния в породах должно, по-видимому, вполне обеспечить решение рудно-поисковых задач при мелкомасштабных исследованиях, а разного рода металлотрические съёмки, фиксирующие вторичные ореолы рассеяния обычных рудообразующих элементов, в целом позволяют обнаружить рудные месторождения при крупномасштабных работах. В то же время уверенных геохимических приемов установления и прослеживания таких геологических образований как рудоносные полосы и зоны, являющиеся объектами изучения при работах промежуточных масштабов, до сих пор нет. Подобного рода задачи и намечается решать с помощью изучения ореолов элементов широкого рассеяния, т.е. таких элементов, которые были бы несомненно связаны с процессами рудообразования и, в то же время для которых было бы особенно характерным существование в породах в форме квази-газообразного рассеяния, обеспечивающего дальнюю диффузию. Тогда, произведя соответствующие по чувствительности и точности определения содержания подобных элементов и построив линии изоконцентраций, можно было бы делать выводы об очагах рудообразования и направлениях движения рудообразующих агентов.

Первостепенным условием, в какой-то мере гарантирующим возможность практической постановки и разрешения поставленной задачи, является выбор элементов:

а) исключительно малой способности к фиксации в горных породах в виде собственных минералов и изоморфных примесей (элементы безминерального рассеяния);

б) однообразной способности к "растворению" в различных породообразующих минералах (элементы, наиболее склонные к квази-газообразному рассеянию);

в) легко поддающихся определению массовыми экспрессными методами, с чувствительностью минимум на порядок выше их кларков.

Рассматривая с указанных точек зрения всю плеяду элементов, так или иначе связанных с процессами рудообразования, нельзя не прийти к выводу, что элементами, наиболее подходящими для рассматриваемых целей, могут служить, прежде всего, крайние галоиды - иод и бром. Действительно, эти элементы практически не образуют собственных минералов, не способны к изоморфным замещениям и (по крайней мере, иод) являются, по результатам исследования самых различных геохимиков, элементами "чистого" (квази-газообразного, по В.И.Вернадскому) рассеяния. Кроме того, их малые ионные потенциалы (большие ионные радиусы, равные 2,20 и 1,96 Å, и малые заряды, равные (-1), облегчают миграцию во внутрипородных поровых водах, заполняющих сообщающуюся систему интерстиционных и др. микротрещин, что, как известно, приводит к развитию диффузии в горных породах. В то же время уже существуют способы уверенного определения малых содержаний этих элементов (прежде всего иода), обеспечивающие возможность получения уверенных результатов.

Наряду с элементами, дающими ионы крупных размеров, в качестве возможных элементов широкого рассеяния привлекают внимание элементы с ионами ми-

нимальных размеров. Можно себе представить, что подобные ионы, несмотря на их неизбежно большие ионные потенциалы, будут очень способны к непосредственной диффузии сквозь кристаллические решетки. Такими элементами могут быть углерод, бор, бериллий и германий, образующие особенно часто ионы с малыми радиусами — 0,15, 0,20, 0,34 и 0,44 Å соответственно. Использование бора и углерода особенно привлекательно, поскольку они обладают, при малом атомном весе, изотопами.

При принципиально благоприятном разрешении поставленной проблемы в качестве элементов-индикаторов широкого рассеяния можно использовать в будущем еще некоторые, например индий, кадмий, скандий.

Исходя из изложенных теоретических предпосылок в ВИТР, начиная с 1959 г., указанную проблему решено было проверить на практике. В качестве исследуемых элементов были выбраны иод и бор.

Объектами для исследования ореолов иода явились полиметаллические месторождения Армении, выбранные по той причине, что они принадлежат к молодому (третичному) возрасту. Следовательно, если бы ореолы такого предположительно легко рассеивающегося элемента, как иод, образовались, то они за этот относительно короткий срок не успели бы исчезнуть в окружающем пространстве за счет непрерывной диффузии.

Непосредственные работы были проведены Б.Ф.Куликовым и М.А.Лапшом на барито-полиметаллическом месторождении. Последнее представлено рядом полных линзообразных залежей, крупных гнезд и вкрапленников, приуроченных к контакту кварц-порфиров и перекрывающих их порфиров, и осложнено тектоническими нарушениями. В составе руды — пирит, сфалерит, халькопирит, теннантит, галенит в сопровождении кварца и барита; в примесях Sn, Mo, Bi, As, Cd.

Распределение иода изучалось над сброшенным крылом одной из слепых линз; для опробования был использован квершлаг, проходящий над рудой в порфири-тах всяческого бока. Опробовались порфириты из стенок выработки. Определение иода производилось по методике, разработанной для геологопоисковых нужд сотрудником ВИТР А.Д.Миллером. В результате было установлено, что при фоновом содержании I в порфиритах, равном 0,1 — 0,3 г/г, содержания этого элемента в ореоле на высоте 120—140 м над рудой достигали 3—4 г/г, что во многом превосходило фон. Интересно отметить, что ореолы Pb, Zn, Cu распространяются в порфириты не более чем на 0,5—1,0 м., считая от кромки рудной залежи.

Наряду с иодом в качестве объекта исследования был выбран бор, обладающий высокой подвижностью в литосфере. Эта подвижность элемента, малый атомный вес, большая относительная разность масс изотопов B^{10} и B^{11} (порядка 10%), без сомнения, должны способствовать разделению изотопов бора в естественных геологических процессах. Поэтому, наряду с исследованием распределения самого бора, было проведено изучение распределения и его изотопов. Работы выполнялись Ю.П.Шергиной и А.В.Каминской на серийном масспектрографе МИ-1305.

К настоящему времени разработаны методики выделения бора из пород с кларковыми содержаниями этого элемента и определения отношения B^{11}/B^{10} с точностью $\pm 0,1\%$. Использование этих методик позволило изучить распределение изотопов бора на сурьмяно-свинцовом и на медно-никелевом месторождениях. В обоих случаях вблизи оруденения наблюдается значительное смещение изотопного равновесия (до 2–2,5%), по сравнению с фоном в неизмененных породах. На медно-никелевом месторождении ореол аномального изотопного состава бора оказался заметно шире ореола рассеяния Ni, Cu, Co и др. рудообразующих элементов.

Все вышеизложенное касается примеров ореолов первичного рассеяния постмагматических месторождений простого или сложного состава. Ниже кратко рассмотрим примеры ареалов первичного рассеяния, по существу подчиняющихся всем закономерностям образования ореолов и отличающихся от последних только несравненно большими масштабами проявлений.

При геохимических исследованиях на оловорудном месторождении, как отмечалось в разделе, посвященном первично-конституциональному рассеянию, Н.И. Сафроновым и Н.М. Янчук было установлено сингенетичное обогащение оловоносных гранитоидов акцессорным бериллием. Одновременно было установлено, что роговики, вмещающие гранитоиды, в экзоконтакте также обогащены бериллием, причем обогащенные полосы, шириной порядка 50–100 м, оконтуривают выходы гранитоида. Содержания бериллия в самом экзоконтакте, почти равные содержаниям его в гранитоиде, по мере удаления от контакта уменьшались и на указанном расстоянии сливались с фоновыми его содержаниями в роговиках, в несколько раз меньшими содержаниями Be в гранитоидах. Подобное распределение содержания, уменьшающихся от контакта, свидетельствует, по нашему мнению, о выносе этого элемента из гранитоидной интрузии во вмещающие породы в период ее становления с образованием вокруг интрузии первичного ареала рассеяния Be. Безусловно, этот факт говорит и об относительном богатстве интрузии упомянутым элементом.

При исследовании примесей в эпигенетических вкрапленных арсенопиритах, из ареало в рассеяния этого минерала, Н.И. Сафроновым была установлена резкая разница в составе элементов-примесей, в зависимости от места взятия. Так арсенопириты оловоносных районов Крайнего Северо-Востока СССР выделялись повышенными содержаниями акцессорных Sn, TR, Zn, тогда как арсенопириты из золотоносных районов — Au, Hg. Некоторые элементы-примеси (Pb, Cu, Ni, Co, V, Cr, Sb) присутствовали в арсенопиритах из всех районов в целом с однообразными содержаниями. Указанный факт с несомненностью говорит о возможности выявления металлогенических районов по ареалам рассеяния путем исследования элементов-примесей в эпигенетических минералах-вкрапленниках.

При геохимическом исследовании чукотских гранитоидов С.Ф. Лугов /44/ неоднократно устанавливал повышенные содержания акцессорных олова и бора в

активных экзоконтактах оловоносных интрузивов при распределении содержаний, свидетельствующих, по мнению автора, о несомненном выносе этих элементов из гранитоидов во вмещающие породы. Ширина этих ареалов рассеяния Sn и W определяется им в 100–150 м. В одном случае опробования эндоконтакта оловоносного гранитоида и его ороговикованного экзоконтакта по стенкам кварцита было установлено, что ширина ареала рассеяния Sn в роговиках, считая от контакта с гранитоидом, равняется 125 м, причем в этих пределах обогащение оловом в 2–3 раза выше, чем содержания этого элемента в эндоконтакте гранитоида и в роговиках в удалении от массива. Поскольку подобные явления устанавливались им только в связи с гранитоидами, обладающими повышенными содержаниями этих элементов, то, следовательно, они возникли именно в результате действительно имевшего место обогащения исходной гранитоидной магмы как Sn, так и W.

Результаты обстоятельных исследований ареалов рассеяния гранитоидных интрузивов приведены в коллективном труде В.С. Коптева-Дворникова и др./45/. В частности, по данным этих исследователей, в Бет-Пак-Дале М.А. Жуковым и А.Н. Дистоновой установлены случаи широких (до 3 км) ареалов рассеяния акцессорных Sn, W, F и B в экзоконтактах активных гранитоидных интрузий, охватывающих не только зоны роговиков, но и породы, расположенные далеко от контактов и лишенные видимых признаков приконтактных изменений. Там же установлено обогащение оловом гранатов, развитых в известково-силикатных роговиках.

Совершенно аналогичные случаи установлены И.Ф. Григорьевым и Е.И. Долгановой в Забайкалье. При этом оказалось, что наиболее широкие ареалы, с удалением от контакта на 2–3 км и с выходом за пределы роговиков, создается. Ближе к интрузивам, с наложением на ареал рассеяния F, располагаются ареалы B и Sn шириной 400–600 м, считая от контакта. Наконец, в непосредственном ороговикованном экзоконтакте развивается ареал рассеяния вольфрама, имеющий ширину всего 100–200 м. Одновременно там же было установлено, что ареалы первичного рассеяния гранитоидных интрузивов развиваются более успешно на участках пологих контактов и наружных выступов и гребней массива, нежели на участках крутых и обратных падений контактовой поверхности.

Авторы подчеркивают, что поскольку с изученными ими интрузивами генетически связаны месторождения Sn и W, постольку установление ареалов рассеяния этих элементов (и их парагенетических спутников) вокруг того или иного интрузива может служить оценочным критерием его перспективной рудоносности.

Следует заметить, что вопрос об ареалах рассеяния массивов базитов и гипербазитов до настоящего времени остается открытым.

Г. Выводы и заключения

Исходя из предположения об едином происхождении рудо- и ореолообразующих постмагматических продуктов и рассматривая инфильтрацию и диффузию в качестве главнейших движущих причин образования ореолов, автор сделал попытку обосновать ряд основных вопросов теории первичных ореолов рассеяния постмагматических месторождений. В результате могут быть сделаны следующие выводы:

1. Элементный состав ореолов /и ареалов/ является сложным, в целом единым для разных, по главному металлу, рудных месторождений.

2. Распределение элементов в ореолах является зональным и контролируется рядом факторов. Наблюдается естественное разделение изотопов.

3. Главный вид существования большинства элементов в ореолах, как правило, безминеральный, в формах жидких и твердых изоморфных и неизоморфных растворов непосредственно в породах-носителях ореолов, либо в эпигенетических минералах-вкрапленниках типа пиритов, пирротинов, арсенопиритов и т.п. Элементы, легко образующие собственные минералы, могут существовать также и в минеральном виде.

Накопленные к настоящему времени на самых различных месторождениях и территориях опытные материалы хотя и не содержат достаточных данных для всесторонней проверки теоретических положений, однако, в основном, подтверждают многокомпонентность и зональность ореолов первичного рассеяния постмагматических месторождений. На этом основании упомянутые образования могут быть использованы:

а). Для обнаружения рудных месторождений, в том числе слепых, по самому факту существования первичного ореола рассеяния элементов.

б). Для определения глубины эрозионного среза обнаруженных месторождений по соотношению содержаний различных ореольных элементов в исследуемых сечениях; для случая "сложных" ореолов эта задача может не иметь положительного решения.

§ 4. ОРЕОЛЫ ПЕРВИЧНОГО РАССЕЙНИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ И ДРУГИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Среди метаморфических месторождений надо различать месторождения, образовавшиеся ранее тем или иным путем, а затем метаморфизованные, и метаморфогенные месторождения, которые возникли в результате мобилизации вещества при том или ином виде метаморфизма.

Для месторождений метаморфизованных, однако не до степени исчезновения рудного материала, мы, в полном соответствии с практическими данными об устойчивости первично-конституционального рассеяния при метаморфизме, должны допустить и подобную же устойчивость ореолов первичного рассеяния. Поэтому, при поисках подобных месторождений по их ореолам первичного рассея-

ния следует применять те же присмы, что и при поисках неметаморфизованных месторождений, с обязательным учетом генезиса искоемых образований.

Исходя из общих соображений, метаморфогенные месторождения обязательно должны сопровождаться ореолами первичного рассеяния того же генезиса и **ана-логичного** состава, напоминая в **этом** отношении месторождения и ореолы собственно осадочного происхождения.

Что касается месторождений другого генезиса, то их ореолы первичного рассеяния могут быть предугаданы исходя из закономерностей образования, состава и строения ореолов месторождений трех главных генетических классов: собственно магматических, осадочных и постмагматических.

ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ОРЕОЛАМ ПЕРВИЧНОГО РАССЕЯНИЯ

Вышеприведенные теоретические соображения и опытные данные в целом касаются ореолов и ареалов первичного рассеяния и позволяют сделать следующие основные практические выводы:

1. Все месторождения любого генезиса — собственно магматические, осадочные, постмагматические (метаморфизованные и неметаморфизованные), метаморфогенные и др. — сопровождаются ореолами первичного рассеяния. Особенности этих образований зависят от генезиса месторождения, формы и условий залегания рудных тел, характера вмещающих пород и развития в них ослабленных зон.

2. Ореолы первичного рассеяния месторождений, увеличивая собой поисковые размеры месторождений, тем самым облегчают и удешевляют их обнаружение. СС этой точки зрения указанные образования являются весьма ценными геохимическими поисковыми признаками. Кроме того, в ряде случаев ореолы позволяют установить высоту эрозионного среза и, тем самым, прогнозировать оруденение на глубину.

3. Существование ареалов первичного рассеяния в экзоконтактах активных, по крайней мере гранитоидных, интрузий является важным геохимическим обстоятельством, облегчающим изучение особенностей интрузивов.

Л и т е р а т у р а

1. ОБРУЧЕВ В.А. Рудные месторождения. Госгеонефтеиздат, Москва-Ленинград-Новосибирск, 1934.
2. КРОЙД Г.Р. Коллоиды. Госхимтехиздат, Л., 1933.
3. ПОЛФЕРОВ Д.В. Геохимические поиски месторождений медно-никелевых сульфидных руд. Бюллетень научно-технической информации ОНТИ, МГиОН, 1962, № I (35), Госгеолтехиздат.
4. СТРАХОВ Н.М. Основы теории литогенеза т. I и II Изд. АН СССР, М., 1960.
5. БЕТЕХТИН А.Г. Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования. В кн. Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях, 2-е изд., АН СССР, М., 1955.
6. LINDGREN W. Mineral Deposits. Fourth edition, New-Jork, London, 1933.
7. RANSAMA K. and SAHAMA Th.G. Geochemistry. Third edition, Chicago, 1955.
8. ТОЛСТИХИН О.Н. Термальные воды Камчатки и их освоение. "Советская геология", 1958, № 2, Госгеолтехиздат.
9. ЗАХАРЧЕНКО А.М. Минералообразующие растворы и генезис кварцевых жил. Госгеолтехиздат, М., 1955.
10. ФЕННЕР К.Н. Пнеуматолитовые процессы при образовании минералов и руд. Геология рудных месторождений Западных Штатов США, Сб., посвященный В. Линдгрену, ОНТИ, 1937.
11. КОРЖИНСКИЙ Д.С. Фильтрационный эффект в растворах и его значение для геологии. Изв. АН СССР, сер. геологич. 1947, № 2.
12. КОРЖИНСКИЙ Д.С. Очерк метасоматических процессов. В кн. Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях, Изд. 2-е, АН СССР, М., 1955.
13. КОРЖИНСКИЙ Д.С. Вывод уравнений простой диффузионной метасоматической зональности. Доклады АН СССР, т. LXXXIV, 1952, № 4.
14. MASKEY R. A. The control of impounding structures on the deposition. Economic geology, vol. XLI, N I, 1946.
15. BUGGE JENS A. W. The geological importance of diffusion in the solid state. Avhandlingar utdich av der Norske videnskaps Academi i Oslo, 1945.
16. БЭРРЕР Р. Диффузия в твердых телах. Изд. ин. лит., М., 1948.
17. ОВЧИННИКОВ Л.Н. МАКСЕНКОВ В.Г. Экспериментальное исследование фильтрационного эффекта в растворах. Изв. АН СССР, сер. геолог., 1949, № 3.
18. БЕТЕХТИН А.Г. Курс минералогии. Изд. 2-е исправл., Госгеолтехиздат, М., 1956.
19. ОНИСИ Х., СЭНДЕЛЛ Э. Геохимия мышьяка. В кн. Геохимия редких элементов, Изд. ин. лит., М., 1959.

20. ОНИСИ Х., СЭНДЕЛЛ Э. Заметки по геохимии сурьмы. В кн. Геохимия редких элементов Изд. ин. лит., М., 1959.
21. ЮНГ Р.С. Геохимия кобальта. В кн. Геохимия редких элементов, Изд. ин. лит., М., 1959.
22. БРОДСКИЙ А.Д. Гидрогеохимические поиски медных месторождений. Госгеолтехиздат, 1958.
23. МУЛИКОВСКАЯ Е.П., ТОЛСТИХИН О.Н. О содержании германия в воде некоторых источников Камчатки. "Геохимия", 1958, № 4.
24. MAZON Br. Principles of geochemistry. New-York, London, Second printing, 1956.
25. ЭММОНС В.Х. О механизме образования некоторых систем металлоносных рудных жил, связанных с гранитными батолитами. Геология рудных месторождений Западных штатов США, Сб., посвященный В. Линдгрену, ОНТИ, 1937.
26. САУКОВ А.А. Доклады АН СССР, 22, 1939, № 5.
27. САУКОВ А.А. Геохимия ртути. В кн. Труды института геологических наук АН СССР, вып. 78, сер. минерггеологич., № 17, 1946.
28. САУКОВ А.А. Геохимия. Госгеолтехиздат, 1951.
29. САФРОНОВ Н.И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Ч. I - Некоторые закономерности общей геохимии. Изд. ОНТИ ВИТР, сер. "Обм. оп.", № 50. 1962.
30. СОЛОВОВ А.П., ФУРСОВ В.З. Поиски не выходящих на поверхность рудных тел месторождения Ачисай. "Советская геология", 1959, № 3, Госгеолтехиздат.
31. ФУРСОВ В.З. Поиски слесых свинцово-цинковых месторождений по ореолам рассеяния ртути. Доклады АН СССР, 1961, том. 137, № 2.
32. МУКАНОВ К.М., РОССМАН Г.И. Первичные ореолы рассеяния некоторых полиметаллических и медных месторождений Центрального Казахстана и Рудного Алтая. Доклады советских геологов на Международном геологическом конгрессе, XXI сессия, раздел I, геохимия, Госгеолтехиздат, 1960.
33. ВИГДОРОВИЧ Д.А., ЗИВЕРТ Р.Р., РЫСС Ю.С. Разработка рациональной комплексной методики поисков полиметаллических месторождений на территориях с большой мощностью рыхлых отложений. В кн. Новое в методике и технике геологоразведочных работ, Труды ВИТР, Сб. № 5, Гостоптехиздат, Л., 1962.
34. ОЗЕРОВА Н.А. О применении первичных ореолов рассеяния ртути для поисков свинцово-цинковых месторождений. "Геохимия", 1959, № 7.
35. ВЕРШКОВСКАЯ О.В. Первичные ореолы рассеяния ртути как поисковый признак ртутно-сурьмяных месторождений. "Разведка и охрана недр", 1956, № 4.
36. ФУРСОВ В.З. Ореолы рассеяния ртути и других элементов-спутников рудных месторождений Казахстана. Бюллетень научнотехнической информации ИГиОН СССР, 1962, № I (35), Госгеолтехиздат.

37. ФЕДОРЧУК В.П.
НИКИФОРОВ Н.А. Об использовании надрудного пирита в качестве индикатора при поисках низкотемпературных месторождений закрытого типа. "Разведка и охрана недр", 1958, № 5.
38. БЕЛЕВЦЕВ Я.Н. Обоснование методов поисков слепых железорудных залежей Криворожского типа. Материалы к всесоюзному совещанию по разработке научных основ поисков слепых рудных тел, Госгеолтехиздат, М., 1958.
39. КАБЛУКОВ А.Д.,
ВЕРТЕПОВ Г.И. Ореолы рассеяния элементов вокруг урановых рудных тел. "Геология рудных месторождений", 1960, № 2, Изд. АН СССР.
40. САФРОНОВ Н.И.,
ПОЛИКАРПОЧКИН В.В.,
ТРУШКОВ Ю.Н. Комплексные методы поисков месторождений золота. "Советская геология", 1960, № 4, Госгеолтехиздат.
41. ГЛИКО О.А. О задачах работ по внедрению геохимических методов поисков. Бюллетень научно-технической информации МГИОМ СССР, 1962, № I (35), Госгеолтехиздат.
42. ENGEL A.E.
CLAYTON R.N.,
EPSTEIN S. Variations in Isotopic Composition of Oxygen and Carbon in Leadville Limestone (Mississippian Colorado) and in its Hydrothermal and Metamorphic Phases. The Journal of Geology Vol. 66, July 1958, The University of Chicago Press, Chicago.
43. ДРАЛЕК Л.Б. Первичные ореолы рассеяния рудных месторождений (по данным зарубежной литературы). Информ. сб., № 28, ОНТИ ВИТР, Л., 1961.
44. ЛУГОВ С.Ф. Мезозойские гранитоиды Чукотки и связь с ними оруденения. "Советская геология", 1959, № 10, Госгеолтехиздат.
45. КОПТЕВ ДВОРНИКОВ В.С. Интрузивы гранитной формации малых глубин, поведение ГРИГОРЬЕВ И.Ф. и др. в их породах элементов-примесей и критерии генетических связей рудообразования с ними. В. кн. Труды 2-го Всесоюзного петрограф. совещания, Сб., раздел "Магматизм и связь с ним полезных ископаемых", 1960. Госгеолтехиздат.

Редакторы Алексеев Н.Н. и Сафронов Д.Н.

Подписано к печати 14/II 1963г. М 22089.
Ротапринт ВИТР
Ленинград, В-III, Кожевенная ул. 23а
6,5 авт.л. Тираж 750. Заказ № 691

1490