

Н. И. Сафронов, С. С. Мещеряков  
Н. П. Иванов

---

# ЭНЕРГИЯ РУДО- ОБРАЗОВАНИЯ

И  
ПОИСКИ  
ПОЛЕЗНЫХ  
ИСКОПАЕМЫХ

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ГЕОТЕХНИКА»

Всесоюзный научно-исследовательский институт  
методики и техники разведки

Н. И. Сафронов, С. С. Мещеряков,  
Н. П. Иванов

# ЭНЕРГИЯ РУДО- ОБРАЗОВАНИЯ

И  
ПОИСКИ  
ПОЛЕЗНЫХ  
ИСКОПАЕМЫХ

Под редакцией кандидата геолого-минералогических наук  
Н. И. МАРОЧКИНА



ЛЕНИНГРАД «НЕДРА» ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ 1978

**Сафронов Н. И., Мещеряков С. С., Иванов Н. П.**  
Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. Под ред. Н. И. Марочкина. Л., Недра, 1978. 215 с. (М-во геологии СССР. Науч.-произв. объединение «Геотехника». Всесоюз. науч.-исслед. ин-т методики и техники разведки).

В работе сжато изложены теоретические, геолого-геохимические представления об энергии рудообразования, термодинамические обоснования расчетов этой энергии для различных рудных месторождений. Приведены результаты решения практических задач, связанных с исследованием многокомпонентных руд и ореолов и с оценкой перспектив рудоносности поисковых площадей. Для этого рассмотрены теория трещинообразования и сделаны практические выводы.

Основная цель работы — ознакомление поисковиков и разведчиков с основами использования представлений об энергии рудообразования и закономерностях трещинообразования для оценки перспектив рудоносности территорий.

Книга предназначена для геологов, занятых поисками и разведкой рудных месторождений.

Табл. 50, ил. 45, прил. 1, список лит. 94 назв.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, Ф. Энгельс много труда вложил в изучение истории науки и техники. Это позволило ему прийти к заключению, что научно-техническое развитие человечества проходит во времени самоускоренно. В частности, в своей работе «Диалектика природы» он так сформулировал этот принцип: «...с тех пор (с эпохи Ренессанса) и развитие науки пошло гигантскими шагами, ускоряясь, так сказать, пропорционально квадрату удаления во времени от своего исходного пункта» [85, с. 5].

К настоящему времени это положение Ф. Энгельса получило всеобщее признание и распространение на весь прогресс человечества. При этом неоднократно и во многих статьях подчеркивается экспоненциальный закон прогресса, выражающийся уравнением

$$P_t = P_0 e^{\alpha t},$$

где  $P_t$ ,  $P_0$  — состояние прогресса в момент времени  $t$ , считая от выбранного момента отсчета, и в начальный момент отсчета времени;  $\alpha$  — постоянный коэффициент.

Характерной особенностью формул этого типа является неуклонный рост функции  $P$  при линейном увеличении аргумента  $t$ . Эта формула скорее символ, нежели точное математическое выражение реальности. Однако она довольно четко отображает сущность все ускоряющегося во времени всестороннего прогресса человечества, особенно если вводить в рассмотрение достаточно крупные отрезки времени (например, столетия). Заметим, что экспоненциальный закон одинаковым образом относится как к прогрессу в целом, так и к отдельным направлениям развития.

Рассмотрим кратко особенности развития металлургии и горного дела. Общеизвестно, что человечество узнало цветной металл и его обработку около 5 тыс. лет назад, железо 3—3,5 тыс. лет. Если все извлеченные металлы с начала добычи по состоянию на 1.1 1955 г. [68] принять за 100%, то в последующее десятилетие 1955—1964 гг. было извлечено от 10 до 45%. На будущее предполагается также ускоренный рост добычи всевозможных полезных ископаемых.

Главной целью геологической службы является обеспечение горнодобывающей (следовательно, металлургической) промышленности запасами соответствующих руд в недрах. Масштабы ежегодного прироста запасов должны следовать закономерностям, управляющим развитием металлургии, т. е. быть непрерывно возрастающими во времени. В то же время и трудности, с которыми приходится сталкиваться при решении геологоразведочных задач, нарастают пропорционально масштабам требуемых запасов. Дело в том, что год от года все заметнее и заметнее истощаются запасы легко обнаруживаемых руд, прирост запасов приходится покрывать за счет более трудно обнаруживаемых руд.

Таким образом, на ближайшие 20—30 лет в качестве генерального источника восполнения запасов руд необходимо рассматривать месторождения современных кондиций, но залегающие на глубинах ниже освоенного ныне горизонта, в среднем 400—500 м, иногда (Витватерсранд, Колар, Минас-Жерайс) 3000—3500 м. Таким образом устанавливается верхний уровень, нижний — 900—1000 м, тогда мощность слоя, подлежащего опискованию и разведке, составляет 500 м.

Это слой земной коры, который по опыту многовековой эксплуатации недр вышележащего слоя такой же мощности должен в полной мере обеспечить потребности металлургии в высококачественном сырье на ближайшие 2—3 десятилетия. В этих условиях достижение максимальной информативности от результатов геологоразведочных работ (при минимальном расходовании их объемов) сможет сыграть решающую роль. Действительно, одни выводы можно сделать, если рассматривать геологические факты сами по себе, и другие, если удастся показать, что они математически увязаны закономерно в едином уравнении.

Первоочередными должны явиться вопросы, касающиеся пограничной области — между учением о месторождениях и геохимией. Здесь наиболее привлекательной является задача установления математических закономерностей, связывающих запасы руд с содержанием в этих рудах ведущих элементов. В случае ее успешного решения задача прогнозирования запасов на больших или меньших площадях (по ограниченным фактическим данным) получит свое математическое обоснование.

Надо признать, что уже были более или менее успешные попытки решения этой задачи на фундаменте математической статистики и теории вероятности. Здесь уместно напомнить работы Н. К. Разумовского [59, 60], А. Д. Дрозда, проводившего работы (1949—1953 гг.) на россыпях крайнего Северо-Востока СССР, Н. Н. Боровко, М. В. Семенова, Р. И. Дубова и других советских ученых, а также С. Ласки [90], М. Аллэ [87], Ф. Блонделя [82], Р. Бейтса [88] и Л. Сливтера [93].

Однако при решении тех или иных поисково-разведочных задач нельзя не отметить, что подобный статистический подход

оставляет много места сомнениям и внутреннему неудовлетворению. Используя математическую статистику, можно упустить из вида и не учесть такие особенности изучаемого явления, объекта, процесса или его результатов, с которыми в силу тех или иных причин недостаточно или совсем не встречались на практике. Это наблюдается в подобласти непромышленных рудопоявлений и месторождений, статистическая изученность которых более слабая, чем в подобласти промышленных скоплений.

Необходимо выбрать такой путь познания закономерностей, который бы основывался на закономерностях точных физико-химических наук. В качестве основы используется термодинамика — наука о взаимопереходах, взаимосвязях и взаимопревращениях энергии, подчиняющихся строгим количественным закономерностям. Основаниями для выбора термодинамики служат следующие соображения. Возникновение любых месторождений полезных ископаемых в земной коре (в данном месте и в данное время, притом на фоне и за счет всеобщего рассеяния элементов) нельзя себе представить без разделения и перемещения земного вещества. Эти же процессы немыслимы без затрат соответствующих видов и количеств энергии, а последняя и является предметом изучения в термодинамике, что и послужило основанием для исследований [67, 68, 70], результаты которых оказались обнадеживающими. Используя понятия «энергия рудообразования» и основных термодинамических закономерностей, удастся приблизиться к познанию взаимосвязей «запасы руд — содержания металлов в рудах» и вывести математические выражения, характеризующие эти взаимосвязи.

Теоретические выводы в ВИТР начали проверять С. С. Мещеряков и Н. П. Иванов с 1969 г., показав на фактическом материале геологическую целесообразность исследований. Одновременно было показано, что понятия энергии рудообразования и термодинамические закономерности легко распространяются на ореолы первичного рассеяния месторождений, позволяя единым энергетическим показателем охарактеризовать эти образования сколь угодно сложного многоэлементного состава и тем самым сделать их объектами машинного счета. Одновременно выяснились положительные перспективы термодинамического энергетического подхода и в других геохимических случаях, например при геохимическом картировании, применив простой и наглядный способ отображения результатов работ.

Весь материал (результаты теоретических и практических исследований, выполненные в геологопоисковых и оценочных целях) изложен для уровня существующих ныне геологических взглядов; истории развития этих взглядов уделяется минимально требуемое внимание.

Нет необходимости подчеркивать важность идей В. И. Вернадского о всеобщем рассеянии элементов, которым следуют и авторы настоящей работы.

## **ОСНОВНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ**

Конечной целью настоящей работы является установление математических взаимоотношений между запасами металлов в недрах и содержаниями этих металлов в рудах с тем, чтобы использовать результаты для решения тех или иных оценочных задач. Поставленная цель должна быть достигнута так, чтобы условия решения общей и частных задач не противоречили накопленным геолого-геохимическим материалам, общепринятым теоретическим взглядам на рудообразование, известным данным по условиям осуществления процессов в природе и при моделировании в лаборатории, равно как и согласовывались бы с законами физико-химии и термодинамики. В соответствии с этим последовательно и кратко приводятся известные данные об особенностях физического и химического строения Земли, об особенностях поведения рудообразующих элементов в коре и современные взгляды на происхождение рудных месторождений.

### **§. 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ФИЗИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ**

Земля как физическое тело имеет своеобразную форму, именуемую геоидом. С достаточной степенью приближения геоид может быть уподоблен эллипсоиду с осями: полярной, равной 12713,7 км, и экваториальной 12756,32 км, при среднем радиусе 6371,032 км, его сжатие  $1/298,25$ . Объем Земли  $1,083 \cdot 10^{12}$  км<sup>3</sup>, масса  $5,976 \cdot 10^{24}$  г, средняя плотность 5,518 г/см<sup>3</sup>. Поверхность Земли 510,2 млн. км<sup>2</sup>, из которых на долю суши приходится 149,1 млн. км<sup>2</sup>, на водную поверхность морей и океанов 361,1 млн. км<sup>2</sup>. Поскольку в доступных наблюдению верхних слоях Земли не обнаружены породы, сравнимые по плотности со средней плотностью Земли (плотность наиболее распространенных кислых пород типа гранитов 2,69 г/см<sup>3</sup>, более редких ультраосновных перидотитов — 3,35 г/см<sup>3</sup>), то вполне обоснованно предположение о повышении с глубиной плотности геологических образований, слагающих Землю. Это предположение и соответствующие сейсмологические наблюдения позволяют выдвинуть и обосновать оболочечное строение Земли, с нарастающей с глубиной плотностью вещества, слагающих оболочки.

В настоящее время считают, что для Земли характерно трехслойное внутреннее строение: ядро, мантия и двухэтажная кора. Кора перекрыта двумя гомогенными оболочками: гидро- и атмосферой и, кроме того, гетерогенной биосферой, захватывающей верхний этаж коры (на глубину до 1800 м), всю гидро- и частично тропосферу (до 5000 м). Интересно отметить, что, согласно данным К. Ранкамы и Т. Сахама [92], отношение масс гранитоидного этажа коры (литосферы), гидро-, атмо- и биосферы выражается соотношением 1 000 000 : 69 100 : 300 : 1, это резко выделяет роль литосферы в ансамбле четырех верхних оболочек.

В соответствии с данными Ф. Кларка и Г. Вашингтона, гранитному слою литосферы (мощностью 16 км) можно сопоставить следующий петрографический состав, %:

Гранитоиды . . . . .	68,0
Габброиды . . . . .	19,0
Сиениты, дуниты, прочие . . . . .	8,0
Итого, изверженные породы . . . . .	95,0
Сланцы . . . . .	4,0
Песчаники . . . . .	0,75
Известняки . . . . .	0,25
Итого, осадочные породы . . . . .	5,00

Более подробное физическое строение видно из табл. 1, составленной по данным П. С. Воронова [17].

Достоверные данные по химическому составу Земли имеются лишь по литосфере и слагающим ее отдельным горным породам, по гидро-, атмо- и биосфере, т. е. по весьма ничтожной доле массы земного шара. По составу мантии в целом и особенно ядра можно строить лишь более или менее вероятные предположения, да и то зная состав метеоритов, т. е. внеземной материал. Лишь в последнее время появились некоторые материалы по химическому составу самых верхних слоев мантии, правда тоже базирующиеся на априорных допущениях. Тем не менее имеющиеся геохимические данные можно считать достаточными для вывода главных особенностей химизма Земли. В табл. 2 приведены обобщенные сведения по особенностям химизма верхних геосфер. Исходными для этих данных послужили материалы В. А. Гаврусевича [19], А. П. Виноградова [15], Б. Мэзона [91], А. А. Саукова [64], К. Ранкамы и Т. Сахама [92].

Фактические данные по химическому составу (верхних оболочек земного шара) дают богатый материал для общих выводов большого научного и прикладного значения, основополагающее начало было положено Ф. Кларком (1908), В. И. Вернадским [11, 14] и другими. В последующем эти выводы подкреплены новыми фактическими материалами, развиты и усилены трудами К. Е. Ферсмана, В. М. Голдшмидта, А. А. Саукова, А. П. Виноградова, В. В. Щербины и многих других совет-



Сведения о физическом строении Земли

Наименование		Масса по отношению к Земле, %	Линейный размер по радиусу Земли, км	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Давление, кг/см <sup>2</sup>	Температура, °С	Состав	
Ядро		32,3	3500	13,5—17,0 до 9,4—10,0	3,6—1,4 млн.	5000—4700	Либо железо-никелевый, либо металлизированный силикатный	
Мантия	Нижняя		2830	1900	5,7—4,7	1,4—0,4 млн.	От 4700	Силикатный, вероятно претерпевший фазовые превращения
	Верхняя	Нижний слой		565	4,7—3,6	0,4—0,1 млн.		
		Верхний слой		365	3,6—3,3	100—п. 10 тыс.	Вверху — ультраосновные породы	
Кора	Нижний слой		42	21	3,1—3,0	10 тыс. до нормального	1700 — до нормального	Породы типа базальта и габбро
	Верхний слой			21	2,79			В основном гранитоидные породы
Гидросфера		0,02	Средняя 3,8	1,03	400— до нормального	0—25	76,4% — морские и океанические воды	
Атмосфера		10 <sup>-6</sup>	Не менее 1000	В нижнем слое 0,0012	Доля единиц — до нормального	Минусовая, нормальная	Смесь азота, кислорода и других газов	
Биосфера		Гетерогенная оболочка ничтожной массы, захватывающая всю гидросферу и частично лито- и атмосферу						

Примечание. Разделом между корой и мантией служит граница Мохоровичича, между верхним и нижним слоями коры — граница Конрада.

Сведения о химическом составе геосферы

Наименование		Масса по отношению к Земле, %	Элементы геосферы				
			главные			второстепенные	
			Количество	Наименование	Сумма кларков, ат. %	Количество	Сумма кларков, вес. %
Верхняя мантия	Нижний горизонт	~13,0	8	O, Fe, Si, Mg, S, Ca, Ni, Al	97,05	84	2,95
	Верхний горизонт	~8,0	6	O, Mg, Si, Fe, Al, Ca	98,23	86	1,83
Кора	Базальтовый слой	~0,48	7	O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na	97,98	85	2,54
	Гранитный слой		8	O, Si, Al, Ca, Na, K, Mg, Fe	98,69	84	1,31
Гидросфера		~0,02	5	O, H, Cl, Na, Mg	99,80	87	0,22
Атмосфера		Ничтожная	3	N, O, Ar	99,80	89	0,20
Биосфера		"	11	C, O, N, H, Ca, S, P, Na, K, Cl, Mg	99,69	81	0,31

ских и иностранных геохимиков, так что в настоящее время они могут считаться общепринятыми. Эти выводы следующие.

1. При использовании надлежащих средств и методов исследования в любой пробе геологического образования всегда устанавливается присутствие 92 естественных элементов периодической системы Д. И. Менделеева в свойственных этим элементам содержаниях. Считаем, что созданные на основе обработки громадного количества подобных геохимических проб таблицы средних содержаний элементов (таблицы кларков элементов по геосферам) практически верно отражают реальные содержания элементов в геосферах. Таким образом, эти таблицы одновременно могут служить неоспоримым фактическим доказательством повсеместного рассеянного распространения всех элементов в природе — геохимической особенности в ранге основного закона. Уместно было бы присвоить этому закону имя его основоположников — Ф. Кларка и В. И. Вернадского.

2. Средние содержания отдельных элементов (их кларки) в геосферах крайне неравномерные. Ограниченное меньшинство элементов практически целиком слагает массу соответствующей геосферы, подавляющее их большинство, включая все главней-

шие рудообразующие, присутствуют в тех же геосферах в совершенно ничтожных содержаниях, определяемых тысячными, десятитысячными и еще меньшими долями весовых процентов.

3. Приведенные данные, равно как опубликованные более детальные материалы по химизму геосфер, не содержат никаких указаний на то, что где-либо в недрах Земли — в коре или в верхней мантии, а тем более в водной или воздушной оболочках, имеются обогащенные металлами источники, которые можно было бы уподобить «рудным магмам». Более того, содержания многих рудных элементов (Pb, Zn, Sn, W, Mo, U, Th и др.) в мантии ниже содержаний в коре. Лишь в ядре можно предполагать значительное обогащение железом и никелем, на что указывают и данные изучения метеоритов.

4. Возникновение всеобщего рассеяния относится к космическому этапу развития Земли.

Верхний гранитоидный этаж литосферы является основной кладовой, откуда человек черпает минеральные ресурсы. Поэтому главное внимание уделяется именно этому этажу. Повседневный геолого-геохимический опыт учит, что химические элементы в Земле проявляются или в явной форме, в виде собственных минералов, т. е. в определенных природных химических соединениях, подчиняющихся стехиометрическим отношениям и обычно окристаллизованных, или же в неявном скрытом виде тех или иных примесей в минералах чуждого состава. Первый вид существования мы называем минеральным, второй — безминеральным. В табл. 3 приведены сведения по этим видам существования элементов в изверженных породах, составляющих, как указано выше, 95% массы литосферы [92].

Таблица 3

Сведения об элементах в изверженных горных породах

Преобладающие в минеральном виде	Одинаково в минеральном и безминеральном виде	Преобладающие в безминеральном виде
O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg (99% от суммы кларков) H, C (90% от суммы кларков) в главных породообразующих минералах (силикатах, окислах, магматических карбонатах); Ti, P, S, Zr (90% от суммы кларков) в распространенных акцессориях (ильмените, рутиле, сфене, апатите, магматических сульфидах, цирконе соответственно)	Cr, Y, La, Ce, F, Cl, Cu, Ni, Os, Ir, Pt (50% от суммы кларков) в соответствующих акцессориях (хромите, пикотите, алланите, монаците, ксенотиме, гадолините, апатитах, магматических сульфидах, сысертските, невьянските, поликсене). Остальная масса элементов — в форме различных примесей в минералах чуждого состава	Mn, Li, Be, B, Nb, Ta, Th, TR (без La, Ce, Pm), Rb, Cs, Zn, Pb, Sn, Mo, W, U, Co, Hg, Ag, Au, As, Sb, Bi, Se, Te, Sr, Ba, V, Ge, Sc, Tl, Cd, Ga, Hf, In, Re, Ru, Rh, Pd, Br, I, N, Ar, He, Ne, Kr, Xe, короткоживущие актиноиды (100% от суммы кларков)

Поведение элементов в осадочных образованиях несущественно отличается от поведения их в изверженных. Осадочные породы в литосфере составляют меньшинство по массе (5,0 вес. %). Поэтому сказанное в табл. 3 можно распространить на литосферу в целом.

Расчеты показывают, что в безминеральном состоянии в литосфере находится всего 1,3—1,4% от всей ее массы. Однако эта цифра (мала по абсолютному значению) во много раз превышает кларки большинства отдельно взятых элементов, особенно малых рудообразующих.

## § 2. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ РУДООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛИТОСФЕРЕ

Под рудообразующими мы понимаем группу элементов, обязательно участвующих в образовании рудных и жильных минералов, слагающих руды. Конкретно к этой группе относятся Cu, Pb, Zn, Sn, W, Mo, U, Th, Ni, Co, As, Sb, Ta, Nb, Ag, Au, Hg, S, Se, Te, В, принадлежащие к группе основных породообразующих, Al, Fe, а также некоторые другие элементы. Всего к этой группе относится 21—25 элементов. Содержания (кларки) подавляющего числа этих элементов в породах литосферы (за исключением Al и Fe) по абсолютным значениям ничтожные и заключены в пределах от  $5,0 \cdot 10^{-7}\%$  (для золота) до  $5,2 \cdot 10^{-2}\%$  (для серы). Суммарное содержание в литосфере 10 промышленно важных элементов (Cu, Zn, Pb, Sn, W, Mo, Ni, Co, U, Th) составляет всего  $3,31 \cdot 10^{-2}$  вес. %. Как указано в табл. 3, рудообразующие элементы в породах литосферы существуют преимущественно в безминеральном виде, в формах тех или иных примесей (изоморфных, неизоформных, растворов в жидкой фазе пород, сорбентов на гранях и ребрах кристаллов, в квазигазообразной фазе и т. п.) в породообразующих минералах.

Для рудообразующих элементов в породах характерно повсеместное рассеянное состояние с однообразно низкими содержаниями (кларками); в этом состоянии находится подавляющая часть их массы, находящейся в литосфере. Интересно подчеркнуть, что хотя безминеральное рассеяние (в малой степени) охватывает и главные минерализаторы (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg), оно является основным для 84 «малых» элементов, включающих в себя и все рудообразующие. Принимая во внимание атомные кларковые соотношения упомянутых групп элементов и их обычные проявления в природе, можно говорить о преимущественно безминеральном рассеянии 84 «малых» элементов, и среди них всех рудообразующих, внутри минерального 8-элементного остова литосферы. Характеристика масштабов рассеяния рудообразующих элементов в породах видна из табл. 4, в которой даны «запасы» отдельных промышленно важных элементов, сосредоточенные в  $1 \text{ км}^3$  усредненной литосферы. Сред-

Средние запасы рудообразующих элементов, рассеянных в 1 км<sup>3</sup> усредненной литосферы

Металл	Кларк литосферы [15], вес. %	Запас в 1 км <sup>3</sup> литосферы, 10 <sup>3</sup> т	Размер месторождения по запасам
Железо	5	142·10 <sup>3</sup>	Среднее
Медь	1·10 <sup>-2</sup>	279	"
Свинец	1,6·10 <sup>-3</sup>	45	Мелкое
Цинк	5·10 <sup>-3</sup>	140	"
Никель	8·10 <sup>-3</sup>	224	Среднее
Кобальт	3·10 <sup>-3</sup>	83,5	Уникальное
Олово	4·10 <sup>-3</sup>	112	Крупное
Вольфрам	1·10 <sup>-4</sup>	2,8	Мелкое
Молибден	3·10 <sup>-4</sup>	8,4	"

Примечание. Масса 1 км<sup>3</sup> литосферы принята 2,79·10<sup>9</sup> т.

ние содержания элементов в геосфере взяты из работы А. П. Виноградова [15].

Однако не из этих обширных запасов рассеянных металлов человечество удовлетворяет свои потребности, что экономически крайне невыгодно. Для этого служат возникшие в литосфере природные концентрации металлов (рудные месторождения). Эти месторождения образовались разнообразными путями магматогенной, осадочной или вулканогенно-осадочной и метаморфогенной природы, притом в разное время и в разных точках земного шара.

Характернейшей особенностью месторождений являются повышенные (против кларков) содержания рудных элементов. По предложению А. Е. Ферсмана в геологической практике укоренилось понятие «кларк концентрации». Под этим понимается отношение содержания данного элемента в данном геологическом материале к региональному или местному кларку того же элемента в том же материале. Кларк концентрации — это содержание элемента, выраженное через его кларк. Этим термином мы будем очень широко пользоваться.

Наиболее характерными примерами природных концентраций являются месторождения рудных полезных ископаемых, в которых кларки концентрации для большинства мало распространенных металлических элементов достигают очень больших значений: для месторождений олова, сурьмы, золота кларки концентрации достигают значений десятков — сотен тысяч, для кремния (в кварцевых жилах) кларк концентрации 1,6, для алюминия в бокситах 4, для железа 14—15 и т. д.

В табл. 5, заимствованной у В. И. Красникова [42], приведены содержания в коренных промышленных месторождениях 11 металлов.

Таблица 5

Содержания металлов в современных промышленных месторождениях

Металлы	Кларк литосферы [15], вес. %	Содержание в промышленных рудах, вес. %				
		богатых	рядовых	бедных	кларки концентраций округленно	
Железо	5	До 62,0	36—50	При обогащении до 25,0	5—12	
Медь	$1 \cdot 10^{-2}$	3,0	1—3	0,5—1,0	5—300	
Свинец	$1,6 \cdot 10^{-3}$	5,0	2—5	1—2	625—3100	
Цинк	$5 \cdot 10^{-3}$	—	4	—	800	
Никель	$8 \cdot 10^{-3}$	3,0	1—3	0,5—1,0	60—375	
Кобальт	$3 \cdot 10^{-3}$	<i>n</i>	$n \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10^{-2}$	<i>n</i> ( $10^1 \div 10^3$ )	
Олово	$4 \cdot 10^{-3}$	жилы	5,0	1—5	0,2—1,0	25—1250
		штокверки	0,5	0,2—0,5	0,1—0,2	
Вольфрам	$1 \cdot 10^{-4}$	жилы	<i>n</i>	0,4—0,8	0,15—0,4	800— <i>n</i> · 10 <sup>3</sup>
		штокверки	0,4	0,15—0,4	0,08—0,15	
Молибден	$3 \cdot 10^{-4}$	жилы	<i>n</i>	0,5—1,0	0,1—0,5	170— <i>n</i> · 10 <sup>3</sup>
		штокверки	0,3	0,1—0,3	0,05—0,1	
Ртуть	$7 \cdot 10^{-6}$		0,5		$7 \cdot 10^4$	
Золото	$5 \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}$	$n$ ( $10^3 \div 10^1$ )	

Приведенные сведения позволяют рассматривать рудные месторождения как достаточно контрастные положительные геохимические аномалии, редко разбросанные по сравнительно спокойному полю всеобщего рассеяния.

Другой характерной особенностью месторождений является исключительный минеральный вид существования элементов. В условиях формирования месторождений, особенно с участием горячей воды (гидротермальных), все рудообразующие элементы способны создавать множество собственных минералов, правда, различной практической значимости. По Н. А. Смольянинову [76], А. Г. Бетехтину [7] и Э. С. Дана [28], насчитывается: у меди и свинца минимум по 160, у никеля не менее 40, у цинка не менее 60, промышленные же у меди 3, у свинца 1, у никеля 1, у цинка 1 минерал. Все эти минералы в большинстве принадлежат к классам элементов, сульфидов, селенидов, теллуридов, антимонидов, арсенидов и других подразделений, составляющих в общей сумме ~1,3 вес. % от верхнего этажа литосферы.

Не менее важной промышленной характеристикой месторождений служит масштаб запасов. В табл. 6, заимствованной

## Классификация промышленных месторождений по их запасам

Металлы	Рудопро- явления. запасы, т	Промышленные месторождения, запасы, т			
		мелкие	средние	крупные	уникальные
Железо	Милли- оны	Десятки миллион- ов	Сотни миллионов	Милли- арды	Десятки миллиардов
Медь, свинец, цинк, никель	Тысячи	Десятки тысяч	Сотни тысяч	Милли- оны	Десятки миллионов
Олово, вольфрам, мо- либден, сурьма, ва- надий, цирконий, литий, ниобий и др.	Сотни	Тысячи	Десятки тысяч	Сотни тысяч	Миллионы
Уран, торий, ртуть, бериллий	Десятки	Сотни	Тысячи	Десятки тысяч	Сотни тысяч
Тантал, серебро, вис- мут, кобальт и дру- гие в собственных рудах	Единицы	Десятки	Сотни	Тысячи	Десятки тысяч
Золото, платина	Тысяч- ные доли	Десятые доли	Единицы	Десятки	Сотни

у В. И. Красникова [42], приведена классификация рудных месторождений.

Неуклонный рост спроса на металлы и все время совершенствующаяся технология извлечения металлов из руд в своей совокупности определяют все возрастающую добычу металлов из недр при неуклонном снижении содержания металлов в рудах. Особенно же показательными в указанном направлении являются цифры, касающиеся мировых данных (без данных по СССР) по меди (табл. 7).

Дополнительно можно привести данные по олову. Так, согласно бюллетеню НТИ [54], начиная с 1905 г. в Боливии наблюдается рост суммарной добычи олова из недр с одновременным снижением содержания его в руде: 12% в 1905 г., 6,0—4,0% в 1924 г., 1,8—0,7% в 1960 г. Там же наблюдается рост запасов при одновременном снижении содержания в рудах:

Средневзвешенное содержание олова в рудах, вес. %	5,3	2,11	1,62	0,86
Относительные запасы олова, %	0,9	13,5	33,5	52,1

Интересен вопрос количественных соотношений масс металлов, сосредоточенных в месторождениях и рассеянных в породах. В 1927 г. В. И. Вернадский [14] обратил внимание на грандиозность масштабов рассеяния и указал, что для некоторых элементов (например, радиоактивных) практически все 100%

Таблица 7

Добыча меди (по данным Р. Аранга [1]) и содержание ее [71] в добытых рудах (один средний год)

Показатели	1881—	1891—	1901—	1911—	1921—	1931—	1941—	1951—
	—1890	—1900	—1910	—1920	—1930	—1940	—1950	—1960
Среднегодовое извлечение меди, тыс. т	250,0	381,5	696,0	1127,2	1351,3	1634,9	2384,5	3104,3
Среднее содержание меди, %	5,2	3,8	2,06	1,64	1,49	—	—	0,9*

\* Ориентировочное значение.

земной массы находятся в этом состоянии. А. Е. Ферсман [80] утверждал о превалировании рассеяния над концентрациями для более широкого круга элементов. А. А. Сауков говорит: «...суммарное количество различных ценных элементов (олова, свинца, цинка, золота, ртути и т. д.) в горных породах во много раз больше, чем в рудных месторождениях» [64, с. 283]. «Подсчеты показывают, что в месторождениях заключено лишь 0,02% ртути. Около 99,98% атомов ртути находится в состоянии крайнего рассеяния, по преимуществу в горных породах, где содержание ртути измеряется миллионными долями процента» [64, с. 355]. Более подробно сведения по 11 промышленно важным элементам приведены в табл. 8.

Таблица 8

Соотношение запасов, сконцентрированных в месторождениях и рассеянных в породах

Металл	Запас металла в земной коре под материками, т		Степень концентрации в месторождениях, %
	рассеянного в породах	концентрированного в месторождениях	
Железо	$2,1 \cdot 10^{16}$	$4,3 \cdot 10^{12}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
Медь	$4,2 \cdot 10^{13}$	$18,2 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Свинец	$6,7 \cdot 10^{12}$	$10,2 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Цинк	$2,1 \cdot 10^{13}$	$11,6 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^{-2}$
Никель	$3,3 \cdot 10^{13}$	$0,6 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Кобальт	$1,2 \cdot 10^{13}$	$52,5 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
Олово	$1,7 \cdot 10^{13}$	$0,5 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{-3}$
Вольфрам	$4,2 \cdot 10^{11}$	$0,1 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Молибден	$1,2 \cdot 10^{12}$	$0,1 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^{-3}$
Ртуть	$2,9 \cdot 10^{10}$	$37 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^{-1}$
Золото	$2,1 \cdot 10^9$	$3,15 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Среднее арифметическое			$5,3 \cdot 10^{-2}$



При подсчете запасов, находящихся в рассеянном состоянии в породах, принимается:

- а) площадь материков — 149 млн. км<sup>2</sup>;
- б) мощность верхнего слоя коры — 1 км;
- в) плотность коры — 2,79 г/см<sup>3</sup>.

Запасы металлов, сконцентрированные в месторождениях, взяты из книги Н. И. Сафронова [68].

Итак, сведения о запасах позволили определить степень глобальной концентрации 11 расчетных промышленных металлов, которые оказались в пределах от 10<sup>-4</sup> до 10<sup>-1</sup>% (в среднем по всем металлам 5,3·10<sup>-2</sup>%) от рассеянных в породах.

Если учесть запасы, сосредоточенные в забалансовых рудах, в ореолах и потоках вторичного рассеяния, которые ориентировочно равны запасам учтенных руд, то средняя степень концентрации должна быть удвоена и оценена 0,1%, что является крайне малой цифрой. Запасы, находящиеся в рассеянном состоянии, столь велики, что могут служить резервом для многократного увеличения глобальных запасов промышленных руд.

### **§ 3. ГЕНЕТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ВСЕОБЩИМ РАССЕЯНИЕМ РУДООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ГЛУБИНЫМИ КОНЦЕНТРАЦИЯМИ**

В § 2 показано, что рудообразующие элементы в природе находятся в двух состояниях: в виде всеобщего первичного рассеяния и локальных концентраций — рудных месторождений. Возникает естественный вопрос: находятся ли эти два вида — прежде всего рассеяние и глубинные рудные месторождения — в каких-либо генетических взаимоотношениях, и если да, то в каких именно? Надо признать, что это кардинальный вопрос рудообразования, и как он будет решен, какие по нему будут приняты предположения и предпосылки, зависят и характер дальнейших решений, и степень универсальности. В этих целях прежде всего заметим, что какими бы по происхождению ни являлись рудные месторождения, все они, судя по наблюдаемым геологическим условиям залегания, в частности по взаимоотношениям с вмещающими и окружающими их горными породами, образовались позже того, как консолидировалась литосфера в целом, с присущим ей внутренним первично-конституциональным запасом рассеянных рудообразующих элементов. Особенно отчетливо это проявляется для всех эпигенетических, в том числе для постмагматических месторождений, которые и получили отсюда свое общее название, хотя в широком смысле слова такое положение, бесспорно, относится ко всем без исключения месторождениям. В результате вопрос о временных соотношениях литосферы с рудными месторождениями решается совершенно определенно: месторождения в целом образовались

позже литосферы (и первично-конституционального рассеяния рудообразующих элементов в ней).

При подобном положении можно высказать два предположения о том, как образовались рудные месторождения: внедрение в литосферу глубинной рудной «магмы» или последующее концентрирование рудообразующего вещества, первоначально рассеянного в породах коры (и в мантии).

Первое предположение не находит каких-либо геохимических подтверждений. Если бы оно было верно, то многочисленные геохимические исследования самой коры, верха мантии планеты, метеоритов должны были бы принести хоть какие-нибудь свидетельства в пользу существования в недрах готовых рудных «магм», хотя бы подобных железо-никелевым метеоритам, свидетельствующим о возможном нахождении в недрах Земли консолидированных источников этих элементов. Однако ничего подобного для большинства металлов — меди, свинца, цинка, олова, вольфрама, молибдена и т. п. — не установлено. Кроме того, по крайней мере по отношению к коре такое предположение противоречит высказываниям А. А. Саукова [64] о результатах переплавления. В конечном итоге все имеющиеся материалы свидетельствуют о начальном рассеянии всех рудообразующих элементов и, таким образом, подтверждают второе предположение. Эта точка зрения на генетические взаимоотношения рассеяния и глубинных рудных концентраций — месторождений — принята в настоящее время всеми советскими и зарубежными геологами.

По мнению акад. В. И. Смирнова [21, 74], источником минеральных веществ — рудообразующих элементов — являются ювенильные и палингенные магмы, рассеянные элементы в боковых породах. Ювенильные являются производными первичной подкоровой базальтоидной магмы и служат в качестве источников рудообразующих элементов (железа, титана, ванадия, хрома, никеля, меди и платиноидов) магматических месторождений перидотитовой и габбровой формаций. Палингенные магмы (обычно кислого состава) возникают при переплавлении нижней части осадочной оболочки Земли и внедряются в верхние этажи этой оболочки, давая начало гранитоидным интрузиям. Типоморфными металлами месторождений гранитной группы являются олово, вольфрам, бериллий, литий, ниобий, тантал. Рудообразующие элементы, повсеместно рассеянные, поступают в месторождения за счет контаминации магмы и выщелачивания их постмагматическими продуктами при глубинной внутрисферной циркуляции.

Я. Н. Белевцев и другие [5] считают, что источниками для образования различных типов эндогенных месторождений служат породы земной коры и подкоровой зоны. Способы извлечения и переноса рудообразующих веществ были различными для подкоровых зон (базальтоидные магмы, рудоносные флюиды) и

земной коры (динамотермальный метаморфизм, ультраметаморфизм, гранитизация, фильтрация через породы химически активных гидротермальных растворов).

Л. Н. Овчинников [21], так же как и сторонники прямой связи магмы и рудообразования (Л. Делонэ, К. И. Богданович, Д. Линдгрэн, Д. Эммонс, В. А. Обручев, С. С. Смирнов и другие), очень ясно и определенно высказался о плутогенных гидротермальных месторождениях салического ряда, связанных с гранитной магмой.

1. Салические гидротермальные плутонические месторождения порождаются гранитным магматизмом. Геологические условия образования и размещения подобных месторождений свидетельствуют о том, что процесс формирования этих месторождений мог идти только по схеме: внедрение гранитного расплава → отделение рудообразующего раствора → движение рудообразующего раствора вверх → отложение.

2. Образование салических гидротермальных месторождений — это процесс концентрации металлов, находящихся в рассеянном состоянии. Поставщиком металлов для этих месторождений служит непосредственно сам магматический очаг, магма, порождающая рудообразующие растворы.

Точка зрения американских геологов лишь в деталях отличается от таковой советских исследователей. Так, К. Краускопф [44], рассматривая вопросы: где находится первичный источник металлов, в каком первичном веществе с низким содержанием металла возникает рудообразующий агент, что это за агент, каким образом он собирает в себе те элементы, которые он отлагает в концентрированном виде в рудных месторождениях, отмечает следующее.

1. За конечный источник металлов обычно принимается какая-либо горная порода, почва, осадок или магма, в которых данные металлы достаточно широко распространены в рассеянном состоянии. Очень часто источником металлов считается магма, из которой образуются обычные интрузивные породы, прежде всего кислого ряда. Мантия может служить первичным источником металлов, однако в настоящее время наиболее разумным следует считать предположение, согласно которому основной источник металлов рудных месторождений находится в земной коре, миграция отдельных металлов из мантии если и была возможна, то в самых незначительных масштабах.

2. В качестве агента рудообразования для месторождений, связанных с массивами основных пород, выступает сегрегация. Для гидротермальных месторождений, сопровождающих гранитоидный магматизм, в качестве рудообразующего агента являются постмагматические флюиды и нагретые воды различного происхождения (магматического, метаморфического, реликтового, метеорного).

3. Вероятным механизмом образования рудообразующего агента гидротермальных месторождений и эффективной концентрации металлов в нем К. Краускопф считает дифференциацию веществ, сопровождающую кристаллизацию (кислых гранитоидных) магм. Роль вулканизма в образовании рудоносных растворов не ясна, хотя генетическая связь не отрицается.

В качестве обобщения заметим, что по наблюдениям геологов на всем земном шаре устанавливаются: 1) территориальная близость большинства рудных месторождений к массивам изверженных пород; 2) выборочная приуроченность месторождений определенных металлов к определенным семействам магматических пород; 3) первично-зональное, закономерно-универсальное расположение многих гидротермальных месторождений вокруг определенных массивов изверженных пород, 4) частая тесная связь месторождений с дайковыми сериями, а последних с интрузивами, 5) геохимическая общность рудных месторождений с определенными сериями изверженных горных пород и др. Это обобщение совершенно справедливо рассматривается как естественное доказательство прямой генетической связи родоначальных магматических очагов и постмагматических месторождений. Это обобщение можно привлечь в качестве доказательства такой же прямой связи между рассеянием рудообразующих элементов в магме (поскольку иного вида состояния их в магме и быть не может) и постмагматическими — гидротермальными месторождениями.

Итак, все фактические геологические и геохимические материалы позволяют для дальнейшего принять положение, что между рассеянием и глубинными концентрациями рудообразующих элементов имеется прямая генетическая связь. Глубинные концентрации являются вторичными и образуются за счет концентрирования первоначально существовавшего всеобщего рассеяния рудообразующих элементов в тех или иных геологических образованиях, и прежде всего в родоначальных магмах.

#### **§ 4. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ КЛАСС ГЛУБИННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКА**

Основное назначение работы — это выявление количественных взаимоотношений между запасами какого-либо металла в его месторождениях и содержаниями этого металла в рудах. Подобную задачу трудно решить без знания источников рудообразующих элементов, условий извлечения, переноса и отложения рудообразующего вещества, характеристик исходных, промежуточных и конечных продуктов и т. п. В то же время существует много различных серий и групп глубинных рудных месторождений, и естественно думать, что и условия образования их не одинаковы. Поэтому прежде всего необходимо выбрать какую-то одну серию и группу глубинных рудных месторождений и все

остальное решать применительно к сделанному выбору. Выбор этот должен быть максимально универсальным.

Нет сомнений, что исходной для всего последующего является серия магматогенных месторождений, включающая в свой состав месторождения наиболее широкого круга элементов. Выбор этой серии в качестве опорной вполне обоснован. Однако магматогенные месторождения по условиям своего образования достаточно многообразны. В дальнейшем полезно сузить выбор, ограничив его группой месторождений, во-первых, достаточно важной в научном и в практическом смысле, во-вторых, несущей какие-либо черты, характерные и для других групп рудных месторождений.

При высказанных ограничениях есть полное основание из всей серии глубинных магматогенных месторождений остановить выбор на гидротермальных. Действительно, по данным Л. Н. Овчинникова [21], в гидротермальных месторождениях салического ряда, связанных с гранитной магмой, сосредоточено от 40 до 55% мировых запасов вольфрама, меди, свинца, цинка, золота, почти все запасы молибдена,  $\frac{3}{4}$  запасов коренных месторождений олова,  $\frac{1}{5}$  запасов урана и т. п. Эти цифры определяют как промышленную значимость рассматриваемых месторождений, так и относительную масштабность проявлений их в природе. Главный действующий фактор рудообразования — горячая вода, которая является важнейшим компонентом во всех начальных продуктах постмагматической деятельности, не исключая и пегматитовых расплавов, равно как и вулканогенных растворов; вода участвует в процессе осадочного хемогенного рудообразования. Наконец, в гидротермальных месторождениях наиболее отчетливо устанавливается прямая связь с первоначальным рассеянием рудообразующих элементов в родоначальных магмах, принимаемая безоговорочно практически всеми исследователями. В конечном итоге, гидротермальным месторождениям можно приписать в известном отношении центральную роль, поэтому их выбрали в качестве опорных.

Ниже дана сжатая характеристика особенностей подобных образований, основанная на данных В. И. Смирнова [21, 74], В. Н. Котляра [41], Г. К. Хелгесона [81] и других. Эти характеристики используются авторами в дальнейшем.

1. Принимается, что всеобщее рассеяние рудообразующих элементов и их рудные месторождения находятся в прямой связи: рудные месторождения образуются путем концентрирования ранее возникшего рассеяния.

2. Гранитоидные породы и генетически связанные с ними постмагматические кварцевые жилы и месторождения олова, меди, железа, свинца, цинка и других металлов представляют собой совокупность, в свое время находившуюся в едином, взаимосмешанном виде праматериала.

3. В рудные месторождения отщепляется лишь малая часть (по глобальной статистике около 0,05%, по локальным подсчетам не более 10%) от массы рудообразующих элементов, находящихся в родоначальной магме в рассеянии. Вследствие этого вполне допустимо уподобить по химическому составу упомянутый праматериал известным гранитоидным породам.

4. Субстанцией, активно воздействующей на праматериал, в результате чего возникают гидротермальные рудоносные растворы, порождающие постмагматические месторождения, является магматическая вода, тогда как гранитоидные породы образуются из остаточных силикатных расплавов. Существует и более широкий взгляд, согласно которому глубинные гидротермальные месторождения создаются циркулирующими под поверхностью Земли горячими минерализованными газожидкими водными растворами.

5. Вода в упомянутых растворах может иметь различное происхождение: магматическое, метаморфическое или инфильтрационное. Вероятно, реальные гидротермальные растворы являются смешанными, хотя в последние годы большое значение приписывается водам метаморфическим [29, 78]. Авторы придерживаются взгляда о преимущественно магматическом происхождении вод гидротермальных растворов.

6. Магматическая вода находится при средней температуре 700°С и давлении порядка тысяч килограмм-силы на квадратный сантиметр. Вода в подобном состоянии является крайне агрессивной и способна растворять, удерживать и переносить в растворенном виде вещества, по массе значительно превосходящие наблюдаемые в нормальных условиях.

7. Физико-химия гидротермальных растворов имеет свои специфические особенности.

Считается, что основным растворителем является горячая вода с присутствующими в ней минеральными солями и газовыми компонентами. Критическая температуры чистой воды составляет 374°С и растет в зависимости от растворенных веществ (например, для водного 26%-ного раствора поваренной соли она повышается до 700°С). Вследствие этого принимают, что отдельные гидротермы находятся в жидкой фазе.

Конкретным путем возникновения водной фазы и рудоносных гидротерм является дифференциальная кристаллизация полиэлементной, содержащей в себе 92 естественных представителя периодической системы Д. И. Менделеева, существенно силикатной (гранитоидной) магмы. Согласно Т. Барту [4], магма имеет ионное строение. Степень диссоциации ионов в расплавах сравнима со степенью их диссоциации в водных растворах сильных электролитов. Типичными являются катионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , обладающие высокой степенью подвижности; анионами служат главным образом кремнекислородные тетраэдры. Внутри этого общего существенно кремнекислородного расплава рас-

сеяны ионы рудообразующих элементов и находится связанная вода (около 3 вес. %).

При благоприятных условиях (медленное, длительное остывание, спокойная тектоническая обстановка, закономерная кристаллизация и т. п.) рассматриваемый процесс образования гидротерм протекает до конца в две стадии. На первой постепенно охлаждающаяся магма кристаллизуется в соответствии с основной закономерностью [59], согласно которой все вещества, повышающие точку плавления расплава, уходят из него в выпадающие минеральные осадки, а понижающие — вода, галоиды, агенты-минерализаторы, большинство рудообразующих элементов — остаются и накапливаются в жидком остатке. В результате этого и возникает, вероятно, первоначальный многокомпонентный ионный гидротермальный раствор.

На второй стадии (в длительной обстановке высоких температур и давлений) простой ионный расплав В. Пфанна преобразуется в специфический для данного семейства интрузивных пород комплексный, рудоносный гидротермальный раствор, который впоследствии и образует месторождения гидротермального генезиса. Возникающие подобным образом рудоносные комплексные гидротермальные растворы в конце своего формирования в пределах родоначального массива уже несут в себе все необходимое и достаточное для отложения руд.

Химический состав гидротерм (насколько об этом можно судить по косвенным данным, в том числе по лабораторным исследованиям в автоклавах) многокомпонентный и насыщенный: углекислый газ, рудообразующие элементы, хлориды, фториды, бикарбонаты, сульфаты и силикаты щелочных и щелочноземельных металлов, с преобладанием кремнезема, натрия, калия, кальция, магния, хлора. Концентрация растворов высокая 2—16, иногда 40—75% в гидротермальных рапах [34]. Г. К. Хелгесон [81], Р. Гаррелс и Ч. Крайст [20] считают, что гидротермальным растворам присущ ассоциированный характер, ионная сила близка к нулю, поскольку такие сильные электролиты, как HCl, NaCl, KOH и другие в опытах в автоклавах продемонстрировали константу диссоциации всего  $10^{-3}$ — $10^{-4}$ .

Минеральная нагрузка в рудных гидротермах комплексная. Основную роль при этом [81] играют комплексные ионы, образующиеся путем соединения двух или более простых частиц, каждая из которых может существовать самостоятельно. В основе комплексного иона находится центральный, вокруг которого группируются связанные с ним так называемые лиганды, ионы или целые молекулы. В этих условиях растворимость рудообразующих металлов выше, чем в обычной форме, во много раз.

Так, по Г. К. Хелгесону [81], растворимость галенита в хлоридных комплексных растворах обычно 20—100 часть/млн. до 650 часть/млн., в обычных условиях  $(n \div 0, n) \cdot 10^{-3}$  часть/млн.

Такие же растворимости и в таких же условиях отмечает Г. К. Хелгесон по данным других исследователей для цинка, железа, марганца и других металлов. В. С. Кормилицын [40] заметил, что отдельные комплексные ионы содержат в себе до 1000 атомов разнообразных элементов; по опытам в автоклавах при больших  $T$  и  $p$  растворимость комплексов металлов в воде превышает растворимость тех же металлов в простой ионной форме в десятки тысяч — миллионы раз.

Описан ряд комплексов [21] различных металлов, в форме которых предположительно эти металлы переносятся гидротермами. Так, для олова, по В. Л. Барсукову, имеет силу комплекс  $\text{Na}[\text{Sn}(\text{F}, \text{OH})_6]$ , для сурьмы и молибдена, по В. В. Щербине,  $[2\text{Na}_3\text{SbS}_3]$  и  $[\text{Na}_2\text{MoS}_4]$ , для молибдена, по Н. Хитарову,  $\text{Na}_8[\text{Si}(\text{Mo}_2\text{O}_7)_6]$ , по Хелгесону [81], для разных металлов свойственны свои галоидные, преимущественно хлоридные комплексы. Высокие содержания металлов в гидротермах подтверждаются наблюдениями в природе. Так, скважина в Калифорнии вскрыла раствор (гидротермальный?) с содержаниями (г/т на твердую нагрузку): Ag — 2; Cu — 25; Pb — 100; Zn — 700, а также следы В, W, Mo [29]; на дне Красного моря обнаружены выходы горячих вод со столь же богатыми содержаниями металлов [51]; известны концентрированные металлоносные растворы на п-ове Челекен (Каспийское море) и в других местах.

8. Сформировавшиеся гидротермальные растворы отделились от родоначального очага на поздних этапах дифференциальной кристаллизации, когда в твердую фазу отошло от 50 до 93% минеральной нагрузки магматического расплава. Температуры отделения определяются характером магмы, ходом раскристаллизации, для гранитоидных магм 1000—800°С; по Т. Барту [4],  $T \approx 600^\circ\text{C}$ . Давление в этот момент может достигать 4000 кгс/см<sup>2</sup>. Температуры и давления гидротермального рудоотложения — ниже и заключены в пределах 700—25°С при давлении 950—375 кгс/см<sup>2</sup>.

По В. И. Смирнову [74], наиболее обильное гидротермальное рудоотложение происходит в интервале 400—100°С.

9. Процесс отделения протекает, вероятно всего, по схеме, приведенной у Ю. П. Желтова [32], под воздействием внутреннего давления раствора. Эпюра внутреннего давления пород имеет в любой точке эллиптический (а не круговой) вид [32]. При этом длинная ось эпюры направлена вертикально и равна давлению толщи вышележащих пород, а малая — горизонтально и составляет всего 0,3—0,7 (в среднем 0,5) от вертикального давления. Иными словами, боковое давление пород на глубине в каждой точке равняется всего  $\frac{1}{2}$  от вертикального давления вышележащих пород. Поскольку гидротермальный рудоносный раствор в очаге находится под высоким давлением, по меньшей мере равному вертикальному, а по своей природе способен однообразно передавать внутреннее давление во все стороны (а сле-



довательно, и в бока), постольку возникает близкий к вертикальному разрыв вмещающих пород. По этому разрыву и отделяются гидротермы от родоначального очага по направлению снижающегося давления в верхние перекрывающие породы.

Этот подъем будет происходить во все время прямой связи отделяющегося гидротермального столба с очагом, хотя в этом процессе подъема играет свою роль и давление «схлопывания» боковых пород в основании столба у очага. Высота подъема гидротермы над очагом определяется прежде всего устойчивостью комплексов в гидротермальном растворе при понижающихся температуре и давлении по мере продвижения раствора вверх. По данным практики интервал отложения гидротермальных руд по отношению к родоначальному очагу заключен, как правило, в пределах от нуля до многих сотен метров.

10. Согласно Г. К. Хелгесону [81] и многим другим исследователям, придерживающимся взгляда о комплексном строении рудоносных гидротермальных растворов, эти последние способны сколь угодно долго существовать в благоприятных этому условиях высоких  $T$  и  $p$ . Более или менее резкие падения этих параметров, возникающие при переходе раствора в верхние горизонты с пониженными  $T$  и  $p$  или при внезапном адиабатическом расширении на пути следования, вызывают распад комплексов и гидротермы переходят в обычные ионные растворы с возникновением реакционноспособных ионов металлов, силиция, серы, кислорода и т. п. Эти ионы, реагируя между собой, приводят к образованию и выпадению из раствора твердых минеральных ассоциаций, представленных разнообразием жильных и рудных минералов, в первую очередь сульфидов и окислов, которые и образуют собственно рудные тела.

11. Приведенные общие, весьма вероятные, сведения о рудоносности гидротермальных растворов позволяют сформулировать нужные для дальнейшего важные выводы.

Температуры процесса формирования рудоносных гидротерм как на первой, так и на второй стадиях (вплоть до их отделения от очага формирования) меняются в ограниченной степени ( $100^{\circ}\text{C}$ ). Это позволяет считать рассматриваемый процесс изотермическим.

Коэффициенты термодинамической активности, т. е. величины, учитывающие степень отклонения реальных растворов от идеальности для различных молекул в области надкритических температур (более  $374^{\circ}\text{C}$ ), можно считать, по Г. К. Хелгесону, приближающимися к единице; родоначальные гидротермы являются высокоассоциированными, с ионной силой, близкой к нулю. Это позволяет считать гидротермы близкими по своим термодинамическим качествам к идеальным растворам.

Собственно рудоносные комплексные гидротермы формируются на фоне ионных гидротерм В. Пфанна. Как правило, образующиеся на этой стадии комплексные гидротермы должны

быть «засорены» отдельными, внекомплексными ионами. Возможно, окончательно комплексные (нейтральные) соединения очищаются от ионного «мусора» на подъеме гидротермы после ее отделения от очага под воздействием МГДЭ, последний возникает в результате взаимодействия земного магнитного поля и находящихся в движении положительных и отрицательных электрических зарядов ионов.

Возникновение полиминеральных руд, характер и закономерности распределения в них минералов и элементов являются следствием закономерностей, управляющих кристаллизацией многокомпонентных растворов, введенных в кристаллизационную камеру.

Рудная камера освобождается от растворителя (воды), вероятнее всего, путем инфильтрации.

Многокомпонентный зональный ореол с отходом галоидов, являющихся основой комплексов, но не способных к широкому минералообразованию в глубинных условиях, возникает параллельно с формированием рудного тела.

Очаг рудоотложения остывает до температуры (и давления), соответствующей глубине рудоотложения.

### ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ И РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ

В гл. I изложены геолого-геохимические предпосылки к термодинамическим расчетам энергии рудообразования. В гл. II приведены основные сведения из термодинамики и физико-химии, дано определение рудообразующей энергии, перечислены условия и принципы ее расчета, даны схемы расчетов энергии рудообразования единицы объема руды разных кондиций и дифференцированных запасов металлов. Приведены результаты практических расчетов применительно к наиболее интересным металлам, в качестве которых выбраны олово, золото, медь, магнетитовое железо. Кратко изложены основы расчета перспективных запасов руд в месторождениях, образованных системой рудных тел.

#### § 5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕРМОДИНАМИКИ И ФИЗИКО-ХИМИИ

Здесь приведены краткие необходимые сведения по термодинамике, имеющие отношение к используемой терминологии и расчету энергии рудообразования в самом общем случае. Эти сведения взяты из трудов В. А. Киреева [39], А. А. Жуховицкого и Л. А. Шварцмана [33], Р. Керна и Е. А. Вайсброда [38], П. Шамбодала [83], М. П. Вуколовича и И. И. Новикова [18], Л. В. Радужкевича [60] и других.

В основе термодинамики лежат три закона.

*Первое начало* термодинамики соответствует хорошо известному закону сохранения энергии, согласно которому энергия не возникает из ничего и не исчезает бесследно, а только принимает различные виды. Отсюда следует строгая количественная эквивалентность перехода одного качественного вида энергии в другой.

*Второе начало* — есть специфический термодинамический закон, не имеющий аналогов в других областях физики. Оно сводится к утверждению, что самопроизвольные процессы, которые не требуют для своего свершения вмешательства внешней энергии, возможны только в направлении выравнивания фактора интенсивности — температуры, давления, электрического и химического потенциалов и т. п. — для всех частей системы [39]. Об-

ратные процессы требуют для своего свершения затрат внешней энергии.

*Третье начало* утверждает, что при температуре  $T = 0^\circ \text{K}$  теплоемкости тел равны нулю. Это начало не имеет универсального значения (справедливо для большинства неорганических кристаллических веществ), но значение его велико, поскольку можно строго количественно определять абсолютные значения многих параметров, в частности энтропию.

Под термодинамической системой понимается совокупность тел, которая естественно или мысленно выделяется из всего окружающего. Все, что находится за пределами границ системы, относится к внешней среде. По признаку связей с окружающей средой различают следующие системы:

1) изолированные (нет какого-либо обмена веществом или энергией между системой и средой);

2) закрытые (система обменивается со средой только энергией);

3) открытые (система обменивается со средой и веществом и энергией).

Термодинамическими параметрами называются понятия и величины, характеризующие соответствующие свойства тел и систем и их состояния: температура, давление, объем, теплоемкость, концентрация, количество вещества, энтропия и др. Параметры могут быть экстенсивными, когда они зависят от размеров системы или фазы (как, например, объем, количество вещества, энтропия и др.) и при необходимости суммируются, и интенсивными, если параметры от размеров не зависят (температура, давление, теплоемкость и др.) и суммированию не подлежат.

В качестве параметров для описания состояния системы наиболее часто используют температуру  $T$ , давление  $p$  и объем  $V$ . Для идеальных газов параметры  $T$ ,  $p$ , и  $V$  связаны друг с другом уравнением Клайперона — Менделеева, что позволяет однозначно описывать их состояние в расчете на единицу массы:

$$pV = RT, \quad (1)$$

где  $R = C_p - C_v = 1,986 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot ^\circ\text{K}) [8,314 \text{ дж}/(\text{моль} \cdot ^\circ\text{K})]$  — универсальная газовая постоянная;  $C_p$ ,  $C_v$  — теплоемкости для одноатомных газов при постоянном давлении и постоянном объеме, равные соответственно 4,97 и 3,0 кал/(моль·°K);  $T$  — абсолютная температура, °K.

Уравнение идеальных газов сохраняет свою силу для разведенных растворов и большинства реальных газов в областях, далеких от критических состояний. В противном случае необходимо использовать иные уравнения состояния (например, уравнение Ван-дер-Ваальса) или вводить особые параметры — фугитивность (летучесть) и термодинамическую активность  $\gamma$ . Заметим, что часто вместо  $p$  вводится концентрация  $C$ , равная

количественному содержанию изучаемого вещества в единице объема газа или раствора.

В практике соответствующих работ наибольшим распространением пользуется координатная плоскость  $p - V$ , удобная для графического определения важнейших термодинамических процессов. Среди последних выделяют изохорный (при постоянном объеме); изобарный (при постоянном давлении); изотермический (при постоянной температуре); адиабатный (совершается в строгой изоляции рабочей системы от среды). Если тот или иной процесс происходит без трения и необходимы бесконечно малые изменения ведущего переменного параметра, чтобы он пошел в обратном направлении, то такой процесс называется обратимым. В реальности все процессы необратимы.

Энергия есть способность произвести работу [65]. Работа является одной из форм передачи энергии от системы, совершающей работу (берется со знаком минус), к системе, над которой работа выполняется (берется со знаком плюс). Работа любого вида определяется двумя величинами, из которых одна является фактором интенсивности, другая — экстенсивности; например, при расширении (равно как и при сжатии) элементарная работа  $dA$  выражается произведением давления  $p$  (фактор интенсивности) на элементарное изменение объема  $dV$  (фактор экстенсивности):

$$dA = pdV. \quad (2)$$

Интегрируя выражение (2), получаем работу, которая для разных процессов имеет различный вид. В расчете на единицу массы или один моль работа наиболее интересного для дальнейшего изотермического процесса представляется в виде

$$A = RT \ln(V_2/V_1),$$

где  $V_1, V_2$  — начальный и конечный объемы процесса.

В термодинамике три специфические функции: внутренняя энергия, энтальпия и энтропия.

*Внутренняя энергия* — общий запас энергии в системе. В термодинамике внутренняя энергия  $U$  понимается более узко — это часть общей внутренней энергии, которая целиком определяется теплоемкостью при постоянном объеме  $C_V$ , температурой  $T$  и обращается в нуль при  $T = 0^\circ \text{K}$ . В силу этого можно написать

$$U = \int_0^T C_V dT. \quad (3)$$

*Энтальпия*  $H$  — термодинамическая функция, превышающая внутреннюю энергию на величину работы, которую производит тело (система), изменяя свой объем при постоянном давлении, при нагревании от  $0$  до  $T^\circ \text{K}$  (для случая идеального газа от  $V_0 = 0$  при  $T = 0^\circ \text{K}$  и до  $V_T$  при  $T > 0^\circ \text{K}$ ).

Аналогично уравнению (3) можно написать

$$H = \int_0^T C_p dT, \quad (4)$$

где  $C_v$  и  $C_p$  — теплоемкости, являющиеся функциями  $T$ ; эти значения берутся из таблиц.

Для идеальных веществ  $C_v$  и  $C_p = \text{const}$  во всем интервале температур. Если с изменением температуры испытуемое тело (система) претерпевает полиморфные фазовые превращения, т. е. переходит в иную модификацию или в другое физическое состояние (плавится, испаряется, конденсируется и т. п.), то следует учесть скрытую теплоту этих превращений при постоянном объеме (или постоянном давлении) по величине и по знаку.

Внутренняя энергия и энтальпия являются функциями состояния, т. е. переменными параметрами, которые всецело определяются координатами состояния  $T$  и  $p(V)$  при постоянном  $V(p)$  точки наблюдения и не зависят от пути перехода в эту точку,  $U$  и  $H$  — экстенсивные параметры.

*Энтропия* принадлежит к числу важнейших термодинамических функций, прикладное значение которой далеко перешагнуло границы термодинамики. В силу особого значения этой функции для наших целей рассмотрим ее более подробно.

С. Карно предложил идеальный замкнутый цикл работы паровых машин, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Для этого цикла (без потерь тепла и при обратимости процессов) С. Карно вывел выражение для идеального коэффициента полезного действия машины  $\eta$  в виде

$$\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = (T_1 - T_2) / T_1,$$

где  $Q_1$ ,  $T_1$  — количество тепла и температура нагревателя;  $Q_2$ ,  $T_2$  — то же холодильника системы.

Преобразуя это выражение, находим  $Q_1 / T_1 = Q_2 / T_2$ . С. Карно назвал эти величины приведенными теплотами и показал, что для обратимых процессов они равны, а для необратимых — второй член всегда больше первого:

$$Q_1 / T_1 - Q_2 / T_2 < 0.$$

Позднее Р. Клаузиус вернулся к этой проблеме и развил ее далее. Он показал, что для любого замкнутого процесса интеграл, взятый по контуру,

$\oint \frac{dQ}{T} = 0$  — если процесс обратимый,

$\oint \frac{dQ}{T} < 0$  — если процесс необратимый, что повторяет

в дифференциальной форме выражение С. Карно. Р. Клаузиус пошел дальше, заметив, что в природе все процессы необратимы и имеют потери на трение, теплоизлучение, теплопередачу, он распространил этот частный вывод на все природные процессы и назвал функцию

$\oint \frac{dQ}{T}$  — энтропией, что значит односторон-

не меняющаяся. Р. Клаузиус обозначил энтропию буквой  $S$  и показал, что имеет смысл говорить об изменении энтропии при передаче или приеме строго определенных количеств тепла  $\Delta Q$ , когда  $\Delta S = \Delta Q/T$ .

Л. Больцман развил понятие «энтропия». Он показал, что самопроизвольные процессы в природе всегда развиваются так, что принимающие в них участие тела или системы тел переходят из более упорядоченных в менее упорядоченные состояния. Число способов удовлетворения заданных состояний он обозначил через  $W$  и назвал термодинамической вероятностью (процесса, состояния). Термодинамическая вероятность  $W > 1$  в подавляющем числе случаев выражается громадными цифрами. Так, согласно Я. В. Зельдовичу и А. Д. Мышкису [35], для 1 л кислорода при нормальном давлении и при  $T = 273^\circ \text{K}$ , число всех квантовых состояний молекул  $W \approx 10^{10^{24}}$ . В самопроизвольных процессах термодинамическая вероятность растет. Поскольку энтропия  $S$  в подобных условиях ведет себя аналогичным образом (также растет), то Л. Больцман сделал предположение о родственности упомянутых параметров и вывел математическую зависимость между  $S$  и  $W$  в виде

$$\left. \begin{aligned} S &= k \ln W; \\ W &= e^{S/k}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/°К.

Формулы (5), во-первых, позволяют выразить термодинамическую вероятность конечным числом, поскольку энтропия легко рассчитывается. Во-вторых, можно определить математическую вероятность каждого из однородных процессов, взяв отношение термодинамических вероятностей и выбрав термодинамическую вероятность одного из них за начальную. В настоящее время энтропию  $S$  тела или системы определяют как меру неорганизованности или беспорядка в теле (системе).

Как известно, энтропия не измеряемая, а рассчитываемая термодинамическая функция по формуле Р. Клаузиуса:

$$dS = dQ/T, \quad (6)$$

где  $dS$  — дифференциал энтропии;  $dQ$  — дифференциал тепловой энергии, получаемой или теряемой телом (системой);  $T$  — температура в момент теплопередачи (теплоприема), °К.

Тело (система), нагреваясь от нуля до заданной температуры  $T$ , непрерывно получает тепло, определяемое в каждый момент его теплоемкостями  $C_V$  или  $C_p$  в зависимости от процесса нагревания (изохорное или изобарное):

$$\left. \begin{aligned} S_V &= \int_0^T C_V dT/T; \\ S_p &= \int_0^T C_p dT/T. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для идеального газа или для случая, когда вычислены средние  $C_V$  и  $C_p$  для заданного интервала температур, имеем

$$\begin{aligned} S_V &= C_V \int_0^T dT/T = C_V \ln T + S_0; \\ S_p &= C_p \int_0^T dT/T = C_p \ln T + S_0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $S_0$  — энтропия при температуре абсолютного нуля.

Поскольку в области абсолютного нуля  $C_V = C_p = 0$ , то и  $S_0 = 0$ , тогда

$$\begin{aligned} S_V &= C_V \int_0^T dT/T = C_V \ln T; \\ S_p &= C_p \int_0^T dT/T = C_p \ln T, \end{aligned} \quad (9)$$

откуда следует, что энтропия веществ растет с повышением температуры. Если в процессе нагрева имеют место полиморфные превращения, то энтропии этих превращений должны быть вычислены по формуле  $\Delta S = \pm \Delta Q/T$ , где  $\pm \Delta Q$  — теплота превращения, и учтены в окончательном балансе энтропии при заданной температуре. Из приведенного следует, что энтропия является функцией состояния, следовательно

$$\Delta S = S_2 - S_1, \quad (10)$$

где  $S_2, S_1$  — энтропии в конечной и начальной точках процесса.

В то же время, если каждому количеству тепла  $\Delta Q$ , с учетом температуры теплопередачи (теплоприема)  $T$ , можно сопоставить некоторое количество энтропии по формуле (6), то каждому известному приращению энтропии  $\Delta S$  можно сопоставить известное количество тепла:

$$\Delta Q = T \Delta S. \quad (11)$$

Формула (11) имеет большое значение при термодинамических расчетах, особенно при определении затрат внешней энергии на процессы, идущие с уменьшением энтропии. С увеличением энтропии процессы протекают самопроизвольно и затрат энергии со стороны не требуют.

Согласно первому началу термодинамики можем написать

$$\left. \begin{aligned} dQ &= dU + pdV; \\ dQ &= dH + pdV, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $dQ$  — количество тепла, полученное системой;  $dU, dH$  — приращения внутренней энергии и энтальпии системы;  $pdV$  — дифференциал работы, выполненной системой.



Поскольку  $dQ = TdS$ , то  $TdS = dU + pdV$ ;  $TdS = dH + pdV$ , откуда

$$\left. \begin{aligned} dS &= (dU + pdV)/T; \\ dS &= (dH + pdV)/T. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Уравнения (13) представляют собой синтез первого и второго начал и являются основными уравнениями термодинамики. Беря за исходное основное уравнение термодинамики

$$dS = (dU + pdV)/T$$

и заменяя в нем  $dU = C_V dT$ ;  $T = pV/R$ ;  $dT = (pdV + Vdp)/R$ , после подстановок и сокращений получаем

$$dS = C_V dp/p + C_p dV/V.$$

Интегрируя, получаем

$$S = C_V \ln p + C_p \ln V \quad (14)$$

формулу для расчета энтропии идеального газа в любой точке изотермы.

Приведенное выражение дает возможность определить приращение энтропии идеального газа при переходе из одной точки изотермы в другую:

$$\left. \begin{aligned} S_2 &= C_V \ln p_2 + C_p \ln V_2; \\ S_1 &= C_V \ln p_1 + C_p \ln V_1; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$S_2 - S_1 = \Delta S = (C_p - C_V) \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln K.$$

Из уравнений (15) следует, что при изотермическом расширении ( $V_2 > V_1$  и  $V_2/V_1 > 1$ )  $S$  растет и процесс протекает самопроизвольно, не требуя затрат энергии. Наоборот, при изотермическом сжатии ( $V_2 < V_1$  и  $V_2/V_1 < 1$ )  $S$  уменьшается и для процесса необходима затрата энергии:

$$\Delta Q = T\Delta S = TR \ln (V_1/V_2). \quad (16)$$

Это в точности соответствует выражению для работы при изотермическом процессе. Формула (16) имеет важное значение; она полностью справедлива для изолированных и закрытых систем и для процессов как обратимых (теоретических), так и необратимых (практических). Энтропия, подобно другим функциям — внутренней энергии и энтальпии, является экстенсивным параметром.

Приведем несколько важных термодинамических закономерностей, используемых при термодинамических расчетах. Закон Гесса утверждает, что если из данных исходных веществ можно различными путями получить заданные конечные продукты, то независимо от путей получения, т. е. от вида промежуточных реакций, суммарный тепловой эффект для всех путей будет одним

и тем же [39]. Этот закон является вполне строгим для процессов, протекающих при постоянных объеме (тепловой эффект равен приращению внутренней энергии  $\Delta U$ ) или давлению (тепловой эффект равен приращению энтальпии  $\Delta H$ ), и выражает собой термодинамический закон сохранения энергии.

Закон Джоуля, установленный экспериментально, гласит, что идеальный газ расширяется в пустоту изотермически, т. е. без изменения внутренней энергии. Для большинства реальных газов подобное расширение сопровождается падением температуры. Свободная энергия, или функция Гельмгольца, является одним из термодинамических потенциалов:

$$F = U - TS. \quad (17)$$

Аналогичным образом построен другой термодинамический потенциал — свободная энтальпия или функция Гиббса

$$G = H - TS. \quad (18)$$

Обе эти функции являются аддитивными функциями состояния, имеют полные дифференциалы и их приращения при переходе из точки в точку выражаются так:

$$\left. \begin{aligned} \Delta F &= F_2 - F_1 = (U_2 - U_1) - (TS_2 + TS_1); \\ \Delta G &= G_2 - G_1 = (H_2 - H_1) - (TS_2 + TS_1), \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

для изотермического процесса

$$\left. \begin{aligned} \Delta F &= \Delta U - T\Delta S; \\ \Delta G &= \Delta H - T\Delta S. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Выражения (19), (20) используются для определения максимальных работ, выполненных системами при изохорно-изотермических и изобарно-изотермических процессах.

Остановимся на четырех физико-химических вопросах, имеющих значение в геологической области.

*Первый вопрос* об основных закономерностях дифференциальной кристаллизации многокомпонентных растворов (расплавов) изложен по книге В. Пфанна [59] — основоположника не только целого научного направления, но и многочисленных практических работ. При кристаллизации подобных растворов на поверхности затвердевающей фазы концентрация какого-либо компонента примеси обычно иная, нежели в остаточной жидкой фазе. Если примесь понижает температуру плавления жидкой фазы, то ее концентрация в затвердевающей фазе будет меньше, чем в жидкой, а если повышает, то наоборот.

Таким образом, при перемещении фронта кристаллизации одни примеси оттесняются, другие притягиваются (поглощаются). Эти особенности затвердевания растворов хорошо известны. Они составляют основу процесса разделения путем дробной кристаллизации, применяемого уже сотни лет, и лежат в основе предложенной В. Пфанном зонной плавки. В. Пфанн этот про-

цесс осуществил, изучил в лаборатории, нашел коэффициенты распределения той или иной примеси между твердой и жидкой фазами и предложил приемы «зонной плавки» для получения сверхчистых веществ. Тем самым под общее, более интуитивное, высказывание старых геологов о том, что в результате дифференциальной кристаллизации многокомпонентных силикатных расплавов образуется подвижная фаза (флюид), обогащенная водой и агентами-минерализаторами, подведена легко осуществимая опытная база.

*Второй вопрос* касается комплексных химических соединений и изложен согласно Г. К. Хелгесону [81], К. Дею и Д. Селбину [28] и А. А. Гринбергу [26]. Комплексообразование достаточно широко распространено в природе и изучено. При современном уровне знаний химический комплекс — понятие статистическое и представляется как ассоциация двух или более частиц, каждая из которых может существовать независимо. Основу любого комплекса составляет центральное ядро, сложенное катионом. Комплекс может быть одно- и многоядерным, т. е. может иметь один или несколько катионов в ядре комплекса. В большинстве неорганических водных систем почти не наблюдается образования многоядерных комплексов.

Лиганд — термин, относящийся к любому иону, комплексу или молекуле, которые связаны с положительно заряженным центральным катионом. Максимальное число лигандов, которые могут соединяться с катионным ядром, равняется максимальному координационному числу центрального катиона. При одинаковой валентности большинство ионов металла образует наиболее устойчивые комплексы с лигандами, состоящими из легких атомов, таких как N, O или F; при этом, как правило, наблюдаются следующие ряды устойчивости:  $N \gg P > As > Sb$ ;  $O \gg S > Se > Te$ ;  $F \gg Cl > Br > I$ .

Устойчивость комплекса есть функция многих факторов, в том числе диэлектрической постоянной среды, вида и заряда ядра комплекса, его электрической и геометрической симметрии, электронной конфигурации составляющих его атомов, природы их связи и обычно возрастает с уменьшением ионного радиуса, увеличением заряда и электроотрицательности центрального катиона. Повышение температуры благоприятно влияет на устойчивость многих комплексов, повышение давления незначительно (но положительно) влияет на устойчивость комплексов в жидкой фазе при гидротермальных температурах и давлениях.

Имеется большое количество данных, свидетельствующих, что рН гидротермальных растворов мало отличается от нейтрального. Экспериментально показано, что сильно диссоциированные при комнатной температуре кислоты (в большей степени) и основания становятся высокоассоциированными при повышенных надкритических температурах.

Стандартная энтропия ассоциации является наиболее важным фактором, определяющим устойчивость комплекса. Изменение стандартной энтропии при комплексообразовании в водных растворах электролитов обычно положительно. Это связано со значительным нарушением структуры окружающих молекул воды ассоциированными частицами. Положительное изменение энтропии, являющееся результатом дезорганизующего влияния комплекса на окружающие его молекулы, намного превышает отрицательное изменение энтропии, сопровождающее превращение поступательной энергии свободных ионов в колебательную и вращательную энергию комплекса. При данных температуре и давлении энтропия зависит от числа ионов в системе, распределения и нейтрализации зарядов при ассоциации, суммарного изменения количества координированных молекул воды, диэлектрической постоянной растворителя и многих других факторов. Чем больше молекул воды отделяется от координационной сферы во время образования комплекса, тем больше положительная энтропия ассоциации. Стандартная энтропия ассоциации для неорганических комплексов в водных растворах электролитов имеет положительные значения от 0 до 60 кал/(моль·°К).

Комплексообразование давно рассматривается как один из возможных процессов, имеющих важное значение в гидротермальном переносе рудообразующих металлов, наблюдаемом во всех классах постмагматических месторождений. Новые данные все больше свидетельствуют в пользу того, что рудоносные гидротермальные растворы — это слабо диссоциированные комплексные, богатые хлоридами щелочных металлов растворы электролитов, несущие в своем составе главным образом Na и Cl, значительно меньшие количества K и Ca и совсем незначительные содержания  $SO_4$ ,  $CO_3$ ,  $HCO_3$ , Li, Pb и Cs; в них содержатся те или иные количества рудообразующих элементов. Почти не приходится сомневаться, что рудообразующие металлы в гидротермальных растворах в значительной мере связаны в комплексы, однако не вполне ясно, какие лиганды принимают участие в образовании устойчивых комплексов.

Сходство парагенезисов и зональности в распределении сульфидов во многих гидротермальных рудных месторождениях приводит к мысли, что в переносе рудообразующих элементов участвуют лишь определенные типы комплексов. Из того экспериментального факта, что растворимость галенита в горячих ( $300^\circ C$ ) растворах  $NaCl-HCl-H_2O$  велика (250—650 и до нескольких тысяч частей на миллион) и более чем достаточна для образования как низко-, так и высокотемпературных месторождений, следует: наиболее важным лигандом в рассматриваемом случае является хлор; для других металлов и для иных условий роль лигандов будут исполнять остальные члены группы галоидов — фтор, бром, иод и другие.

Подчеркнем одну важную геохимическую особенность. Как известно, десять промышленно важных металлов — Cu, Ni, Zn, Sn, Pb, Co, Mo, W, Th, U — составляют от литосферы  $3,31 \times 10^{-2}$  вес. %, по числу атомов это соответствует  $3,46 \cdot 10^{-3}\%$ . Галоиды составляют по массе  $10,4 \cdot 10^{-2}$  вес. % от литосферы, по числу атомов  $100 \cdot 10^{-3}\%$ , что примерно в 30 раз больше. Правда, значительная доля галоидов отвлекается на соединение с водородом, щелочными и щелочноземельными элементами, однако же далеко не все главные рудообразующие элементы одновременно участвуют в процессе. Все это дает право утверждать, что галогидных лигандов достаточно.

Сам процесс рудообразования связан с распадом комплексов и переходом их в обычный ионный раствор электролитов, наступающий при достижении гидротермой условий с меньшими  $T$  и  $p$ . Возникающие при этом катионы и анионы вступают в реакции между собой, которые и приводят к рудному минералообразованию.

*Третий вопрос* имеет отношение к магнитогидродинамическому эффекту (МГДЭ). Он кратко изложен в соответствии с трудами [18, 46, 86]. Сущность МГДЭ состоит в том, что всякий раз, когда движущийся электролит или ионизированная плазма попадает в постоянное магнитное поле, в электролите (в плазме) наблюдается возникновение электрического тока [перемещение заряженных частиц (ионов)], перпендикулярно к плоскости, включающей в себя вектор скорости движения электролита (плазмы) и магнитного поля. Электрические токи, вызванные потоками положительных и отрицательных частиц, взаимно обратны.

Основные закономерности, управляющие МГДЭ, установлены давно: еще в прошлом столетии над взаимодействием постоянного магнитного поля и движущимся в этом поле электрическим зарядом (положительным или отрицательным), приведшие к установлению силы Х. Лоренца, и исследования А. Ампера над взаимодействием электрических токов друг с другом и с постоянным магнитным полем [65]. В обоих случаях установлено возникновение механических сил, приложенных к электрически заряженным частицам и направленных перпендикулярно к плоскости, вмещающей в себя вектор магнитного поля и направления движения частиц (правило «левой руки»). Указанные взаимодействия давно используются в технике, например в масс-спектрографах, ускорителях элементарных частиц. Однако лишь в самые последние годы начались работы по использованию МГДЭ в энергетических целях.

В сопредельных с физикой областях, например в геофизике, использование МГДЭ для объяснения тех или иных наблюдений находится в самом зачаточном состоянии. В частности, Д. В. Полферов одним из первых для объяснения происхождения крайне дифференцированных пород ультраосновного ряда

использовал МГДЭ. В геофизике и в геологии вообще есть проблемы, для разрешения которых следует использовать этот эффект. Достаточно обратить внимание, что земное магнитное поле всюду существует сейчас и нет оснований отрицать его в прошлом. Любые земные естественно возникающие растворы и расплавы в той или иной степени ионизированы и так или иначе перемещаются. Следовательно, налицо все условия для проявления МГДЭ. Мы рассматриваем МГДЭ как вполне возможный механизм «очистки» комплексного рудообразующего гидротермального раствора от ионизированных частиц на этапах его перемещения в недрах Земли от родоначального очага вплоть до камеры рудоотложения.

*Четвертый вопрос о флуктуациях.* Основные положения вопроса изложены в соответствии с трудами А. А. Жуховицкого и Л. А. Шварцмана [33], Л. В. Радужкевича [60], Ю. Б. Румера и М. Ш. Рывкина [64]. Под флуктуацией понимается способность изолированной или находящейся в термостате системы самопроизвольно выходить из равновесия. Флуктуации установлены в областях распределения молекул (атомов) по плотностям, в расчете на единицу объема, по импульсам, по энергии и т. п. В основе этого явления лежит атомно-молекулярное строение материи и присущее атомам и молекулам собственное движение — тепловое хаотическое (броуновское), вращательное и т. п. Хаотичность движения (при массовом числе носителей этого движения) приводит к возникновению чисто случайных, кратковременно живущих в каждом данном объеме системы, но в своей сумме постоянно существующих в ней отклонений от среднего для всей системы состояния.

Так, равновесию отвечает (при заданной температуре) постоянство плотности газа. Однако в малых областях объема неизбежны флуктуации плотности, отклонения ее от среднего значения. Именно этим объясняется синий цвет неба, поскольку флуктуирующие участки атмосферы с наибольшей силой рассеивают именно синюю составляющую белого солнечного света. Такое же явление флуктуации плотности энергии наблюдается в едином энергетическом очаге. По Л. Больцману, вероятность возникновения флуктуаций и их распределение могут быть найдены по формуле (5).

Крайне интересным и важным является вопрос о внутренней структуре флуктуаций энергии. В этом отношении необходимо рассмотреть две возможности — квантового и неквантового строения. Квантовая структура флуктуации энергии предполагает, что существуют специальные носители энергии и с каждым из них сочетается порция (квант) энергии 1, 2 ... элементарных квантов. Эти кванты способны выполнить только им собственную работу, а продукты этой работы воспримут по наследству и основные квантовые черты породившего их энергетического процесса. Следует подчеркнуть, что наиболее отчетливо

квантовая структура энергии вообще проявляется при изучении во вне, в виде электромагнитной энергии. В то же время при внутренних процессах вероятность ее появления меньше.

При неквантовом (классическом) строении энергетических флуктуаций вполне допустимо принять, особенно с учетом сравнительно небольших температур, которые нас интересуют (около  $1000^{\circ}\text{K}$ ), что флуктуация выражается в увеличении в той или иной степени интенсивности энергии. Такая трактовка флуктуаций принята авторами. При этом дополнительно допускается, что в каждый момент флуктуации данного ранга в общем энергетическом очаге занимают одно положение, тогда как в следующий момент это положение будет иным и подчиняется закономерностям динамического равновесия. Общая же сумма флуктуаций данного ранга в очаге сохраняет свое постоянство.

Вполне допустимо, что структура однотипных излучателей во флуктуации более высокая, чем в среднем по очагу. Например, они могут соединяться в системы наподобие тех, которые создаются при изготовлении батарей из однотипных гальванических элементов и совершать работу большей интенсивности, чем в среднем по очагу, однако эти комбинационные системы тотчас же исчезают в данном месте и возникают в новом, так как флуктуация меняет свое местоположение. Таким образом, в активном энергетическом очаге в целом в каждый момент времени могут совершаться работы разной интенсивности, находящиеся между собой в определенных количественных соотношениях. Это допущение также принято в настоящей работе.

## **§ 6. ЭНЕРГИЯ РУДООБРАЗОВАНИЯ, ГЕОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЕЕ ПРОЯВЛЕНИЯ, ОБОБЩЕННЫЕ УСЛОВИЯ И ПРИНЦИПЫ ЕЕ РАСЧЕТА**

К понятию об энергии рудообразования мы приходим двумя путями. Первый предполагает использование общих закономерностей физики. Так, французский математик Э. Борель [8], разбирая вопрос о вероятности тех или иных случайных событий, приходит к выводу, что некоторым из них совершенно неправомерно приписывать (как это иногда делают) конечную вероятность, а надо прямо говорить о невозможности осуществления, о нулевой вероятности, о невероятности, как прямой противоположности достоверности. В качестве примера подобных невероятных событий он приводит случай самопроизвольного разделения воды и вина после их смешения (рис. 1). Само смешение не требует никакой энергии и происходит самопроизвольно под влиянием самодиффузии; смесь же этих ингредиентов никогда самопроизвольно на чистую воду и чистое вино не разделится. Подвергнув указанную смесь дистилляции, мы сможем разделить ингредиенты, но это потребует затраты энергии и тем боль-

шей, чем сильнее разведено вино водой. Чем больше в смеси воды, тем большее количество тепла (при тепловой возгонке винного спирта) должно быть затрачено попутно на нагрев воды. Это рассуждение справедливо при разделении смесей любых веществ и любой формы.

Как уже отмечалось, литосфера представляет собой твердую смесь, в которой роль «растворителя» может быть приписана 8-элементной минеральной основе, а «растворенного» вещества — совокупности рудообразующих элементов. Самопроизвольная сегрегация «растворенного» вещества, его обособление в виде концентраций (месторождений) рудообразующих элемен-



**Рис. 1. Схема опыта Э. Бореля по смешению воды и вина.**

*I* — красное вино; *2* — смесь воды и вина; *3* — вода. Направление самопроизвольного процесса: *I* — достоверного, *II* — недостоверного.

тов внутри литосферы есть событие невероятное; тем не менее опыт учит, что подобные сегрегации в литосфере существуют. Однако это может иметь место только в результате вмешательства энергии, внешней по отношению к разделяемой смеси.

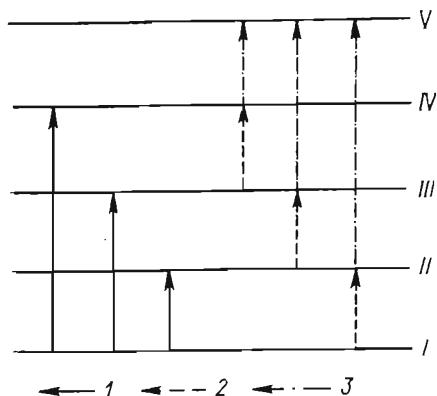
Второй путь — это использование повседневного горно-обогажительного опыта. Он же более нагляден и прост в истолковании. Допустим, что имеется обогатительная фабрика, вырабатывающая стандартизированный концентрат определенной кондиции (например, касситеритовый, со стандартным содержанием по олову 40%). Допустим, что на фабрику поставляются однотипные кварц-касситеритовые руды, но различных содержаниях по олову — богатые, рядовые и бедные, и что они обрабатываются до однотипного концентрата отдельно. Не требуется каких-либо доказательств для утверждения, что изготовление однородного концентрата из руд разных содержаниях потребует на фабрике различных затрат энергии — меньших, если руды богатые, и больших, если руды рядовые или бедные.

При разработке ультрабогатых руд, по содержанию отвечающих концентрату никаких дополнительных затрат энергии на фабрике для доводки руды не потребуется. Рассмотрение энергетической схемы процесса (рис. 2) приводит к заключению: при фабричной обработке богатых руд мы потому тратим энергии меньше, что энергетические издержки, сопровождающие



доработку рядовых и убогих руд до состояния богатых, уже восполнены природой. Таким образом, мы неизбежно приходим к окончательному выводу: процесс образования руд в природе требует природных затрат энергии, притом тем больших, чем богаче руды.

Будем называть природную энергию, в результате воздействия которой внутри и за счет всеобщего рассеяния рудообразующих элементов возникают их концентрации (месторождения), энергией рудообразования. Она проявляется в форме работы сил физической (например, тяготения), химической (на-



**Рис. 2. Энергетическая схема процесса доводки различных руд до стандартного концентрата.**

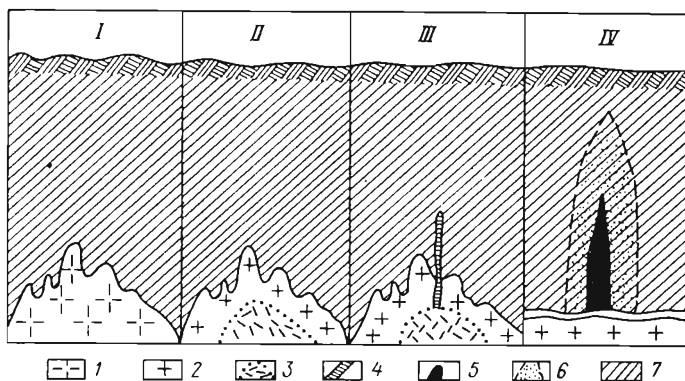
Затраты энергии: 1 — природы на создание руд разных кондиций, 2 — природы на доводку бедной руды до более богатой, 3 — на фабрике при доводке различных руд до концентрата.

Энергетический уровень: I — рассеянного состояния, II — бедных руд, III — рядовых руд, IV — богатых руд, V — стандартного концентрата.

пример, реакций взаимодействия) и физико-химической (например, сорбции, электрохимии) природы, как правило, в их сложном взаимодействии и взаимопроникновении. В частных случаях трудно бывает однозначно установить даже совокупность действовавших агентов рудообразования, но тем не менее неоспоримым должен являться факт их энергетической сущности, ибо в противном случае процессы рудообразования пришлись бы, среди других земных процессов, рассматривать, как противоречащие установленным на Земле законам. Этого же не позволяет сделать весь процесс развития и накопленный опыт.

Итак, процесс рудообразования — есть процесс энергетический, хотя и не всегда детализуемый далее в своих звеньях. Однако последнее обстоятельство не имеет существенного значения, если при изучении процесса рудообразования обратиться к помощи термодинамики, как науки о всеобщих превращениях, видоизменениях и эквивалентности различных видов и форм энергии. Математический аппарат современной термодинамики в сочетании с основными положениями физической химии (при определенных допущениях) позволяет описать количественно процессы рудообразования с энергетической точки зрения. В большинстве случаев для этого оказывается достаточно знать лишь начальные и конечные состояния системы.

Процессы глубинного рудообразования совершаются, как правило, на глубинах и в условиях, которые нам мало известны. Поэтому можно сказать, что рудообразование происходит в «черном ящике», о котором известно, что на входе его находится рассеяние, на выходе — руда различных кондиций, а внутри его действует рудообразующая энергия, причем взаимодействие всех трех компонентов можно трактовать по-разному; какая-то определенность в этом вопросе является весьма полезной и не-



**Рис. 3. Геолого-энергетическая схема гидротермального рудообразования.**

1 — гранитоидная магма; 2 — гранитоидная оболочка; 3 — гидротермальный очаг; 4 — рудоносная гидротерма; 5 — рудное тело; 6 — ореол первичного рассеяния месторождения; 7 — вмещающие породы.  
I—IV — этапы.

обходимой. На рис. 3 приведена геолого-энергетическая схема гидротермального рудообразования, какой она представляется на основании обобщения различных данных. Заметим, что весь процесс гидротермального рудообразования можно разбить на 4 последовательных, взаимосвязанных, но разных по своему влиянию на рудный процесс этапа.

*I этап.* Возникновение бассейна (внедрением, переплавлением и т. п.) кислой магмы. Согласно Т. Барту [4], условия в бассейне (до начала кристаллизации) следующие: глубина от поверхности Земли не менее 4 км; давление не менее 1000 кгс/см<sup>2</sup>; температура не ниже 800°С; химический состав — силикатный, многокомпонентный, ионный расплав, содержащий в себе смеси рудообразующих элементов (в общей сложности около 1,3%) и связанную воду около 3%. Для последующих этапов магматический бассейн является источником воды, рудообразующих элементов и энергии.

*II этап* считается с момента начала кристаллизации магматического бассейна (температура, по Т. Барту [4], около 800°С)

и заканчивается в момент отделения рудоносных гидротермальных растворов от родоначального магматического бассейна (по Т. Барту, температура отделения  $600^{\circ}\text{C}$ ); наиболее вероятная средняя температура этапа  $700^{\circ}\text{C}$ . На этом этапе гидротермальный процесс проходит две стадии.

На *первой стадии* в результате постоянного падения температуры дифференцированно кристаллизуется магма и возникают гранитоидный массив и пфанновский ионный гидротермальный раствор, обогащенный рудообразующими элементами.

На *второй стадии* (дифференцированно кристаллизуется магма) при медленном падении температуры и таком же росте давления в сужающейся гидротермальной камере пфанновский ионный раствор медленно трансформируется в ассоциированное, практически нейтральное комплексное образование.

Первый процесс, разделяя жидкую и твердую фазы, потребляет энергию, сохраняя внутреннюю, запасенную ранее; последний — переход беспорядочного ионного раствора в упорядоченный, комплексный, характеризующийся высокой организацией по своей внутренней структуре, определяемой многоатомными стехиометрическими соединениями рудообразующих элементов, насколько можно судить на основе общих термодинамических соображений, должен обязательно происходить с потреблением внешней (рудообразующей) энергии. Действительно, диссоциированный ионный раствор имеет большую степень свободы (в частности, большую свободу хаотического прямолинейного перемещения ионов), нежели ассоциированный, стехиометрический, хаотические перемещения которого ограничены; следовательно, свободная энергия последнего меньше, чем у родоначального ионного раствора.

Любые табличные данные свидетельствуют, что энтропия сильных электролитов в их кристаллическом ассоциированном состоянии много ниже, чем в воднорастворимом диссоциированном. Известно, что для одного и того же вещества, одних и тех же условий, энтропия уменьшается лишь при вмешательстве внешней энергии. Поскольку процесс образования гидротермального раствора комплексного строения из ионного протекает в ограниченном интервале температур (в среднем при  $700^{\circ}\text{C}$ , с отклонениями не более  $100^{\circ}\text{C}$  в ту или иную сторону), постольку с вполне достаточной степенью вероятности можно уподобить весь этот процесс изотермическому. Для этого же процесса, как следует из теории термодинамики, всякое уменьшение энтропии единственно и возможно лишь за счет потребления энергии.

Ряд исследователей [25, 28, 81] указывает, что итоговые термодинамические параметры комплексных растворов не очень сильно, притом против ожидания в положительную сторону, отличаются от таковых для исходных ионных [положительное приращение энтропии от 0 до  $30\text{--}60$  кал/(моль $\cdot^{\circ}\text{K}$ ); энтальпии

5 ккал/моль]. Однако подобный эффект, связанный с последующим процессом дегидратации ассоциирующихся ионов, оказывается побочным, не связанным с процессом собственно комплексобразования в рудоносной гидротерме. Возрастание энтропии раствора в целом благотворно сказывается на его устойчивости и определяет возможность его дальних перемещений.

*III этап* захватывает промежуток времени от момента отщепления гидротермального раствора от родоначального очага до момента достижения им камеры рудоотложения. На этом этапе гидротермальный раствор непрерывно поднимается от родоначального очага до камеры рудоотложения в условиях непрерывного падения температуры (от 700 в очаге и до температуры начала рудоотложения 400—100°С в камере) и давления (от  $n \cdot 1000$  кгс/см<sup>2</sup> в очаге и нескольких сотен килограмм-силы на квадратный сантиметр в камере). С энергетической точки зрения на этапе потребляется механическая энергия на подъем раствора и теряется внутренняя энергия вследствие неизбежного охлаждения при подъеме. По-видимому, имеет место весьма важный процесс магнитогидродинамического очищения комплексного раствора от остатков ионизированных частиц, в результате чего повышается концентрация комплексных частиц. На это, конечно, расходуется какая-то часть энергии, которую следует учесть.

*IV этап* завершает рудообразование, протекает непосредственно в рудообразующей камере при температурах 400—100°С и давлениях, отвечающих вертикальной координате камеры рудоотложения. На этом этапе в условиях ослабленных температур и давлений комплексный рудоносный раствор распадается и переходит в обычный ионный. Возникшие ионы вступают во взаимодействие между собой, металлические ионы реагируют с кислородом и с серой, образующиеся соединения выпадают в осадок, давая начало рудным и жильным сульфидным и окисным минералам. Растворитель — вода — инфильтруется в боковые породы без остатка, а лиганды (главным образом галоиды, в массе своей не способные к образованию минералов в глубинных условиях) и часть ускользающих от фиксационных реакций собственно рудообразующих элементов мигрируют диффузионным и инфильтрационным путями в боковые породы и дают начало ореолам первичного рассеяния рудных месторождений.

С энергетической точки зрения на рассматриваемом этапе непрерывно расходуется ранее запасенная внутренняя энергия на естественное охлаждение от 700 до 100°С и на образование первичных ореолов рассеяния.

Из вышеприведенного следует, что энергия и материал для рудообразования поступают на первом этапе, а расходуются на втором и частично на третьем. Этапы четвертый и частично третий с точки зрения потребления вещества и энергии рудообра-

зования значения не имеют. На подъем гидротермального рудоносного раствора вверх потребляется чисто механическая энергия, в рассматриваемом случае не имеющая никакого отношения к собственно рудообразованию (магнитогидродинамическая энергия «очистки» должна быть учтена), а ореолы образуются за счет внутренней энергии.

Таким образом, в дальнейшем поставленную нами задачу расчета расходования энергии рудообразования можно решить путем анализа процесса, имеющего место на втором и частично третьем этапах.

Заметим, что наиболее вероятным моментом рождения гидротермального рудообразующего раствора, моментом, определяющим все дальнейшее развитие событий, является преобразование диссоциированного, сравнительно разведенного, ионного гидротермального раствора в ассоциированный, концентрированный, комплексный, собственно рудоносный гидротермальный. Это преобразование, как об этом можно судить, происходит на вполне определенной стадии развития магматического бассейна (на втором и частично на третьем этапах) и требует для своего осуществления затраты энергии, прежде всего на преодоление сил диссоциации, всегда направленных вовне исследуемой системы. Так как все остальные сопровождающие рудообразование процессы идут с выделением энергии, то очевидно, что вся поглощаемая энергия может служить мерой расходования энергии рудообразования на единицу объема (массы и т. п.) руды заданной кондиции. Если эту энергию последовательно рассчитать для руд разных кондиций от самых бедных до богатых, придерживаясь при этом определенных одинаковых условий, изложенных выше, то в итоге можно вывести функциональную зависимость между расходованием энергии рудообразования и содержаниями металлов в рудах. Если далее использовать закономерности, установленные Л. Больцманом для распределения уровней энергии внутри любого энергетического очага, то совсем нетрудно перейти и к функциональной зависимости запасов руд от содержания металла в рудах.

Возвращаясь к расчету расходования энергии рудообразования в зависимости от богатства руд, можно сказать, что если бы мы имели точные, а не общие сведения о существовании и последовательности процессов, происходящих внутри магматического бассейна и завершающихся образованием рудоносного гидротермального раствора, если бы обладали бы знаниями термодинамических параметров веществ, находящихся в рассеянии и в концентрации в виде комплексных растворов, наконец, если бы мы изучили с достаточной полнотой термодинамику разделения многокомпонентных смесей, то энергию рудообразования легко рассчитать, используя приведенный выше термодинамический аппарат. Однако на практике этого нет — геохимическая термодинамика, основной целью которой и должно было бы явиться

теоретическое разрешение перечисленных и других подобных им вопросов, еще ждет своего создания. Для решения поставленной задачи необходимо искать специфические пути. Одним из них может явиться использование косвенных способов расчета, основанных на применении закона Гесса, закона зависимости энтропии от координат  $T$ ,  $p$  и  $V$  точки процесса и других термодинамических закономерностей.

Как известно, сущность закона Гесса состоит в утверждении, что теплохимический эффект реакции, входящий в расчет энергии рудообразования, определяется только характером исходных и конечных продуктов ее и не зависит от промежуточных стадий. В нашем случае исходным материалом оказывается родоначальный гранитоид, правомерность замены которым фактического праматериала (смеси реального гранитоида и рудного вещества) обоснована выше, а конечным — руда заданной тем или иным путем кондиции. При этом предполагается, что процесс реагирования совершается в жидком состоянии при высоких температуре и давлении, описанных выше, соотношение составов, имевших место в ту пору в праматериале, наследуется гранитоидом и рудой. При расчете особые обстоятельства учитываются соответствующими коэффициентами. Подобный подход с использованием закона Гесса обеспечивает получение совершенно необходимых для расчета коэффициентов концентрации  $K$  тех или иных элементов в руде по отношению к родоначальному гранитоиду.

Следующим ограничительным условием является допущение об идеальных свойствах растворов и веществ, участвующих в реакциях, с тем чтобы использовать термодинамические законы идеальных газов, справедливые в полной мере и для разведенных растворов. Это допущение позволяет при энергетических расчетах воспользоваться простейшими термодинамическими соотношениями (например, для определения приращения энтропии). Закономерен вопрос, насколько правомерен и полезен подход к решению сугубо практических задач выявления зависимостей «запасы — содержания» на основе идеализированных представлений? Ответ может быть только утвердительный. Действительно, то обстоятельство, что гидротермальный рудообразующий раствор на самом деле является ассоциированным, с ионной силой, близкой к нулю, с коэффициентом термодинамической активности, близким к единице, — оказывается фактором, сильно сближающим этот раствор с идеальным и позволяющим подчинить его закономерностям идеальных растворов. Исследователи досконально изучили многие принципиально важные вопросы теплотехники на идеальных машинах и с идеальными веществами в качестве рабочих тел. Итак, в конечном итоге все последующие расчеты выполнены с использованием термодинамических закономерностей, управляющих идеальными процессами.

Систему, для которой сделан расчет, можно вполне рассматривать как закрытую, близкую к изолированной, поскольку до отщепления рудоносной, уже «готовой» гидротермы обмена вещества нет, а потерей энергии можно пренебречь.

### § 7. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ, НЕОБХОДИМОЙ НА СОЗДАНИЕ ЕДИНИЦЫ ОБЪЕМА ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ РУДЫ ЗАДАННОЙ КОНДИЦИИ

Вначале конкретизируем условия расчета для высказанных выше положений, предположений и допущений.

1. Средой, в условиях которой протекает главный акт процесса рудообразования — возникновение рудоносного гидротермального раствора, является закрытая многокомпонентная, преимущественно силикатная магма, практически постоянная по температуре ( $\sim 700^\circ\text{C}$ ). Одновременно родоначальную магму можно считать достигшей равновесия, когда каждый компонент имеет максимальную энтропию, которая определяется концентрацией и температурой.

2. Рудоносный гидротермальный раствор возникает в специфическом очаге, внутри родоначальной магмы, в результате ее дифференциальной кристаллизации.

3. Общее количество атомов вещества в единице объема руды или родоначальной породы (гранитоида) табл. 9 сохраняется

Таблица 9

Атомный состав пород и большинства руд

Наименование	Количество молей	
	в 1 дм <sup>3</sup>	по отношению к гранитоидам, %
Гранитоиды	131,3	100,0
Литосфера в целом	135,0	102,5
Диориты	137,8	105,0
Базальты (габбро)	145,4	110,7
Пустые кварцевые жилы	132,0	100,2
Руды:		
касситерит-кварцевые	134,0	102,0
вольфрамит-кварцевые	140,6	107,0
рядовые молибденит-кварцевые	120,0	91,3

ся практически неизменным, отклонения не превышают 10—11%.

4. Возникновение рудообразующего гидротермального раствора внутри родоначальной пфанновской гидротермы (§ 6) можно рассматривать как следствие реакций, в результате которых в единице объема реакционного пространства количество

атомов одного сорта (собственно рудообразующих) растет, их «атмосфера» сжимается тогда как других («петрогенных») уменьшается, их «атмосфера» разрежается. При этом процесс совершается метасоматически. Можно высказать предположение, что реакциями, способствующими сжатию атмосферы рудообразующих элементов, будут реакции комплексообразования, а способствующими разрежению безрудных — эффекты вытеснения металлоносными комплексами петрогенных ионов и их же окончательное удаление из уже движущегося гидротермального раствора под влиянием МГДЭ. Необходимо иметь в виду постоянство атомного состава во всем объеме магматического очага и отщепляющихся гидротерм и вытекающее отсюда принципиальное требование при расчете — распространить его на весь круг магматических элементов: сжимая атмосферу одних и разрежая других.

5. Коэффициент  $K$ , используемый при расчетах и показывающий, во сколько раз сжимается или разрежается «атмосфера» того или иного элемента в единице объема рудоносной гидротермы относительно его содержания в рассеянии в родоначальной магме (кларк концентрации), берется как отношение количества молей элемента в конкретной руде к количеству молей этого элемента в родоначальной породе;  $K > 1$ , поэтому при разрежении необходимо брать обратную величину.

6. Процесс рудообразования принимается изотермическим, для идеальных условий, расчет ведется на единицу объема.

При указанных условиях для расчета воспользуемся общим выражением (20) для определения максимальной работы изохорно-изотермического процесса. Расчет выполняется на 1 моль вещества. Предполагая идеальные свойства веществ и процесса, участвующих в реакции, получаем  $\Delta U = 0$ , поскольку при этих условиях все свойства, в частности теплоемкости, одинаковы; следовательно,

$$\Delta F = -T\Delta S. \quad (21)$$

Отсюда ясно видно, что если приращение энтропии имеет знак минус, то внешняя работа положительна и совершается над системой и наоборот.

Для изотермического увеличения или уменьшения содержания элемента в единице объема, иначе сжатия или разрежения его «атмосферы» в единице объема в  $K$  раз,  $\Delta S$  определяется по следующей формуле (для идеальных условий):

$$\left. \begin{aligned} \Delta S &= R \ln (C/C_0) = R \ln K \quad (\text{для сжатия}); \\ \Delta S &= R \ln (C_0/C) = R \ln K \quad (\text{для разрежения}), \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где  $C_0$  и  $C$  — начальное и конечное содержания элемента в единице объема, моль.

Если концентрация увеличивается (сжатие), то для  $\Delta S$  берется знак минус, если уменьшается (разрежение), тогда берет-



ся знак плюс. Приведенные формулы имеют в виду один данный элемент (или его соединение), единицу объема и 1 моль вещества. Если в процессе участвуют  $M_3$  молей вещества, этот множитель следует ввести в соответствующую формулу. Ипользуем формулы (22) для расчета приращения энтропии на ряде природных аллотропов — веществ, имеющих одинаковый состав, но разную структуру (табл. 10). Значения взяты у Ю. П. Мельника [48], за исключением отмеченных звездочками: \* [27]; \*\* [43]; \*\*\* [20].

Из табл. 10 следует, что между плотностями аллотропов и их энтропией наблюдается обратная зависимость, как это и следует из термодинамических закономерностей. Правда, имеются отклонения (анатаз и рутил). Однако этот случай не типичен, и аномальность объясняется особенностями кристаллического строения. Расчетные данные приращения энтропии (табл. 10) оказываются меньше фактических, но сохраняют свое относительное постоянство ( $\sim 75\%$  фактических). Очевидно, что минерал — это конкретное кристаллохимическое образование, имеющее специфическое внутреннее строение, свою определенную кристаллическую решетку по сравнению с раствором, из которого он выпал — должен обладать большей организованностью (меньшей энтропией); это и видно из табл. 10. Для графита, алмаза общее уменьшение энтропии иное из-за увеличения плотности, это объясняется условиями образования алмаза с поглощением тепла. Таким образом, определение  $K$  по отношениям плотностей руд и пород вполне обоснованно.

Выше мы имели перед основной общей расчетной формулой знак минус. Однако для системы, находящейся в равновесии, знак во всех случаях должен быть плюс, поскольку при сжатии атмосферы данного элемента или ее разрежении следует затратить на систему энергию со стороны. Только при сжатии работа затрачивается на преодоление сил сопротивления со стороны объема рудоносной гидротермы, а при разрежении, наоборот, со стороны среды.

Итак, основная формула для определения затраты энергии на сжатие — разрежение «атмосферы» рудоносной гидротермы в расчете на один элемент, на выбранную единицу объема и на  $M_3$  молей вещества, вовлеченного при этом в процесс, при идеальном изотермическом процессе имеет следующий вид:

$$\Delta F = M_3 T \Delta S = M_3 TR \ln K. \quad (23)$$

На самом же деле исходная пфанновская гидротерма представляет собой смесь в воде 92 естественных элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Как указывает П. Шамбадал [83], классическая теория термодинамики не способна удовлетворительно разрешить не только задачу разделения многокомпонентных, но и более простой вопрос разделения двухкомпонентных смесей. В доказательство он приводит случай

## Изменение энтропии аллотропов

Химическое природное соединение	Аллотропы	Плотность		Относительная плотность (рассчитанные $K$ )	Табличные значения $S^{\circ}_{298}$ , кал/(моль·°K)	$S^{\circ}_{298}$ относительно стандартного аллотропа	Рассчитанная $\Delta S^{\circ}_{298}$ по формуле $\Delta S = R \ln K$	$\Delta S^{\circ}_{298}/S^{\circ}_{298\text{ф}}$																																																																																											
		г/см <sup>3</sup>	количество молей в 1 дм <sup>3</sup>																																																																																																
Углерод С	Графит	2,2670	187,5	1,00	1,37**	-0,802	-0,872	1,09																																																																																											
	Алмаз	3,5205*	291,0	1,55	0,568**				Сера S	Моноклинная	1,944	60,5	1,00	7,78**	-0,16	-0,121	0,76	Ромбическая	2,0671	64,5	1,064	7,62**	Кремнекислота SiO <sub>2</sub>	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,12	-0,0024	—	$\alpha$ -кристобаллит	2,1944	109,8	1,0012	10,38	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,50	-0,381	0,765	Кварц	2,6483	132,0	1,21	10,00	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,85	-0,570	0,67	Коусит	2,9110	145,2	1,33	9,65	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	—	-1,336	—	СТИШОВИТ	4,2874	213,9	1,95	<9,164	CaCO <sub>3</sub>	Кальцит***	2,71	135,5	1,00	22,2	-1,00	-0,1632	0,16	Арагонит***	2,94	147,0	1,085	21,2	TiO <sub>2</sub>	Анализ	3,885*	146,0	1,00	11,93**	0,07	-0,1632	—	Рутил
Сера S	Моноклинная	1,944	60,5	1,00	7,78**	-0,16	-0,121	0,76																																																																																											
	Ромбическая	2,0671	64,5	1,064	7,62**				Кремнекислота SiO <sub>2</sub>	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,12	-0,0024	—	$\alpha$ -кристобаллит	2,1944	109,8	1,0012	10,38		$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,50	-0,381	0,765	Кварц	2,6483	132,0	1,21	10,00	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,85	-0,570	0,67	Коусит	2,9110	145,2	1,33	9,65	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	—	-1,336	—	СТИШОВИТ	4,2874	213,9	1,95	<9,164	CaCO <sub>3</sub>	Кальцит***	2,71	135,5	1,00	22,2	-1,00	-0,1632	0,16	Арагонит***	2,94	147,0	1,085	21,2	TiO <sub>2</sub>	Анализ	3,885*	146,0	1,00	11,93**	0,07	-0,1632	—	Рутил	4,215*	158,4	1,085	12,00									
Кремнекислота SiO <sub>2</sub>	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,12	-0,0024	—																																																																																											
	$\alpha$ -кристобаллит	2,1944	109,8	1,0012	10,38					$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,50	-0,381	0,765	Кварц	2,6483	132,0	1,21	10,00		$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,85	-0,570	0,67	Коусит	2,9110	145,2	1,33	9,65	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	—	-1,336	—	СТИШОВИТ	4,2874	213,9	1,95	<9,164	CaCO <sub>3</sub>	Кальцит***	2,71	135,5	1,00	22,2	-1,00	-0,1632	0,16	Арагонит***	2,94	147,0	1,085	21,2	TiO <sub>2</sub>	Анализ	3,885*	146,0	1,00	11,93**	0,07	-0,1632	—	Рутил	4,215*	158,4	1,085	12,00																						
	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,50	-0,381	0,765																																																																																											
	Кварц	2,6483	132,0	1,21	10,00					$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,85	-0,570	0,67	Коусит	2,9110	145,2	1,33	9,65		$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	—	-1,336	—	СТИШОВИТ	4,2874	213,9	1,95	<9,164	CaCO <sub>3</sub>	Кальцит***	2,71	135,5	1,00	22,2	-1,00	-0,1632	0,16	Арагонит***	2,94	147,0	1,085	21,2	TiO <sub>2</sub>	Анализ	3,885*	146,0	1,00	11,93**	0,07	-0,1632	—	Рутил	4,215*	158,4	1,085	12,00																																			
	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	-0,85	-0,570	0,67																																																																																											
	Коусит	2,9110	145,2	1,33	9,65					$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	—	-1,336	—	СТИШОВИТ	4,2874	213,9	1,95	<9,164	CaCO <sub>3</sub>	Кальцит***	2,71	135,5	1,00	22,2	-1,00	-0,1632	0,16	Арагонит***	2,94	147,0	1,085	21,2	TiO <sub>2</sub>	Анализ	3,885*	146,0	1,00	11,93**	0,07	-0,1632	—	Рутил	4,215*	158,4	1,085	12,00																																																	
	$\alpha$ -тридимит	2,1917	109,5	1,00	10,50	—	-1,336	—																																																																																											
СТИШОВИТ	4,2874	213,9	1,95	<9,164	CaCO <sub>3</sub>				Кальцит***	2,71	135,5	1,00	22,2	-1,00	-0,1632	0,16	Арагонит***	2,94	147,0	1,085	21,2	TiO <sub>2</sub>	Анализ	3,885*	146,0	1,00	11,93**	0,07	-0,1632	—	Рутил	4,215*	158,4	1,085	12,00																																																																
CaCO <sub>3</sub>	Кальцит***	2,71	135,5	1,00		22,2	-1,00	-0,1632	0,16																																																																																										
	Арагонит***	2,94	147,0	1,085	21,2	TiO <sub>2</sub>				Анализ	3,885*	146,0	1,00	11,93**	0,07	-0,1632	—	Рутил	4,215*	158,4	1,085	12,00																																																																													
TiO <sub>2</sub>	Анализ	3,885*	146,0	1,00	11,93**		0,07	-0,1632	—																																																																																										
	Рутил	4,215*	158,4	1,085	12,00																																																																																														

разделения смеси, содержащей 99,3%  ${}_{92}^{238}\text{U}$  и 0,7%  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , потребовавший  $1,2 \cdot 10^6$  квт·ч, вместо теоретически предсказываемых 0,023 квт·ч на 1 кг второго компонента, что составляет в 50 млн. раз больший расход, или к.п.д. = 0,000002%. Необходимо хотя бы приблизительно разобраться в этом вопросе. Для этого рассмотрим ряд примеров.

Допустим, мы имеем несколько меченых дробин. Если мы уроним их на чистый пол, то работа, совершенная при подъеме, практически будет равна работе, совершенной ими при падении (сила тяжести, помноженная на путь). Смешаем эти же дробины с предварительно рассыпанными другими такими же, но не мечеными. При выделении из общей смеси только меченых дробин, при условии подъема каждой из них для опознавания на одну и ту же высоту и при отнесении всех затрат работы (энергии) на необходимые нам меченые дробины, к.п.д. операции будет пропорционален отношению содержания этих последних в общей смеси. Рассмотрим другие случаи.

Допустим, что в процессе принимает участие адсорбция, тогда, как показывают теория и практика этого процесса, расход сорбента в расчете на единицу массы сорбируемого вещества (до насыщения) будет обратно пропорционален концентрации этого вещества при равновесии. Иными словами, этот расход определяется относительным содержанием сорбата в растворе, откуда его надлежит извлечь. Если в качестве разделителя смеси используется электрический ток, то полезная доля его будет всецело определяться также относительным содержанием выделяемого полезного компонента. При использовании химических реакций в тех же целях для сохранения скорости реакции тем большие количества реагента должны быть использованы, чем меньше концентрация выделяемого компонента.

Наконец, если в качестве концентратора для тех или иных целей используется газовый насос, то при сжатии в  $n$  раз какой-то компоненты газовой смеси одновременно будут во столько же раз сжиматься и все остальные компоненты, следовательно, общий расход энергии при отнесении его на нужный газ будет обратно пропорционален его относительной концентрации. Понятен теперь пример, приведенный П. Шамбадалем, для разделения изотопов урана. В этом случае, безусловно, имело место положительно прогрессирующее расходование энергии в связи с таким же уменьшением концентрации активного урана в разделяемой смеси по мере ее очистки.

Подчеркнем еще раз, что расчетная формула (23) учитывает лишь чистую работу, расходуемую на сжатие (разрежение) данного количества непосредственно исследуемого компонента  $M$ , независимо от обстановки, в которой происходит процесс, и без учета затрат энергии на создание рабочего механизма. Иными словами, предполагается, что компонент находится в единственном числе и всегда в одной и той же концентрации, тогда как

в реальных геологических условиях всюду существует «атмосфера» из 92 естественных компонентов, каждый из которых присутствует в свойственной ему атомной концентрации [16]. Далее предполагается, что рабочий механизм разделения уже создан. Эти обстоятельства и приводят к тому, что полные затраты рудообразующей энергии со стороны природы на процесс концентрирования (разрежения) того или иного компонента в расчете на выбранную единицу (объема, массы) будут систематически отличаться от вычисленных по формуле (23). Выше, а также в статье Н. И. Сафронова [69] показано, что вне зависимости от природы процесса концентрирования — разрежения (сила тяжести, сорбция, химическое воздействие, воздействие электрического тока или работа механического устройства типа газового насоса) полный расход энергии в расчете на данный элемент будет тем больше, чем меньше концентрация этого элемента в смеси.

Концентрацию данного элемента в смеси можно выразить через его атомную концентрацию  $C_a$ , понимая под этим долю атомов элемента, которую они составляют в общей смеси в единице объема. Вводя понятие о к.п.д., можно положить этот параметр пропорциональным  $C_a$ , причем  $C_a$  следует отнести к моменту равновесия. Последнее означает, что при концентрировании какого-либо элемента в выбранном объеме за счет запасов его в окружающей среде за  $C_a$  необходимо брать постоянное атомное содержание в среде, а при разрежении — атомное содержание того же элемента в этом объеме в конце процесса.

Полная энергия имеет вид

$$\Delta F_{\Pi} = \Delta F_{\text{ч/к.п.д.}} = M_3 TR \ln K / C_a. \quad (24)$$

При сжатии

$$C_a = \frac{\mu'_3}{\sum \mu_3}, \quad (25)$$

при разрежении

$$C_a = \frac{\mu''_3}{\sum \mu_3},$$

где  $\mu'_3$ ,  $\mu''_3$  — количество молей элемента в единице объема гранитоида и руды соответственно.

Совершенно очевидно, что при сжатии  $M_3 = \mu'_3 K$ , при разрежении  $M_3 = \mu''_3 K$ . Подставляя  $M_3$  и  $C_a$  в общую формулу, получаем

$$\Delta F_{\Pi} = \frac{\Delta F_{\text{ч}}}{\text{к.п.д.}} = \frac{M_3 RT \ln K}{C_a} = \sum \mu_3 RT K \ln K. \quad (26)$$

По формуле (26) можно при заданном  $K$  рассчитать полную затрату рудообразующей энергии на один данный элемент

в смеси и на выбранную единицу объема. Поскольку реальными коэффициентами рудообразования для различных элементов мы не располагаем, а отдавать предпочтение отдельным элементам нет оснований, то мы вынуждены коэффициенты  $R$ ,  $T$ ,  $\Sigma \mu_0$  для всех элементов принимать одинаковыми, равными единице. Расчетная формула для определения полной энергии, необходимой для сжатия или разрежения «атмосферы» одного данного элемента в смеси в выбранной единице объема в  $K$  раз, предельно упрощается:

$$\Delta F_{\pi} = K \ln K. \quad (27)$$

Тогда полная затрата энергии рудо-ореолообразования  $E_{\pi}$  в расчете на единицу объема руды (ореола) при  $n$  элементах, затронутых процессом, составит

$$E_{\pi} = \sum_{i=1}^n \Delta F_{\pi i} = \sum_{i=1}^n K_i \ln K_i. \quad (28)$$

Исчерпываются ли расчетами по формулам (27) и (28) все природные затраты энергии на рудообразование и нет ли необходимости количественно оценить другие статьи энергетических затрат? Для этого рассмотрим следующие соображения.

Процесс рудообразования не сводится только к преобразованию «атмосферы» элементов в единице объема руды, он предполагает также и перемещение рудообразующего материала из мест его зарождения в места рудоотложения. На это перемещение также нужно затратить механическую энергию. Однако известно, что безрудных гранитоидных интрузий значительно больше, чем рудоносных; сплошь и рядом следы гидротермальной деятельности у безрудных гранитоидов выражены не менее сильно, чем у рудоносных. Есть все основания считать, что перемещение горячих водных растворов — явление довольно обычное и лишь в редких случаях сопровождается образованием руд. Процесс собственно рудообразования есть следствие совпадения ряда благоприятных условий и работы специфических рудообразующих сил физико-химической природы. Из теоретической петрологии следует, что при остывании магмы образуются горячие водные растворы. Неизбежен процесс выдавливания этих растворов образующимся твердым минеральным веществом. Поэтому можно считать, что затраты энергии на выдавливание растворов покрываются за счет внутренней энергии расплавленной магмы, которую она получает с самого начала из запасов внутреннего тепла, не имеющих прямого отношения к процессу рудообразования.

В силу указанных соображений принимается, что энергия рудообразования будет полностью описана и рассчитана как энергия, расходуемая только на сжатие — разрежение «атмосферы» элементов в данном объеме руды, без учета работы механических сил на перемещение рудообразующих растворов. Ме-

ханическая подъемная энергия, которая преобразуется при подъеме в магнитогидродинамическую энергию и расходуется на «очистку» комплексного ассоциированного раствора от ионных примесей, полностью учитывается расчетными формулами разрежения. В заключение подчеркнем, что изложенный путь расчета энергии рудообразования, когда предполагается идеальность процессов и свойств материалов, участвующих в них, не единственный.

Другим путем, безусловно, более правильно отражающим существо дела, может служить расчет, основанный на использовании реальных термодинамических параметров (энтропии, энтальпии и т. п.) участвующих в рудообразовании простых и сложных исходных и конечных веществ. Однако этот путь можно использовать лишь после создания термодинамики геохимических процессов и экспериментального определения соответствующих параметров, характерных для реальных геохимических условий.

В завершение рассмотрим схему расчета (табл. 11) и круг задач, с которыми мы встречаемся при использовании приведенных формул.

Таблица 11

Расчет энергии рудо-орезолообразования

Элемент	Атомная масса	Геохимические параметры фонового объекта		
		С, вес. %	Плотность, г/дм <sup>3</sup>	К, моль/дм <sup>3</sup>
О	15,99	48,7	1305,2	81,58
Si	28,08	32,3	865,2	30,80
Al	26,98	7,7	206,4	7,63
Fe	55,84	2,7	72,4	1,29
Sn	118,69	$3 \cdot 10^{-4}$	$8,04 \cdot 10^{-3}$	$6,77 \cdot 10^{-5}$
Σ	—	100,49	2693,0	131,3

В данном примере в качестве фонового выбран гранит; его геохимические параметры взяты у А. П. Виноградова [16]; С, вес. %, определяются по данным химического анализа; плотность, г/дм<sup>3</sup>, вычисляется элементарным образом. Аналогичные параметры определяются и для изучаемого объекта.

Элемент	С, вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	К	К ln К
О	50,33	1379,20	86,20	1,06	0,062
Si	37,23	1019,00	36,22	1,18	0,195
Al	4,36	119,40	4,41	1,72	0,933
Fe	1,58	43,05	0,77	1,08	0,872
Sn	2,94	80,40	0,67	10 000	92 103
Σ	100	2738	132	~10 000	92 313,5

Кларки концентрации определяются путем деления количества молей данного элемента в единице объема расчетного объекта на число молей того же элемента в такой же единице фонового объекта — родоначального гранитоида. Если значение меньше единицы, то берется обратная величина этой дроби. Полную энергию рудообразования в расчете на один данный элемент и на единицу объема удобнее всего получить путем считывания с предварительно составленного графика  $K - K \ln K$ . Она определяется как сумма затрат энергий по отдельным элементам.

Характер расчетной формулы таков, что хотя кларки концентрации могут меняться в сотни тысяч раз, изменения чистой работы, определяемой  $\ln K$ , превосходят в 11—13 раз.

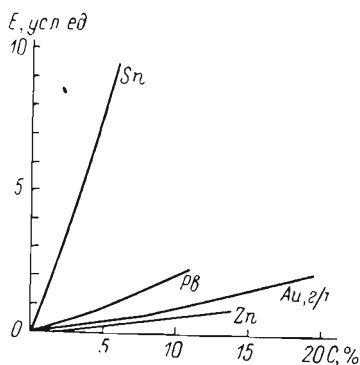


Рис. 4. Результативный график расходования энергии рудообразования кварцевых жил с галенитом, касситеритом, сфалеритом и золотом.

Заметим, что если сумма молей всех элементов в единице объема расчетного объекта будет заметно отличаться (не менее чем на 25%) от фоновой, то необходимо ввести поправочный коэффициент или выполнить расчет по формуле (26), учитывающей это обстоятельство.

Можно наметить по крайней мере два конкретных случая, когда для их разъяснения необходимо и достаточно рассчитать энергию рудообразования единицы объема руды (ореола). Первый случай имеет место, когда необходимо сравнить в естественных показателях комплексные руды различных содержаний или просто разные руды различных металлов и их содержания между собой. В качестве примера приведем результативный график (рис. 4) расходования энергии рудообразования на кварцевые руды с галенитом  $PbS$ , сфалеритом  $ZnS$ , касситеритом  $SnO_2$  и золотом. В качестве основы при расчете взята пустая (с кларковыми содержаниями сравниваемых металлов) кварцевая жила. Расход рудообразующей энергии рассчитан в точном соответствии с приведенной выше схемой (табл. 11). Используя рис. 4, установим кондиции различных кварцевых руд, эквива-

лентных друг другу по энергии, затраченной природой на их образование.

Руда	Содержание
Золото-кварцевая	4 г/т Au
Галенит-кварцевая	1,6% Pb
Сфалерит-кварцевая	4,2% Zn
Касситерит-кварцевая	0,25% Sn

Во втором случае следует выразить в едином показателе сумму индивидуально измеренных параметров; этот случай наблюдается, например, при необходимости отобразить наглядным и простым путем данные исследования многоэлементных ореолов. Задача решается путем определения по результатам

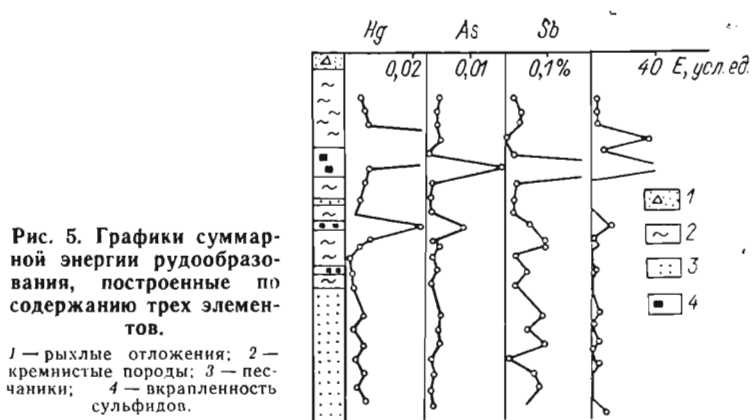


Рис. 5. Графики суммарной энергии рудообразования, построенные по содержанию трех элементов.

1 — рыхлые отложения; 2 — кремнистые породы; 3 — песчаники; 4 — вкрапленность сульфидов.

анализа проб содержаний тех или иных элементов. Затем эти содержания выражаются в кларках концентрации относительно фона (гранитоидов, местного, литосферы и т. п.) и вычисляются  $K_i \ln K_i$  — это условный расход энергии рудообразования в расчете на 1 элемент и на единицу объема. Суммируя все, получаем полную энергию ореолообразования, израсходованную природой на все введенные в расчет ореольные элементы на единицу объема. Можно определить также полные энергии ореолообразования суммы привнесенных элементов, суммы элементов выноса и т. п. (рис. 5).

В заключение заметим, что окончательно  $K_i \ln K_i$  удобнее всего рассчитать по составленной заранее диаграмме, на которой по оси абсцисс откладывается  $K$ , по оси ординат — отвечающие им значения  $K \ln K$  (рис. 6). Диаграмму рекомендуется строить в двух масштабах — крупном для  $K < 100$  ед. и мелком — для  $K > 100$  ед. Одно из преимуществ наличия диаграммы — это возможность легкого отыскания  $K_{эф}$ , отвечающего любому значению  $\sum_{i=1}^n K_i \ln K_i$ . Это необходимо при исследовании



сложных по составу руд — тантало-ниобиевых, свинцово-цинковых и других, когда удобно ввести в рассмотрение один эффективный элемент, изменением концентрации которого достигается расчетный энергетический эффект.

При расчете полной энергии рудообразования по приведенной схеме (см. табл. 11) теоретически предполагается использование сведений по 92 естественным элементам. На практике

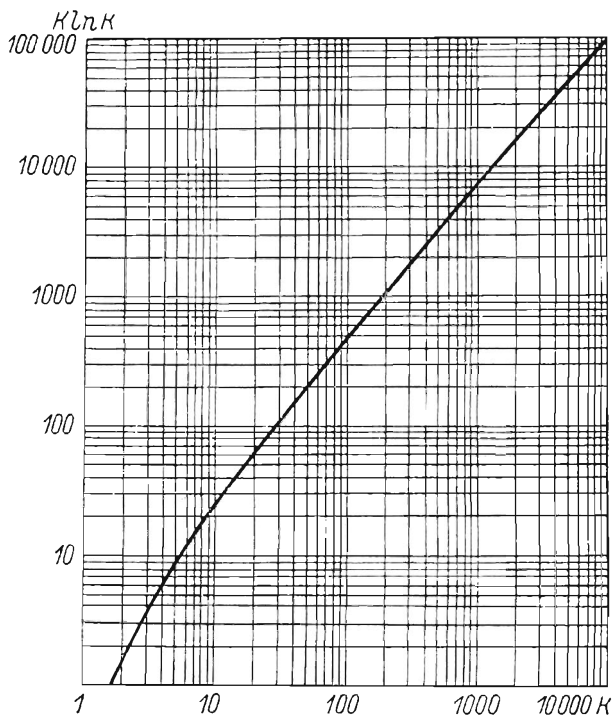


Рис. 6. Номограмма для расчетов  $K \ln K$  энергии рудообразования.

никогда не возникает необходимость использовать все элементы. В частности, содержания большинства элементов-примесей либо практически не меняются, либо меняются несущественно по всему ряду: родоначальная порода (гранитоид) — рудный ряд возрастающих кондиций. На практике энергия рудообразования рассчитывается для 25—30 элементов. Далее, как оказалось, начиная с  $K \geq 100$ , главнейшую роль в расчете приобретает главный рудный (ведущий) элемент, поэтому взносами (паями) энергии рудообразования других элементов можно пренебречь.

## § 8. СТРУКТУРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОЧАГА ПО Л. БОЛЬЦМАНУ

Приведенные формулы для определения расходования энергии рудообразования в расчете на выбранную единицу объема руды, взятые сами по себе, обладают ограниченными возможностями. В частности, они имеют силу, когда требуется выразить в универсальных единицах энергии характеристики многокомпонентных геологических образований. Для интересующих нас целей дальнейшие перспективы следует связывать с использованием особенностей внутреннего строения энергетических очагов; эти особенности вскрыты Л. Больцманом. Он ввел понятие о термодинамической вероятности состояния, процесса, вывел математическую связь между энтропией и термодинамической вероятностью [см. формулу (5)].

Учитывая, что энтропия является аддитивным параметром, а термодинамическая вероятность  $W$  — мультипликативным, уравнение (5) можно переписать в виде

$$s = k \ln w \quad \text{или} \quad S = R \ln w, \quad (29)$$

где  $S, R$  — относятся к молю;  $s, k, w$  — к одной усредненной молекуле.

Из приведенных формул следует, что чем меньше энтропия процесса, тем менее его термодинамическая вероятность, тем менее он возможен, и наоборот. Известно, что в природе абсолютно однородных процессов не существует, но всегда наблюдаются внутренние более или менее резко отличающиеся от средних параметров отклонения, иначе, флюктуации. Это касается плотностей распределения молекул в каком-либо объеме газа, распределения молекул по скоростям и направлениям их теплового движения и т. п. Подобное имеет место и в распределении интенсивностей энергии в едином энергетическом очаге (интенсивность плотности энергии — количество энергии в выбранных энергетических единицах, заключенной в единице объема энергетического очага)\*. При этом общие свойства энтропии позволяют утверждать, что чем интенсивнее отклонение (флюктуация) от первоначального значения, тем меньше энтропия подобного отклонения, тем меньше термодинамическая его вероятность и, следовательно, практическая возможность существования.

Допустим далее, что рассматривается вся рудообразующая энергия, израсходованная природой на образование руд какого-либо одного металла. Естественно предположить, что внутри

---

\* Упомянутые флюктуации находятся в динамическом равновесии с энергетическим очагом в целом и существуют во все время его жизни, сохраняя неизменными количественные взаимоотношения.

этой энергии будут отдельные порции, различающиеся по интенсивности. Тогда можно написать

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n, \quad (30)$$

где  $E$  — суммарная энергия рудообразования;  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$  — порции ее, имеющие различную, возрастающую по порядку номеров интенсивность, т. е. содержащие в единице объема различные возрастающие количества энергии, вычисленные в соответствующих единицах.

Формула Л. Больцмана позволяет предугадывать количественные соотношения  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , имеющие различную заданную интенсивность. Для этого преобразуем формулу (29):

$$\omega = e^{S/R}. \quad (31)$$

Можем сопоставить единичным слагаемым энергии  $E_1, E_2, \dots, E_n$  их термодинамические вероятности:

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= e^{S_1/R}; \\ \omega_2 &= e^{S_2/R}; \\ \dots &\dots \\ \omega_n &= e^{S_n/R}. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Примем термодинамическую вероятность процесса возникновения наименее интенсивной флуктуации энергии  $E_1$  за единицу и выразим в ее долях термодинамические вероятности возникновения других интенсивностей  $E_2, E_3, \dots, E_n$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\omega_2}{\omega_1} &= P_2 = \frac{e^{S_2/R}}{e^{S_1/R}} = e^{(S_2 - S_1)/R} = e^{\Delta S_2/R}; \\ \frac{\omega_3}{\omega_1} &= P_3 = \frac{e^{S_3/R}}{e^{S_1/R}} = e^{(S_3 - S_1)/R} = e^{\Delta S_3/R}; \\ \dots &\dots \\ \frac{\omega_n}{\omega_1} &= P_n = \frac{e^{S_n/R}}{e^{S_1/R}} = e^{(S_n - S_1)/R} = e^{\Delta S_n/R}, \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

где  $P_2, P_3, \dots, P_n$  — условные вероятности возникновения порций энергии  $E_2, E_3, \dots, E_n$  в долях вероятности возникновения энергии наименьшей интенсивности  $E_1$ ;  $\Delta S_2, \Delta S_3, \dots, \Delta S_n$  — приращения энтропии при переходе от одной порции энергии к другой.

При выводе формул (33) никаких специальных условий не оговаривалось и ограничений не накладывалось; отсюда можно заключить, что формулы (33) являются универсальными. В частности, этим порциям энергии можно приписать квантовое строение. Действительно, в этом последнем случае необходимо было бы допустить, что если причина — рудообразующая энергия — имеет квантовое строение, то и следствие ее воздействия — гидротермальный рудообразующий раствор — должен иметь такое строение. Между тем рудообразующая гидротерма квантового

строения не имеет: один гидротермальный рудоносный раствор отличается от однотипного другого лишь степенью концентрации рудообразующих компонентов, но отнюдь не внутренней структурой, которой можно было бы приписать квантовое строение, отвечающее такому рудообразующей энергии. Фактически дело обстоит так, что различные порции рудообразующей энергии играют роль как бы воздушных нагнетательных насосов различного выходного давления, дающие в результате одинаковые по внутренней структуре и различные по концентрации (давлению) газовые продукты\*.

Примем, что различные порции рудообразующей энергии  $E_1, E_2, \dots, E_n$  отличаются друг от друга не квантовой структурой, а степенью интенсивности энергии, т. е. количествами ее в единице объема. В связи с этим будем искать конкретные решения уравнения (33) для условия, когда приращения энтропии  $\Delta S_i$  определяются расчетами энергии рудообразования единицы объема руды различной кондиции по  $K$ . Для этого случая имеем формулу (22), где перед выражением для  $\Delta S_i$  должен быть взят знак минус, поскольку энтропия каждого следующего состояния меньше энтропии состояния  $E_i$ . Отсюда для общего члена

$$P_i = e^{\Delta S_i/R} = e^{-R \ln K_i/R} = e^{-\ln K_i} = \frac{1}{K_i}, \quad (34)$$

где  $2 \leq i \leq n$ .

Таким образом, общая формула для  $E$  приобретает вид

$$\begin{aligned} E &= E_1 \left( 1 + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \dots + \frac{1}{K_n} \right) = \\ &= E_1 \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right). \end{aligned} \quad (35)$$

Из формулы (35) следует, что порции энергии, выделяемые природой на образование руд разных кондиций, обратно пропорциональны кларкам концентрации главного металла в рудах, т. е. чем выше концентрация данного элемента в руде (чем больше  $K$ ), тем меньшие количества рудообразующей энергии выделяет на это природа. Формулу (35) можно пересчитать на математическую вероятность:

$$\Sigma \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right) = \ln n + 0,5772.$$

Эту формулу можно использовать при  $n \geq 10$  [35], погрешность расчета не более 1—2%. Допустим, что максимальное  $K = 10^6$ , тогда  $\Sigma \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{10^6} \right) \approx \ln 10^6 + 0,5772 =$

\* Динамически равновесная квазиквантовая структура флуктуаций с кратковременным существованием отдельных «квантов» вполне возможна.

$= 13,815 + 0,5772 = 14,3927$ . Ряд (35) приобретает вид  $E = E_1(0,0695 + 0,0347 + 0,0232 + \dots + 6,95 \cdot 10^{-8})$ .

Возникает вопрос: какие последствия будет иметь признание квантового строения рудообразующей энергии? Для этого обратимся к термодинамике В. Ф. Ноздрева [52], где рассматривается вопрос электромагнитного излучения. Пользуясь этим трудом и другими, можно прийти к следующим выводам.

1. Распределение типа (35) должно быть отнесено не к самой энергии, а к ее носителям — осцилляторам, иначе, к квантам различных рангов.

2. Для определения энергии необходимо числа квантов помножить на сами кванты, пропорциональные  $\ln K_i$ .

3. Энергия, выделяемая природой, будет пропорциональна не  $1/K_i$ , а  $\ln K_i/K_i$ .

4. В конечном итоге это обстоятельство поведет к чисто гиперболическому закону распределения запасов металла в зависимости от содержания металла в руде, тогда как на практике наблюдается распределение по «угнетенной» гиперболе; последнее будет показано в § 9.

В заключение кратко остановимся на масштабах проявления энергии рудообразования, на которые можно распространять сделанные выводы. Нет сомнений в том, что выводы вполне могут быть распространены на источники глобальных масштабов проявления рудообразующей энергии. М. Планк показал, что характер излучения зависит только от температуры, а не от масштаба излучателя. Следовательно, при практически постоянной температуре образования рудоносной гидротермы выводы относятся к источникам любых меньших масштабов, если они замыкаются в данном объеме геологических образований и к их действию не примешивается влияние других соседних энергетических источников.

## § 9. РАСЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ЗАПАСОВ МЕТАЛЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ СОДЕРЖАНИЙ В РУДАХ

Материалы, приведенные в § 7, 8, позволяют рассчитать теоретические дифференцированные запасы металлов в зависимости от их содержаний в рудах. В самом общем случае можно воспользоваться основными формулами (28) и (34). Отсюда дифференцированный запас руд главного элемента при данном содержании его в кларках концентрации в руде  $K$  имеет вид

$$P_K = \frac{E_K}{E_{\pi}} = \frac{1/K}{\sum_{i=1}^{92} K_i \ln K_i}, \quad (36)$$

где числитель — общий расход энергии на образование руд градации  $K$  по Л. Больцману; знаменатель — расход энергии на

образование единицы объема руды градации  $K$  (по термодинамике идеальных процессов).

Запасы руд данной градации  $K$  даны в условных единицах объема и могут быть легко пересчитаны в условные же единицы массы руды или металла, а при сопоставлении со статистикой — в тонны. Необходимо обратить внимание, что при формировании бедных руд часто энергия рудообразования неизбежно отвлекается на попутное создание жильного материала, как, например, кварца в кварц-касситеритовых рудах, скарна в контактово-метасоматических магнетитовых рудах и т. п. Во всех этих случаях затраты рудообразующей энергии будут превосходить нормальные (в расчете на 1 кларк концентрации главного металла), иногда во много раз. Поэтому, когда подобное имеет место, в формуле (36) вместо кларка концентрации главного металла  $K$ , необходимо использовать  $K_{эф}$ , соответствующее расчетным затратам энергии на единицу объема.

Ниже приведены результаты расчетов дифференцированных запасов применительно к металлам различных особенностей, обладающих длинными (типа олова и золота), средними (типа меди) и короткими рядами (типа железа) кларков концентрации.

### **Расчет дифференцированных запасов олова в кварцевых рудах**

Касситерито-кварцевые руды являются важными в балансе запасов олова, что и послужило основанием выбора их для типового расчета. Под касситерито-кварцевыми рудами (месторождениями) понимаются представители достаточно обширного класса поисково-разведочной классификации рудных месторождений акад. В. И. Смирнова [73]. Эти месторождения называются рудно-кварцевыми. Среди этого класса известны помимо оловянных многочисленные золотые, вольфрамовые, молибденовые и другие, а также месторождения пьезокварца. Отличительной чертой этих месторождений является преобладание жильного кварца, вплоть до практически 100%, как, например, в некоторых золото-кварцевых жилах. Сульфиды, если они присутствуют, не превышают 10% от общего объема, распределяются в рудном теле чаще всего гнездами или отдельными зернами. Рудные минералы в большинстве руд рассеяны, в современных рудах содержатся десятые доли — единицы процентов. Таким образом, все поисково-разведочные особенности рудно-кварцевых месторождений обусловлены кварцем (легко диагностируемые сохранные свалы, механические ореолы рассеяния, высокое электрическое сопротивление, пьезоэффект и др.). Ниже приведены элементарные составы родоначальной гранитоидной магмы, производных рудно-кварцевых жил (табл. 12), результаты расчетов энергии рудообразования и дифференциальных запасов в оловянно-кварцевых месторождениях (табл. 13).

Состав родоначальной породы и кварцевых руд олова различных кондиций, принятый к расчету, вес. %

Плотность, г/дм <sup>3</sup>	O	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	Ti	H	C	Sn	Примеси металлов
Исходный недифференцированный материал (гранитоид)													
2680	48,7	32,3	7,7	2,7	1,58	2,77	3,34	0,56	0,23	0,09	0,03	3·10 <sup>-4</sup>	0,49
Производные кварц-касситеритовые руды различных содержаний по олову													
2678	51,49	38,8	4,45	1,61	1,91	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,52	3·10 <sup>-4</sup>	0,49
2678	51,49	38,8	4,45	1,61	1,91	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,52	3·10 <sup>-3</sup>	0,49
2679	51,49	38,8	4,45	1,61	1,91	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,52	3·10 <sup>-2</sup>	0,49
2681	51,43	38,75	4,45	1,61	1,91	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,52	0,10	0,49
2685	51,31	38,70	4,45	1,61	1,91	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,52	0,30	0,49
2692	51,20	38,52	4,45	1,61	1,91	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,52	0,59	0,49
2707	50,96	37,93	4,42	1,60	1,90	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,51	1,49	0,48
2740	50,29	37,21	4,36	1,58	1,86	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,51	3,00	0,48
2797	49,35	35,63	4,26	1,54	1,82	0,18	0,11	0,32	0,06	0,01	0,50	5,75	0,47
2920	47,22	32,86	4,09	1,48	1,75	0,17	0,11	0,30	0,06	0,01	0,48	11,02	0,45
2947	46,77	32,37	4,05	1,48	1,75	0,17	0,11	0,30	0,06	0,01	0,48	12,00	0,45
3167	43,51	27,98	3,76	1,36	1,61	0,16	0,10	0,28	0,05	0,008	0,44	20,33	0,41
3658	37,71	20,02	3,25	1,19	1,39	0,14	0,09	0,24	0,04	0,007	0,38	35,18	0,36
4058	34,34	15,64	3,00	1,09	1,20	0,13	0,08	0,22	0,03	0,006	0,35	43,50	0,34
4639	29,70	9,20	2,56	0,93	1,10	0,11	0,07	0,19	0,03	0,006	0,30	55,50	0,30
6675	21,30	0,12	0,03	0,01	—	0,01	0,01	—	—	—	—	78,40	0,20

Расчет энергии рудообразования и распределение дифференциальных запасов олова (металла) и кварцевых руд

Плотность руды, г/дм <sup>3</sup>	Содержание олова			Расход энергии рудообразования, усл. ед.						Относительные запасы олова (металла) в рудах данного К	
	в руде, вес. %	в 1 дм <sup>3</sup> , г	К	на 1 дм <sup>3</sup> руды			на 1 кларк - 8,04·10 <sup>-3</sup> г олова			рассчитанные	усл. ед.
				полный по формуле (28)	на олово по формуле (38)	$\frac{K_{Sn} \ln K_{Sn}}{\sum K_i \ln K_i}$ , %	по формуле $\frac{\sum K_i \ln K_i}{K_{Sn}}$	по формуле $\ln K_{Sn}$	$\frac{K_{Sn} \ln K_{Sn}}{\sum K_i \ln K_i}$ , %		
2678	3·10 <sup>-4</sup>	8,04·10 <sup>-3</sup>	1	210,5	0,00	—	210,5	0,0	—	8,08·10 <sup>-5</sup>	782,0
2678	3·10 <sup>-3</sup>	8,04·10 <sup>-2</sup>	10	233,6	23,03	9,88	23,4	2,30	9,82	7,43·10 <sup>-4</sup>	6460,0
2679	3·10 <sup>-2</sup>	8,04·10 <sup>-1</sup>	100	671,0	460,52	68,70	6,71	4,61	68,7	1,08·10 <sup>-3</sup>	9400,0
2681	0,10	2,68	333,3	2 270,0	1 940,0	85,50	6,82	5,81	85,5	3,81·10 <sup>-4</sup>	3310,0
2685	0,30	8,04	1 000	7 118,5	6 908	97,2	7,12	6,91	97,1	1,35·10 <sup>-4</sup>	1173,0
2692	0,59	16,08	2 000	15 412,6	15 202	98,6	7,71	7,60	98,5	6,48·10 <sup>-5</sup>	564,0
2707	1,49	40,20	5 000	42 795	42 585	99,5	8,57	8,52	99,5	2,33·10 <sup>-5</sup>	203,0
2740	3,00	82,20	10 230	94 710	94 500	99,8	9,26	9,23	99,8	1,05·10 <sup>-5</sup>	91,70
2797	5,75	160,80	20 000	198 278	198 068	99,95	9,92	9,91	100,0	5,04·10 <sup>-6</sup>	43,80
2920	11,02	321,60	40 000	424 050	423 840	100,0	10,55	10,60	100,4	2,36·10 <sup>-6</sup>	20,50
2947	12,00	354,0	44 000	469 710	469 500	100,0	10,68	10,69	100	2,13·10 <sup>-6</sup>	18,52
3167	20,33	643,20	80 000	903 410	903 200	100,0	11,27	11,29	100	1,11·10 <sup>-6</sup>	9,66
3658	35,18	1286,40	160 000	1 917 510	1 917 300	100,0	11,98	11,98	100	5,22·10 <sup>-7</sup>	4,54
4058	43,50	1770,0	220 150	2 708 500	2 708 290	100,0	12,30	12,30	100	3,69·10 <sup>-7</sup>	3,21
4639	55,50	2572,0	320 000	4 056 530	4 056 320	100,0	12,70	12,68	100	2,46·10 <sup>-7</sup>	2,14
6675	78,40	5226,0	650 000	8 708 250	8 703 500	100,0	13,40	13,38	100	1,15·10 <sup>-7</sup>	1,00



Табл. 12 является исходной, в табл. 13 вместо молей приведены граммы олова в 1 дм<sup>3</sup>, что в данном случае вполне допустимо; хотя кларк концентрации олова в пустых кварцевых жилах равен единице и, казалось бы, затраты энергии рудообразования должны быть равны нулю, на самом деле эти затраты больше, так как энергия тратится на преобразование гранитоида в жильный кварц рудных тел. Вероятности образования бедных рудных тел значительно ниже теоретических, если вычис-

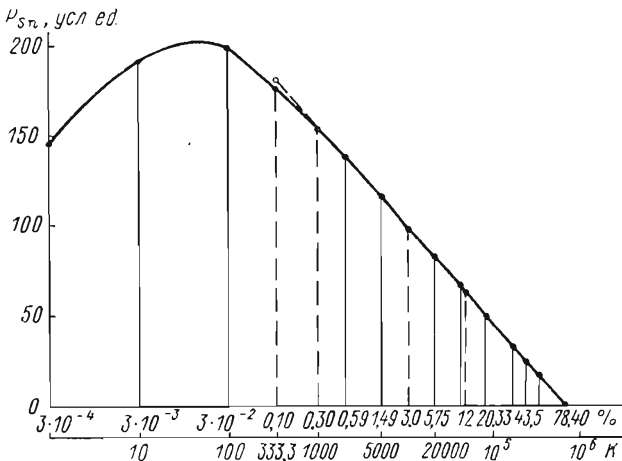


Рис. 7. График дифференциальных запасов олова (металла) в рудах различных кондиций.

Сплошной линией показаны запасы для всего диапазона содержания, штриховой — для диапазона 0,1—78,4% олова в рудах.

лены не по  $K$  олова, а по  $K_{эф}$ , как это указывалось выше; вычислена энергия рудообразования, израсходованная на создание единицы объема руды и  $K_{эф}$ .

На рис. 7 в логарифмическом масштабе приведен график дифференциальных запасов олова (металла) в рудах, рассчитанных по формуле

$$P_K = \frac{1/K_{эф}}{\sum K_i \ln K_i/K_{сн}} \quad (37)$$

Анализируя уравнение (37) и отвечающие этому уравнению табл. 13 и график (рис. 7), приходим к следующим выводам.

1. Весь график можно разбить на две части: в пределах 1—100 кларков концентрации содержания и запасы растут, в то время как в пределах 100—650 000 кларков — содержания растут, а запасы падают.

2. Объяснение вытекает из анализа характера распределения энергии рудообразования по главному и второстепенным руд-

ным элементам. Так, при малых содержаниях главного элемента энергия расходуется главным образом на второстепенные, а при больших — на главный элемент. В нашем случае, в интервале 1—100 кларков концентрации главного металла (олова) энергия расходуется на преобразование гранитоида в пустой кварцевый материал, тогда как на втором интервале — 100—650 000 кларков — она потребляется главным образом на концентрирование в рудах олова. Это вытекает из того, что при  $K_{Sn}=1$  вся энергия потребляется на создание жильного кварца, тогда как при  $K_{Sn}=1000$  на это расходуется всего 2,8%.

3. С ростом содержаний запасы падают.

Имея в виду общие особенности графика и ограничиваясь только такой областью содержаний, в которой расход энергии рудообразования определяется практически лишь концентрированием главного металла (олова), а расходами энергии на сжатие — разрежение второстепенных элементов можно пренебречь, получаем

$$E_n = \sum K_i \ln K_i \approx K_{Sn} \ln K_{Sn}. \quad (38)$$

Расчет расхода энергии рудообразования по этой формуле допустим с максимальной погрешностью 14,5% в начале, в области  $333,3 \leq K_{Sn} \leq 650\,000$ , или в переводе на проценты содержаний  $0,1 \leq C_{Sn} \leq 78,4\%$ , т. е. во всей области практически интересных содержаний.

Дифференцированные запасы  $P_K$  в единице объема

$$P_K = \frac{1/K_{Sn}}{K_{Sn} \ln K_{Sn}}, \quad (39)$$

где  $K_{Sn}$  — кларк концентрации главного металла.

Для перехода при расчете на металл обратим внимание, что количество его в единице объема пропорционально  $K_{Sn}$ , причем коэффициентом пропорциональности является цена единицы кларка концентрации в граммах (при принятой относительной системе расчета приравнивается единице).

Итак, при расчете на металл

$$P_K = \frac{1/K_{Sn}}{K_{Sn} \ln K_{Sn}/K_{Sn}} = \frac{1}{K_{Sn} \ln K_{Sn}}. \quad (40)$$

Допустимость этого хорошо иллюстрирует табл. 13. На рис. 8 приведен график запасов олова (металла) для интервала 0,1—78,4%.

При расчетах исходные содержания металла в рудах в весовых процентах предварительно необходимо перевести в кларки концентрации в единице объема. Формула (40) проста и очень удобна для дальнейшего использования, в частности для рас-

чета интегральных запасов по интервалам кларков концентраций. Для этого проинтегрируем выражение

$$P_K = \int_{K_i}^{K_m} \frac{dK}{K \ln K} = \int_{K_i}^{K_m} \frac{d \ln K}{\ln K} = \int_{K_i}^{K_m} d \ln \ln K, \quad (41)$$

откуда

$$P_K = \ln \ln K \Big|_{K_i}^{K_m}.$$

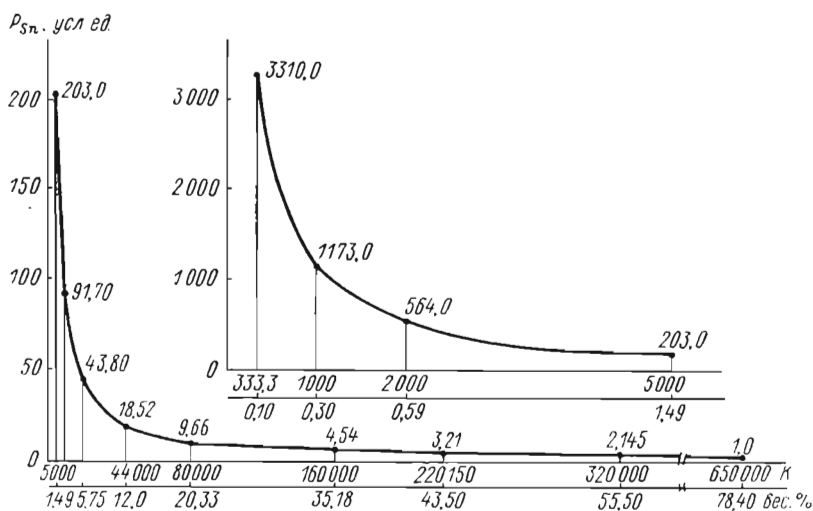


Рис. 8. Распределение олова в касситерит-кварцевых рудах в зависимости от содержаний в них металла.

Результаты расчета по этой формуле во всем интервале ее применения приведены в табл. 14.

Нижний предел руд 0,1 вес. % принят по условиям возможности применения формулы, верхний (78,4 вес. %) — по содержанию олова в чистом касситерите. Промежуточное содержание 43,5% принято по условиям ограничения, накладываемого на максимальное содержание формулой комплексного соединения  $\text{Na}[\text{Sn}(\text{F}, \text{OH})_6]$ , в форме которого, по В. Л. Барсукову [21], переносится олово. Остальные ограничительные градации выбраны по практическим соображениям.

Приведенные в табл. 14 средние запасы олова по интервалам в расчете на 1 кларк получены путем деления запасов олова в интервале на число кларков, заключенных в нем. Например, доля запасы металла на интервале 1000—10 230 кларков

## Относительные запасы кварцево-касситеритовых руд различных градаций

Градация руд	Интервалы содержания		Относительная доля запасов в общем балансе, %	Запасы на 1 кларк в интервале, вес. %
	вес. %	кларки концентрации		
Убогие	0,1—0,3	333,3—1000	20,70	$3,10 \cdot 10^{-2}$
Рядовые	0,3—3,0	1000—10 230	34,80	$3,77 \cdot 10^{-3}$
Богатые	3,0—12,0	10 230—44 000	17,65	$5,23 \cdot 10^{-4}$
Ультрабогатые				
А	12,0—43,5	44 000—220 150	16,80	$9,54 \cdot 10^{-5}$
В	43,5—78,4	220 150—650 000	10,05	$2,34 \cdot 10^{-5}$
Всего	0,1—78,4	333,3—650 000	100,00	$1,54 \cdot 10^{-4}$

(0,3—3,0 вес. %), равные 34,80% на число кларков в нем 9230, получаем  $3,77 \cdot 10^{-3}$  вес. %. Наблюдается уменьшение цены запасов на 1 кларк по мере роста их значений.

Некоторые общие выводы и рекомендации будут использованы ниже.

### Расчет дифференцированных запасов золота в кварцевых рудах

Как известно, главными типами коренных золоторудных месторождений являются золото-сульфидные и золото-кварцевые месторождения. Расчеты выполнены применительно к последнему типу, как более рельефно отображающему основные особенности коренных месторождений золота.

В качестве конкретных объектов выбраны гидротермальные среднетемпературные месторождения, залегающие в породах кровли или внутри массивов гранитоидов мезозойско-кайнозойского и палеозойского возраста. Рудные тела этого типа представлены обычно правильными выдержанными жилами. Минералогический состав руд следующий: кварц, карбонаты, барит, пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды. Золото присутствует в рудах как в самородном, так и в виде примесей в сульфидах. Рассматриваемый генетический тип широко распространен и имеет большое промышленное значение.

Исходные сведения по минералогическому и химическому составу расчетных руд представлены в табл. 15, 16. Следует заметить, что блеклые руды коррелируются с золотом и их содержание в руде растет по мере повышения содержания последнего, достигая в богатых золотом рудах 3,0—4,0%. В табл. 16 это учтено.

Минеральный состав золоторудного тела при минимальном содержании золота в руде

Наименование минералов	Канонический состав	Содержание в руде, об. %	Средняя плотность (по Дана)	Содержание, г/дм <sup>3</sup>	Элементный состав, г/дм <sup>3</sup>
Кварц	SiO <sub>2</sub>	80,6	2,66	2142,0	1011 — Si; 1131 — O
Барит	BaSO <sub>4</sub>	0,5	4,45	22,25	13,1 — Ba; 3,05 — S; 6,1 — O <sub>4</sub>
Кальцит	CaCO <sub>3</sub>	0,3	2,71	8,13	3,25 — Ca; 0,98 — C; 3,90 — O
Анкерит	Ca <sub>2</sub> MgFe (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	2,0	3,03	60,6	29,1 — O; 12,1 — Ca; 7,30 — C; 3,55 — Mg; 8,45 — Fe
Пеннин	Mg <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>18</sub> H <sub>6</sub>	1,0	2,72	27,2	4,12 — Si; 14,10 — O; 2,64 — Al; 0,40 — H; 5,94 — Mg
Серицит	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub> H <sub>2</sub>	2,0	2,88	57,6	12,2 — Si; 27,75 — O; 5,65 — K; 11,71 — Al; 0,29 — H
Альбит	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	3,0	2,61	78,3	25,2 — Si; 38,2 — O; 8,05 — Al; 6,85 — Na
Ортоклаз	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	5,0	2,57	128,5	38,9 — Si; 59,0 — O; 12,45 — Al; 18,15 — K 93,5 — Fe; 107,7 — S
Пирит	FeS <sub>2</sub>	4,0	5,03	201,0	
Блеклая руда	3Cu <sub>2</sub> SSb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,0	4,70	0,0	
Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	0,5	4,20	21,0	6,40 — Fe; 7,25 — Cu; 7,35 — S
Галенит	PbS	0,6	7,50	37,5	32,5 — Pb; 5,0 — S
Золото	Au	2 · 10 <sup>-3</sup>	19,40	4,37 · 10 <sup>-7</sup>	
Серебро	Ag	6 · 10 <sup>-7</sup>	10,50	7 · 10 <sup>-6</sup>	
Элементы-примеси	61 элемент	0,6		17,0	Различные элементы-примеси в минеральном и в безминеральном видах

Поскольку у А. П. Виноградова [16] не приведены геохимические параметры гранодиоритов, с которыми генетически связывают золоторудные месторождения, то приняты средние цифры между приведенными параметрами для гранитов и диоритов. Золото принято средней пробыности 600, при превалировании в лигатуре серебра.

Табл. 16 является исходной; все дальнейшие расчеты приведены согласно ее данным и в соответствии со схемой, приведенной в табл. 11. Результаты расчетов изложены в табл. 17. Расчеты из-за громоздкости не приводятся. Как видно из табл. 17 единообразная закономерная зависимость между запасами и содержаниями, определяемая преимущественно содержаниями са-

мого золота, устанавливается с 1 г/т и выше и выражается уточненными формулами для запасов металла

$$P_K = 1 / (K_{эф} \ln K_{эф}), \quad (42)$$

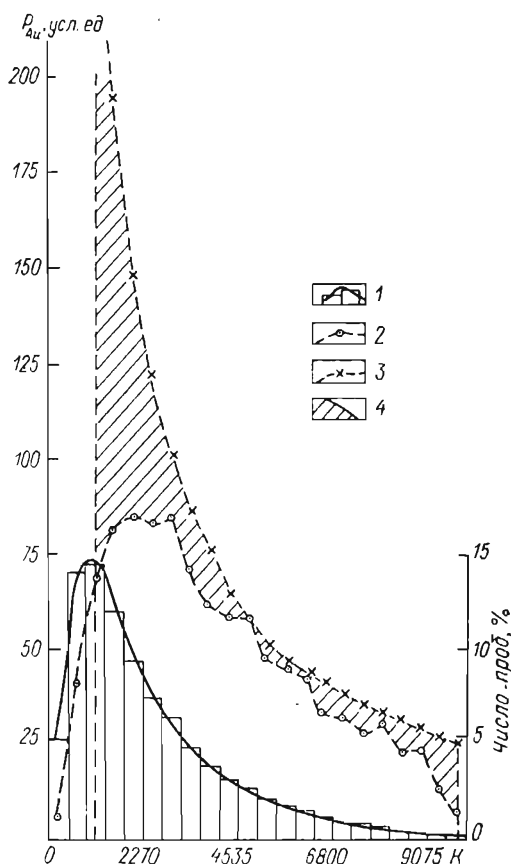
для запасов объемов

$$P_K = 1 / (K_{эф}^2 \ln K_{эф}), \quad (43)$$

где  $K_{эф} = 1,11 K_{Au}$ .

**Рис. 9.** Кривые практических (по Д. Криге) и теоретических запасов золота на руднике в Витватерсранде.

1 — диаграмма и кривая частотного распределения содержания золота в пробах; кривые распределения запасов золота: 2 — практических, 3 — теоретических, 4 — перспективных.



Формулы (42) и (43) использованы для построения табл. 18. Запасы металла вычислены интегрированием формулы (42), запасы объемов — интегрированием формулы (43). Из табл. 18 следует, что идентичны запасы золота (металла), полученные двумя независимыми путями. Данные табл. 18 имеют важное прикладное значение.

В качестве примера используются материалы по золоторудному месторождению Витватерсранд (Д. Криге). Гидротермальное происхождение золоторудного месторождения Витватерсранд признается не всеми. Интересна статистическая обработ-

Состав родоначальной породы и золото-кварцевых руд различных

Плотность, г/дм <sup>3</sup>	Au	Ag	Cu	Sb	S	O	Si
------------------------------	----	----	----	----	---	---	----

Исходный недифференцированный							
2801	$4,29 \cdot 10^{-7}$	$5,93 \cdot 10^{-6}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$	0,03	47,33	29,15

Производные золото-кварцевые руды

2801	$4,29 \cdot 10^{-7}$	$5,93 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,07	50,50	42,50
2801	$4,29 \cdot 10^{-6}$	$7,35 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,07	50,50	42,50
2802	$4,29 \cdot 10^{-5}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,07	50,50	42,50
2805	$1 \cdot 10^{-4}$	$6,69 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	1,09	50,50	42,50
2808	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	1,29	50,50	42,40
2813	$5 \cdot 10^{-4}$	$3,34 \cdot 10^{-4}$	0,03	$5 \cdot 10^{-4}$	1,61	50,00	42,21
2820	$1 \cdot 10^{-3}$	$6,66 \cdot 10^{-4}$	0,07	$1 \cdot 10^{-2}$	1,68	49,70	41,70
2830	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	0,11	$1,6 \cdot 10^{-2}$	1,77	49,36	41,20
2840	$5 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$	0,16	$3,17 \cdot 10^{-2}$	1,85	48,85	40,90
2850	$1 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	0,20	0,06	1,93	48,66	40,30
2860	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	0,49	0,15	2,06	47,95	40,30
2870	$5 \cdot 10^{-2}$	$3,48 \cdot 10^{-2}$	0,98	0,34	3,06	46,85	39,40
2880	0,10	0,067	1,91	0,62	5,11	44,97	37,40
2896	0,25	0,169	1,89	0,93	5,10	44,75	37,13
2910	0,50	0,326	1,88	1,04	5,06	44,50	36,90
2931	1,00	0,665	1,87	1,04	5,03	44,16	36,56
2970	2,00	1,31	1,85	1,02	4,96	43,48	35,80

ка по единой системе десятков тысяч проб. Д. Криге подчеркивает, что несмотря на кажущееся хаотическое распределение золота в конгломератах, при статистической обработке достаточно большого количества данных анализов проб обнаруживаются регулярные и закономерные тенденции в их распределении по градациям содержаний. При этом Д. Криге считает возможной аппроксимацию подобного распределения логнормальной кривой. Для анализа и выводов мы взяли основную кривую распределения проб золота по градациям Д. Криге (рис. 9).

Теоретические запасы были подсчитаны по приведенным соотношениям. Все результаты даны в табл. 19, необходимая гра-

фика — на рис. 9. Исходные данные (по Д. Криге) в табл. 19 пересчитаны в граммы на 1 т.

Условные запасы по Д. Криге рассчитаны путем перемножения количества проб, %, на средние содержания в них золо-

Таблица 16

кондий, принятый к расчету, вес. %

Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	H	C	Ba	Pb	Tl	Элементы примеси	Количество молей
материал (гранодиорит)												
8,18	4,28	3,11	2,89	2,82	1,37	0,09	0,025	0,074	$1,75 \cdot 10^{-3}$	0,51	0,61	135,0
различных содержаний по золоту												
1,24	0,83	0,54	0,24	0,84	0,34	0,02	0,29	0,47	$1,75 \cdot 10^{-3}$	0,51	0,61	135,0
1,24	0,83	0,54	0,24	0,84	0,34	0,02	0,29	0,47	$1,75 \cdot 10^{-3}$	0,51	0,61	135,0
1,24	0,83	0,54	0,24	0,84	0,34	0,02	0,29	0,47	$1,75 \cdot 10^{-3}$	0,51	0,61	135,8
1,24	0,89	0,54	0,24	0,84	0,34	0,02	0,29	0,47	$1,75 \cdot 10^{-2}$	0,51	0,61	136,0
1,24	0,89	0,54	0,24	0,84	0,34	0,02	0,29	0,47	$5,35 \cdot 10^{-2}$	0,51	0,61	135,9
1,24	0,89	0,54	0,24	0,84	0,34	0,02	0,29	0,47	0,16	0,51	0,61	135,7
1,24	1,59	0,54	0,24	0,84	0,34	0,02	0,29	0,46	0,16	0,51	0,61	136,9
1,23	2,33	0,54	0,24	0,84	0,34	0,02	0,29	0,46	0,14	0,50	0,61	136,7
1,23	3,06	0,54	0,23	0,83	0,34	0,02	0,29	0,46	0,11	0,49	0,60	136,6
1,22	3,78	0,53	0,23	0,83	0,32	0,02	0,28	0,46	0,11	0,48	0,59	136,8
1,22	3,78	0,53	0,23	0,83	0,32	0,02	0,28	0,45	0,28	0,48	0,59	136,2
1,21	3,78	0,53	0,23	0,83	0,32	0,02	0,28	0,44	0,57	0,48	0,59	134,7
1,21	3,76	0,53	0,23	0,83	0,32	0,02	0,28	0,44	1,13	0,48	0,59	132,3
1,20	3,74	0,53	0,23	0,82	0,32	0,02	0,28	0,44	1,12	0,48	0,59	132,3
1,20	3,73	0,53	0,23	0,81	0,32	0,02	0,28	0,44	1,12	0,48	0,58	132,3
1,18	3,70	0,52	0,23	0,81	0,32	0,02	0,28	0,44	1,11	0,48	0,58	132,3
1,17	3,65	0,52	0,23	0,80	0,32	0,02	0,28	0,44	1,09	0,48	0,58	132,2

та, г/т. Условные теоретические запасы рассчитаны по соотношению

$$K'_{эф} \ln K'_{эф} / (K''_{эф} \ln K''_{эф}) < 1. \quad (44)$$

За исходную цифру для обоих запасов принят практический запас 57,2 усл. ед. при  $K_{Au} = 4760$  (20,40 г/т).

Среднее содержание в обнаруженных запасах по Д. Криге (см. рис. 9) равняется 12,8 г/т и точно соответствует частному от деления всех практических запасов на число всех проб. Складывается впечатление, что выработывались практически полностью все руды с содержаниями выше среднего, а более бедные — лишь частично.



Расчеты энергии рудообразования, запас

Плотность руды, г/дм <sup>3</sup>	Содержание золота в руде			Расход энергии рудообразования на 1 дм <sup>3</sup> , усл. ед.	
	вес. %	г/т	K	Суммарный	На золото
2801	4,29·10 <sup>-7</sup>	4,29·10 <sup>-3</sup>	1	234	0
2801	4,29·10 <sup>-6</sup>	4,29·10 <sup>-2</sup>	10	257	23
2802	4,29·10 <sup>-5</sup>	0,429	100	702	461
2805	1,0·10 <sup>-1</sup>	1,0	234	1566	1 280
2808	2,5·10 <sup>-1</sup>	2,5	585	4290	3 725
2813	5,0·10 <sup>-1</sup>	5	1 170	9324	8 265
2820	1,0·10 <sup>-3</sup>	10	2 340	2,13·10 <sup>4</sup>	18 130
2830	2,5·10 <sup>-3</sup>	25	5 880	5,8182·10 <sup>4</sup>	51 050
2840	5,0·10 <sup>-3</sup>	50	11 830	12,566·10 <sup>4</sup>	1,11·10 <sup>5</sup>
2850	1,0·10 <sup>-2</sup>	100	23 750	26,957·10 <sup>4</sup>	2,38·10 <sup>5</sup>
2860	2,5·10 <sup>-2</sup>	250	59 500	7,4·10 <sup>5</sup>	6,54·10 <sup>5</sup>
2870	5,0·10 <sup>-2</sup>	500	11,92·10 <sup>4</sup>	1,58·10 <sup>6</sup>	13,95·10 <sup>5</sup>
2880	0,10	1000	24,05·10 <sup>4</sup>	3,38·10 <sup>6</sup>	29,8·10 <sup>5</sup>
2896	0,25	2,5·10 <sup>3</sup>	60,4·10 <sup>4</sup>	8,63·10 <sup>6</sup>	78,7·10 <sup>5</sup>
2910	0,50	5·10 <sup>3</sup>	12,16·10 <sup>5</sup>	18,2·10 <sup>6</sup>	170,7·10 <sup>5</sup>
2931	1,00	10 <sup>4</sup>	24,4·10 <sup>5</sup>	37,8·10 <sup>6</sup>	35,9·10 <sup>6</sup>
2970	2,00	2·10 <sup>4</sup>	50·10 <sup>5</sup>	80,57·10 <sup>6</sup>	77,1·10 <sup>6</sup>

Расчет относительных запасов золота (металла)

Интервалы содержаний золота			Плотность руд на интервале, г/дм <sup>3</sup>	Условные запасы золота	
вес. %	г/т	K		расчет	приведенные к единице, %
(1—2,5)·10 <sup>-1</sup>	0,1—2,5	234—585	2806	0,1524	15,00
(2,5—5)·10 <sup>-1</sup>	2,5—5,0	585—1 170	2809	0,1003	9,70
(5—10)·10 <sup>-1</sup>	5—10	1 170—2 340	2814	0,0937	9,00
(1—2,5)·10 <sup>-3</sup>	10—25	2 340—5 880	2823	0,1120	10,80
(2,5—5)·10 <sup>-3</sup>	25—50	5 880—11 830	2833	0,0761	7,50
(5—10)·10 <sup>-3</sup>	50—100	11 830—23 750	2843	0,0714	6,85
(1—2,5)·10 <sup>-2</sup>	100—250	23 750—59 500	2854	0,0864	8,45
(2,5—5)·10 <sup>-2</sup>	250—500	59 500—119 200	2863	0,0602	5,85
0,05—0,10	500—1 000	119 200—240 500	2873	0,0581	5,65
0,10—0,25	1 000—2 500	240 500—604 000	2886	0,0710	6,93
0,25—0,50	2 500—5 000	604 000—1 216 000	2903	0,0513	4,99
0,5—1,0	5 000—10 000	1 216 000—2 440 000	2917	0,0486	4,73
1,0—2,0	10 000—20 000	2 440 000—5 000 000	2945	0,0466	4,55
1·10 <sup>-1</sup> —2,0	1—20 000	234—5 000 000	2806—2945	Σ = 1,0270	Σ = 100

Таблица 17

золота (металла) и объемов руд

$K_{\text{эф}}$	$K_{\text{эф}} : K_{\text{Au}} \%$	Принимаемое к расчету $K_{\text{эф}} = 1,11 K_{\text{Au}}$	Расчетная энергия рудообразования $E_{\text{п}} = K_{\text{эф}} \ln K_{\text{эф}}$	Дифференцированный запас золота, усл. ед.		Дифференцированные запасы объемов золотосодержащих руд, усл. ед.	
				$\frac{1}{K_{\text{эф}} \ln K_{\text{эф}}}$	приведенный к единице	$\frac{1}{K_{\text{эф}} \ln K_{\text{эф}}}$	приведенные к единице
57	—	—	—	—	—	—	—
62	415,0	—	—	—	—	—	—
142	142,0	—	—	—	—	—	—
278	118,5	260	1 445	$6,92 \cdot 10^{-4}$	59 500	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$1,41 \cdot 10^9$
661	113,0	650	4 210	$2,375 \cdot 10^{-4}$	20 400	$3,66 \cdot 10^{-7}$	$1,74 \cdot 10^8$
1300	111,0	1300	9 320	$1,073 \cdot 10^{-4}$	9 240	$8,25 \cdot 10^{-8}$	$3,925 \cdot 10^7$
2700	115,2	2600	20 450	$4,90 \cdot 10^{-5}$	4 215	$1,88 \cdot 10^{-8}$	$8,98 \cdot 10^6$
$6,65 \cdot 10^3$	113,0	6540	57 500	$1,74 \cdot 10^{-5}$	1 495	$2,66 \cdot 10^{-9}$	$1,26 \cdot 10^6$
$12,25 \cdot 10^3$	112,8	$13,1 \cdot 10^3$	124 200	$8,045 \cdot 10^{-6}$	690	$6,14 \cdot 10^{-10}$	292 000
$26,5 \cdot 10^3$	111,5	$26,4 \cdot 10^3$	268 500	$3,72 \cdot 10^{-6}$	320	$1,41 \cdot 10^{-10}$	67 100
$67 \cdot 10^3$	112,5	$66 \cdot 10^3$	732 500	$1,366 \cdot 10^{-6}$	117,5	$2,07 \cdot 10^{-11}$	9 865
$133 \cdot 10^3$	111,5	$132 \cdot 10^3$	1 554 000	$6,43 \cdot 10^{-7}$	55,3	$4,86 \cdot 10^{-12}$	2 320
$27 \cdot 10^4$	112,5	$267 \cdot 10^3$	3 330 000	$3,00 \cdot 10^{-7}$	25,8	$1,123 \cdot 10^{-12}$	535
$65 \cdot 10^4$	107,5	$67 \cdot 10^4$	$0,9 \cdot 10^6$	$1,11 \cdot 10^{-7}$	9,56	$1,658 \cdot 10^{-13}$	79,0
$13 \cdot 10^5$	106,8	$135 \cdot 10^4$	$1,90 \cdot 10^7$	$5,24 \cdot 10^{-8}$	4,50	$3,88 \cdot 10^{-14}$	18,50
$25,6 \cdot 10^5$	105,0	$271 \cdot 10^4$	$4,015 \cdot 10^7$	$2,49 \cdot 10^{-8}$	2,14	$9,19 \cdot 10^{-15}$	4,37
$52,5 \cdot 10^5$	105,0	$555 \cdot 10^4$	$8,61 \cdot 10^7$	$1,162 \cdot 10^{-8}$	1,0	$2,10 \cdot 10^{-15}$	1,0

Таблица 18

золото-кварцевых руд по интервалам содержаний

в интервалах	Условные запасы объемов руды		Условные массы руды, $10^{-3}$	Средне-взвешенное содержание золота, г/т	Условные запасы золота-металла на интервалах	
	на кларк металла, %	расчетные цифры на ЭВМ			расчет	%
$4,29 \cdot 10^{-2}$	$0,3885 \cdot 10^{-3}$	65,07	182,5	1,5	274	14,7
$1,655 \cdot 10^{-2}$	$1,1348 \cdot 10^{-4}$	19,00	53,5	3,5	187,5	10,05
$7,70 \cdot 10^{-3}$	$0,5147 \cdot 10^{-4}$	8,61	24,2	7	169,5	9,10
$3,05 \cdot 10^{-3}$	$2,8098 \cdot 10^{-5}$	4,70	13,25	16	212,0	11,35
$1,26 \cdot 10^{-3}$	$0,8424 \cdot 10^{-5}$	1,41	4,0	35	140,0	7,50
$5,75 \cdot 10^{-4}$	$0,3929 \cdot 10^{-5}$	0,658	1,87	70	131,0	7,03
$2,36 \cdot 10^{-4}$	$2,1513 \cdot 10^{-6}$	0,360	1,025	150	154,0	8,26
$9,80 \cdot 10^{-5}$	$0,6644 \cdot 10^{-6}$	$9,21 \cdot 10^{-2}$	0,264	350	92,5	4,97
$4,65 \cdot 10^{-5}$	$3,1660 \cdot 10^{-7}$	$5,31 \cdot 10^{-2}$	0,153	700	107,0	5,75
$1,91 \cdot 10^{-5}$	$1,7490 \cdot 10^{-7}$	$2,93 \cdot 10^{-2}$	0,085	1 500	127,5	6,85
$8,15 \cdot 10^{-6}$	$0,5478 \cdot 10^{-7}$	$9,18 \cdot 10^{-3}$	0,027	3 500	94,5	5,06
$3,86 \cdot 10^{-6}$	$2,5777 \cdot 10^{-8}$	$4,32 \cdot 10^{-3}$	0,013	7 000	91,0	4,88
$1,775 \cdot 10^{-6}$	$1,2483 \cdot 10^{-8}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$	0,006	14 000	84,0	4,50
Среднее $2,0 \cdot 10^{-5}$	$\Sigma = 5,9735 \times 10^{-4}$	$\Sigma = 100,00$	$\Sigma = 280,9$	Среднее 6,63	1864,5	100,0

## Результаты обработки кривой распределения проб (по Д. Криге)

Пересчитанные данные			Условные запасы	
Среднее содержание на 1 м, г/т	$K_{Au}$	$K_{Эф} \cdot 1.11 K_{Au}$	По данным Д. Криге	Теоретические
0,972	228	253	5,05	1860,0
2,91	680	755	41,00	520,0
4,85	1130	1 255	70,00	288,0
6,80	1590	1 765	81,50	195,0
8,755	2040	2 265	83,20	147,5
10,70	2500	2 780	80,20	117,5
12,80	2940	3 260	80,80	98,0
14,60	3400	3 775	70,00	83,3
16,50	3840	4 255	62,60	72,6
18,45	4310	4 795	57,10	63,6
20,40	4760	5 295	57,20	57,2
22,30	5200	5 770	48,40	51,6
24,25	5625	6 275	46,00	47,1
26,20	6110	6 800	44,50	43,1
28,20	6580	7 300	33,85	40,0
30,10	7020	7 800	33,10	37,1
32,0	7460	8 300	28,80	34,6
33,9	7900	8 770	30,50	32,5
35,9	8380	9 300	21,50	30,4
37,9	8850	9 825	22,75	28,7
39,8	9300	10 330	11,85	27,1
41,8	9750	10 820	8,36	25,7

**Расчет дифференцированных запасов меди  
в месторождениях порфириновых  
прожилково-вкрапленных руд**

В качестве медных гидротермальных месторождений выбираются широко распространенные медные месторождения порфириновых прожилково-вкрапленных и тесно связанных с ними кварц-сульфидных жильных руд. Таким образом удастся охватить широкий круг содержаний меди в рудах. Необходимые сведения по выбранным типам рудных медных месторождений взяты из опубликованных работ [26, 45, 63].

Медно-порфириновые месторождения представляют собой характерный генетический и важный промышленный тип медных месторождений, заключающий в себе в капиталистических и развивающихся странах половину запасов меди. Их высокая промышленная ценность определяется крупными размерами рудных тел, неглубоким залеганием, равномерным распределением металла в рудах. В мире эти месторождения распространены достаточно широко. В Северной Америке представители этого типа приурочены к складчатым сооружениям Кордильер и Анд

и особенно часты в области юго-западных штатов, где известны месторождения Майами, Сан-Мануэл, Рей и др. Известны крупные месторождения в Чили и Перу (Чукикамата, Эль-Тениенте, Эль-Сальвадор, Токепала и др.). Предполагают существование Малазийского пояса медно-порфировых руд (месторождения Бугенвиль, Сиполай, Толедо, Лусон); разрозненные месторождения известны в Иране (Сар-Чешмет), в Югославии (Майданек) и др. Большинство упомянутых месторождений по запасам велико: в каждом содержится по 3—4 млн. т металла, в Чукикамате 15 млн. т.

В Советском Союзе к этому типу относятся месторождения Коунрад, Бошекуль, Коксай, Алмалык, Калжаран, Агарак и др. Породы, вмещающие медно-порфировое оруденение, это в основном диориты, сиенит-порфиры, монцониты, гранодиориты, гранит-порфиры, эффузивы среднего состава.

Медно-порфировые месторождения представляют собой штокверки — зоны гидротермально измененных пород, окварцованных, серицитизированных, хлоритизированных, каолинизированных, пронизанных сетью существенно кварцевых, кварц-полевошпатовых или кальцитовых прожилков с гнездовыми выделениями, зернами и примазками рудных минералов. Значительная часть полезных компонентов содержится также в виде мелкой вкрапленности в массе породы. На некоторых месторождениях часть прожилков сложена только рудными минералами. Мощность прожилков чаще всего измеряется миллиметрами и сантиметрами, длина по простиранию — сантиметрами и первыми метрами; те же размеры имеют прожилки по падению. Площадь выходов штокверков измеряется в ряде случаев квадратными километрами; по падению они нигде не оконтурены, хотя на отдельных месторождениях прослежены скважинами на 1000 м. Промышленные рудные тела оконтуриваются по опробованию.

Интересующие нас первичные, неизменные руды залегают на некоторой глубине (до 200 м в среднем) под зоной окисления. В составе первичных руд преобладают среди рудных минералов пирит и халькопирит (как правило в равных количествах), иногда борнит, энаргит и другие медные минералы. Часто присутствует молибденит, однако наблюдается пространственное разьединение медного и молибденового оруденения. Содержание меди, как правило, бедное (0,4—1,2%), редко (в прожилках) — богатое, молибдена 0,006—0,015%. Среди жильных минералов присутствуют кварц, серицит и др. Кроме меди (и молибдена) представляет интерес содержание во многих медных концентратах золота, серебра, селена, теллура, висмута, а в молибденовых — рения, селена, теллура.

Кварц-сульфидные (жильные) проявления меди распространены довольно широко, однако промышленные представители этого типа встречаются редко. Из зарубежных месторождений

наиболее крупным является Бьютт (США); в СССР — промышленные жильные месторождения Кафан, Чатыркуль и Жайсан.

По общей геотектонической позиции жильные месторождения меди имеют много общих черт с месторождениями медно-порфирового типа, в строении которых они нередко принимают участие в качестве самостоятельного структурного элемента (Чукикамата). Минеральный состав кварц-сульфидных жильных руд также имеет много общего с первичными медно-порфировыми рудами. Среднее содержание меди в рудах месторождения Бьютт 5%. В некоторых месторождениях, как, например, в том же Бьютт, халькопирит заменяется энаргитом, пирит — магнетитом, как это имеет место в Чатыркуле. Длина кварц-сульфидных рудных тел по простиранию и по падению колеблется от первых сотен метров до 1000 м, мощность меняется от единиц до десятков метров. Рудные тела сопровождаются зонами гидротермальных изменений.

Ниже приводятся результаты подсчета энергии рудообразования медных порфировых руд, при этом сделаны следующие предположения.

1. За исходную породу принимается гранодиорит. Геохимические параметры породы предполагаются средними между параметрами гранитов и диоритов [16].

2. Процесс рудообразования считается изотермическим.

3. Рудный материал месторождений представлен смесью халькопирита ( $\text{CuFe}_2\text{S}_2$ ) и пирита ( $\text{FeS}_2$ ), каждого минерала в равных молекулярных количествах. В этом случае эффективный состав искусственного минерала можно описать формулой  $\text{CuFeS}_4$ , согласно которой на 1 моль меди приходится 2 моля железа и 4 моля серы или на 1 г меди — 1,755 г железа и 2,02 г серы. Плотность смеси равняется  $4650 \text{ г/дм}^3$ , общее содержание в этом объеме (в расчете на чистую минеральную смесь халькопирита и пирита) 107 молей.

4. Жильные минералы представлены смесью серицита  $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{H}_2$  и кварца  $\text{SiO}_2$  для бедных руд (до 5,2% по меди) и одним кварцем для богатых (начиная с 6,73% по меди).

5. Примеси малых элементов приняты такими же, как и в исходном гранодиорите.

6. Расчеты выполнены по табл. 11.

В табл. 20 приведены сводные результаты произведенных расчетов. К табл. 20 следует сделать пояснения.

Кривая, отображающая зависимость запасов меди от кларков концентрации в порфировых месторождениях, представлена на рис. 10. Из рис. 10 видно, что кривая имеет перегиб в промежутке 1—100 кларков. Со 100 кларков и далее кривая имеет монотонно затухающий вид; в промежутке 1—37 кларков по меди кривая имеет неизменно возрастающий характер. На самом же деле теоретическая кривая должна иметь на всем промежутке 1—12 662 кларка монотонно затухающий характер. Откло-

Расчеты энергии рудообразования и запасов меди (металла)  
в медно-порфириновых рудах

Плотность руды, г/дм <sup>3</sup>	K <sub>Сu</sub>	Содержание меди, %	Расход энергии рудообразования на 1 дм <sup>3</sup> , усл. ед.	K <sub>эф</sub>	K <sub>эф</sub> /K <sub>Сu</sub> , %	Расход энергии рудообразования в расчете на 1 кларк концентрации меди, усл. ед.	Запас меди по формуле (46), 10 <sup>-4</sup>	Запас P <sub>Сu</sub> , усл. ед.
2800	1	2,7 · 10 <sup>-3</sup>	96	28,5	2850	96,0	3,655	57,60
2800	10	2,7 · 10 <sup>-2</sup>	117	33,5	335	11,7	25,5	402,0
2805	37	0,10	233	58,0	152	6,3	27,4	431,50
2807	100	0,27	592	123,0	123	5,92	13,74	216,50
2817	270	0,72	1 773	310,0	115	6,58	4,91	77,40
2882	568	1,49	4 148	640,0	113	7,30	2,14	33,70
2900	630	1,64	4 670	712,0	113	7,42	1,895	29,90
2930	800	2,06	6 143	904,0	113	7,68	1,442	22,70
3088	1 560	3,80	13 141	1 760,0	113	8,42	0,675	10,62
3215	2 216	5,20	19 525	2 500,0	113	8,82	0,454	7,15
3355	3 000	6,73	27 527	3 390,0	113	9,17	0,322	5,07
3590	5 000	10,50	48 845	5 650,0	113	9,77	0,181	2,85
3953	7 500	14,32	76 864	8 480,0	113	10,24	0,115	1,81
4320	10 000	17,50	105 803	11 330,0	113	10,58	0,0834	1,31
4650	12 662	20,55	138 518	14 400,0	113	10,93	0,0635	1,00

нение объясняется тем, что в начале кривой согласно принятым условиям подавляющая часть энергии рудообразования расходуется не на концентрацию совокупности рудных элементов — меди, серы, железа, а на концентрирование петрогенных элементов — силиция, калия и других — с одновременным уменьшением концентрирования, требуемым сохранением суммарного числа молей, также петрогенных элементов — магния, натрия, кальция и др. Однако с точки перегиба кривой (~ 100 кларков концентрации по меди) энергия в основном начинает расходоваться на концентрирование рудных элементов и кривая в целом приобретает теоретически предсказываемый вид.

На всем участке 100—12 662 кларков концентрации по меди, как показывает анализ, энергия рудообразования, зависящая от концентрирования — деконцентрирования петрогенных элементов, все время снижается (от 11,9% при 100 кларках и практически до нуля при кларках концентрации 5000 и выше). Отсюда следует, что с этого предела (100 кларков и далее) практически вся энергия рудообразования определяется концентрированием только рудных элементов — меди, серы и железа.

Характерной особенностью участка кривой 100—12 662 кларков концентрации по меди является, во-первых, зависимость энергии рудообразования от эффективного кларка concentra-

ции  $K_{эф}$ , учитывающего расходы на концентрирование не только одной меди, но и всей совокупности рудных элементов (меди, серы, железа), во-вторых, прямая зависимость  $K_{эф}$  от коэффициента концентрации  $K_{Cu}$  главного элемента — меди, выражаемая постоянным коэффициентом пропорциональности  $K_{эф}/K_{Cu} = 113\%$ . Выше, в разделе, посвященном олову, была выведена упрощенная формула (40), выражающая уравнение кривой

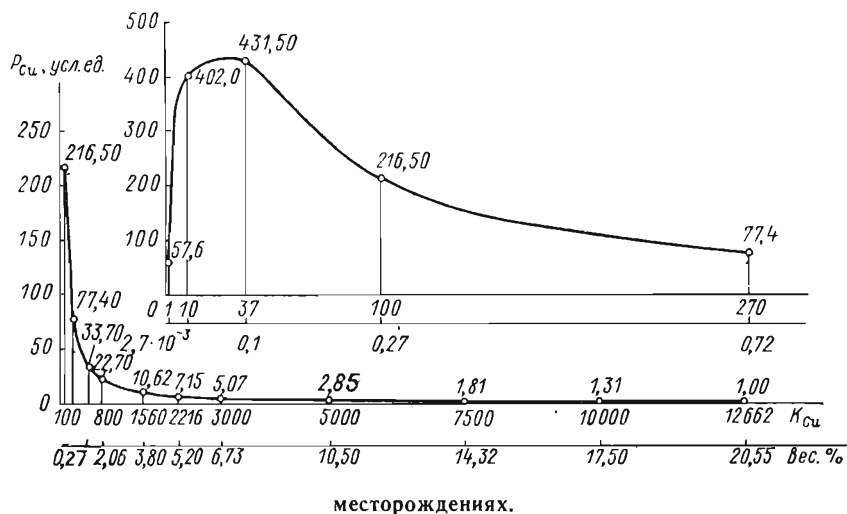


Рис. 10. График дифференцированных запасов меди в медно-порфировых  $P_K = f(K)$ , она справедлива для области содержаний олова в руде от 333 (0,1%) до 650 000 кларков (78,40%).

Для рассматриваемого случая меди подобная ситуация возникает с кларка концентрации по меди, равного 100 (0,27%) и выше (до 12 662 кларков, отвечающих 20,55% содержания меди). Однако очевидное требование учета всей потребленной энергии рудообразования в рассматриваемом случае меди требует введения в рассмотрение эффективного кларка концентрации  $K_{эф}$ . В соответствии с изложенным запишем

$$P_K = \frac{1/K_{эф}}{K_{эф} \ln K_{эф}}.$$

В расчете на 1 кларк меди формула будет иметь вид

$$P_K = \frac{1/K_{эф}}{K_{эф} \ln K_{эф}/K_{Cu}}, \quad (45)$$

заменяя  $K_{Cu} = K_{эф}/1,13$ , получаем

$$P_{Cu} = \frac{1/K_{эф}}{K_{эф} \ln K_{эф}/(K_{эф}/1,13)} = \frac{0,885}{K_{эф} \ln K_{эф}}. \quad (46)$$

В результате получаем упрощенную формулу для  $P_K = f(K_{Cu})$  в интервале 100 (0,27%) — 12 662 (20,55%) кларков по меди.

Интегрируя выражение (46), получаем формулу для расчета запасов меди в заданном интервале  $K_{эф}$ :

$$P_{K_{Cu}} \Big|_{K_{эф i}}^{K_{эф m}} = 0,885 \ln \ln K_{эф} \Big|_{K_{эф i}}^{K_{эф m}}. \quad (47)$$

В табл. 21 приведены результаты расчетов по этой формуле.

Таблица 21

**Расчет относительных запасов медных руд различных градаций  
в медно-порфириновых месторождениях**

Градация руд	Интервалы содержаний		Результаты вычислений		Запасы на 1 кларк. вес. % от суммарных запасов
	вес. %	кларки содержаний $K_{Cu}$	по формуле $P_K = \ln(\ln K_{эф})$	%	
Убогие	0,27—1,00	100—377	0,219	35,0	0,1265
Рядовые	1,00—3,80	377—1560	0,187	30,0	0,0253
Богатые	3,80—20,55	1560—12 662	0,219	35,0	0,0031
<b>Всего</b>	<b>0,27—20,55</b>	<b>100—12 662</b>	<b>0,625</b>	<b>100,0</b>	<b>0,0079</b>

Интервалы содержаний руд выбраны согласно практическим данным. Средние запасы вычислены способом, примененным выше в разделе, касающемся олова.

Крайне интересными являются цифры, полученные сопоставлением теоретически найденных запасов при определенных содержаниях меди металла, с одной стороны, с другой — практически определенной добычи того же металла при тех же содержаниях [1, 26, 73]. Эти сведения даны в табл. 22, из которой следует, что максимальные расхождения между теоретическими и практическими запасами в долях теоретических запасов, составляют 14,5% (при содержаниях 2,06% меди) и 12% (при содержаниях 0,72 и 1,49% меди).

Добавим, что для халькопирит-колчеданных руд [70] максимальные отклонения составляют 11% для содержания меди, равного 2,06%, 150% для содержания 0,90%, принятого условно. Рассчитана энергия рудообразования чисто халькопиритовых руд, с одновременным преобразованием в подобную руду исходного гранодиорита. Выявление аналогичных соотношений в этом случае дало максимальные расхождения 5,8% (при 2,06% меди) и 24,5% (при 0,75% меди).



Сопоставление практических и теоретических данных по добыче меди

Содержание меди в рудах, вес. %	Кларк концентрации $K_{Cu}$	Теоретические запасы меди		Практические запасы меди		Отношение запасов фактических к теоретическим, %	Примечание
		условные	отн. ед.	пропорциональные добыче за 10 лет, млн. т	отн. ед.		
0,72	270	77,40	10,82	31,043	12,15	112	Средневзвешенное содержание 0,72 принято согласно отдельным публикациям. Все остальные цифры из работы Г. Г. Гудалина и Ф. Н. Ковалева [26]
1,49	568	33,70	4,72	13,547	5,30	112	
1,64	630	29,90	4,18	11,056	4,33	103,6	
2,06	800	22,70	3,17	6,920	2,71	85,5	
3,80	1560	10,62	1,49	3,764	1,475	98,9	
5,20	2216	7,15	1,00	2,557	1,0	100,0	

Все это достаточно убедительно свидетельствует о реальности термодинамического подхода при решении задачи теоретического определения запасов руд с различным содержанием металла.

### Расчет дифференцированных запасов железа в скарновых месторождениях магнетитовых руд

В качестве гидротермальных (и близких к ним по главному рудоносному агенту) месторождений железа выбираются широко распространенные скарновые месторождения магнетитовых руд. Тем самым удастся охватить весьма широкий круг содержаний металла в рудах, при коротком ряде кларков концентрации, сопровождаемый неизменными переработками состава как исходной породы, так и скарна — новообразования из нее.

Промышленным типом скарновых железорудных месторождений является распространенный в Советском Союзе тип магнетитовых месторождений в известковых скарнах: Магнитогорское, Высокогорское, Соколовско-Сарбайское, Тельбесское, Темиртау и другие, а также некоторые зарубежные. Рассматриваемый тип месторождений характеризуется достаточно сложным, по крайней мере двухступенчатым генезисом, в котором решающую роль играют гидротермальные растворы, и (как все месторождения железа) имеет короткий ряд кларков концентрации, поэтому он выбран как объект расчетов.

Известковые скарны образуются в контактах любых карбонатных пород (известняков, доломитов, известковых сланцев,

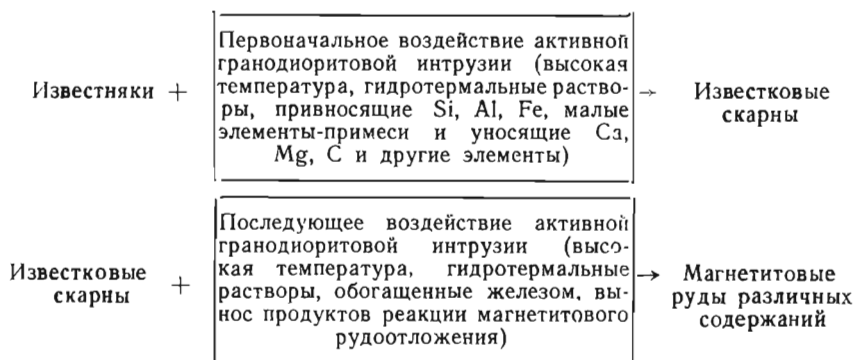
мергелей и др.) с активными интрузивными породами, преимущественно гранодиоритового состава. Среди этих скарнов наибольшим распространением пользуется биметасоматический, существенно диффузионного типа. В этом случае из главнейших скарно- и рудообразующих элементов кремний, алюминий, железо диффундируют из гранитоидов в известняки, а кальций (и магний) из известняков. Считается, что реакции протекают на глубине нескольких километров при температуре 750—450° С. Типомофными минералами рассматриваемых скарнов являются гранаты ряда гроссуляр — андрадит и салиты-пироксены изоморфной серии диопсид — геденбергит. Отмечается присутствие волластонита, родонита, везувиана, эпидота, скаполитов, полевых шпатов, а среди акцессориев — сфена и апатита. Для известковых скарнов магнетитовых месторождений характерны, в среднем, гранаты состава гроссуляр (40%), андрадит (60%) и салиты состава диопсид (60%), геденбергит (40%).

Скарновыми называются месторождения, позиционно (по условиям залегания) и генетически (по общности процессов образования) связанные со скарнами. Эти месторождения формируются в результате закономерного сочетания процессов образования и оруденения скарнов, представляющих отдельные этапы единого гидротермального процесса. Различают два основных типа оруденения в скарновых месторождениях — наложенное и сопутствующее. Скарновые месторождения с наложенным оруденением представлены шеелит-молибденитовыми, шеелит-сульфидными, бериллиевыми, халькопиритовыми и другими рудами. Этот тип мы не рассматриваем. Интересующие нас скарновые магнетитовые месторождения принадлежат к сопутствующему типу.

Оруденение скарнов сопутствующего типа следует непосредственно за процессами скарнообразования; оно возникает в результате взаимодействия со скарнами, эволюционирующими в сторону кислотности, гидротермальных растворов. В результате этого взаимодействия замещаются катионы сильных оснований (кальция, магния) катионами слабых, в частности двух- и трехвалентным железом, а радикалы слабых кремниевых кислот — радикалами более сильных поликремниевых, алюмокремниевых и других кислот. Последний процесс имеет место при образовании других формаций сопутствующего оруденения (флогопитового, борного, сульфидного). Ведущим минералом железных месторождений в известковых скарнах является магнетит, иногда в сопровождении гематита, пирита, пирротина. В то же время оруденение скарнов магнетитом часто сопровождается различными изменениями минералов рудовмещающих скарнов, выражающимися в возникновении более железистых разновидностей.

Приведенные сведения для рассматриваемых месторождений позволяют сформулировать краткие положения, непосредственным образом связанные с энергетическими подсчетами.

1. Принимается следующая схема образования магнетитовых месторождений в известковых скарнах.



2. Рассчитывается процесс образования магнетитовых руд по скарнам.

3. Исходный химико-минералогический состав известковых скарнов берется из табл. 23.

4. Состав и количество «малых» элементов-примесей в сплошных магнетитовых скарновых рудах расшифрованы в табл. 24, составленной по данным В. А. Вахрушева [9].

Содержания элементов Na, K, Ti, H, P, Mn, V, «малых» рудообразующих в безрудных скарнах принимаются равными таковым в магнетитовых рудах; этот показатель равен 31 г/дм<sup>3</sup>.

**Исходный химико-минералогический**

Показатели минералов известкового скарна	Магнетит	Кальцит	Волластонит
Канонические составы минералов	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaSiO <sub>3</sub>
Плотность минералов, г/дм <sup>3</sup>	5050	2700	2840
Содержание элементов, предусматриваемое каноническими уравнениями минералов, г/дм <sup>3</sup>			
O	13,8	51,9	58,6
Si	—	—	34,4
Al	—	—	—
Fe <sub>маг</sub>	36,2	—	—
Fe <sub>сил</sub>	—	—	—
Ca	—	43,1	49,0
Mg	—	—	—
C	—	13,0	—
Содержание минералов в скарне, об. %	1,0	4,0	5,0
То же, г/дм <sup>3</sup>	50,0	108,0	142,0

Химический состав образующихся на месте известковых скарнов магнетитовых руд приведен в табл. 25.

Под суммой элементов-примесей понимается совокупность содержаний Na, K, Ti, H, P, Mn, V, «малых» рудообразующих элементов (Cu, Pb, Zn, Sn, W, Mo и т. п.); эти содержания такие же, как и в исходных известковых скарнах, и остаются практически неизменными (31 г/дм<sup>3</sup>) во всех градациях магнетитовых руд; в качестве условного кларка магнетитового железа в рудах принимается содержание его, равное 36,2 г/дм<sup>3</sup>; это значение равно содержанию Fe<sub>маг</sub> в пустых известковых скарнах; в рудах, производных из скарна, «магнетитовое железо» увеличивается пропорционально принимаемым условным кларкам в расчете на 1 дм<sup>3</sup> руды; приращение «магнетитового железа» в рудах происходит за счет уменьшения содержания Si, Al, Fe<sub>сил.</sub>, Ca, Mg, C по принципу «атом за атом» (метасоматически); соотношение атомных содержаний перечисленных элементов в рудах сохраняется близким к тем, которые характерны для исходного скарна.

Энергия рассчитывается по формулам (28), (34), (36). Расчеты в сводном виде представлены в табл. 26.

Запас привнесенного магнетитового железа определяется следующим выражением:

$$P_{KFe} = \frac{1234/K'}{e^{0,35(K'-1)^{0,33}}} \cdot \quad (48)$$

В этом случае для всех  $P_K$  в пределах  $1 \leq K' \leq 89$  запасы отличаются от расчетных, приведенных в табл. 21, максимально

Таблица 23

состав известковых скарнов

Диопсид	Геденбергит	Гроссуляр	Андрадит	Известковый скарн по каноническому составу
$CaMgSi_2O_6$ 3320	$CaFeSi_2O_6$ 3550	$Ca_3Al_2[SiO_4]_3$ 3530	$Ca_3Fe_2[SiO_4]_3$ 3750	$\Sigma$ 3527
353,7	219,0	301,0	425,0	1423,0
206,0	129,0	132,0	186,0	687,4
—	—	84,5	—	84,5
—	—	—	—	36,2
—	128,0	—	248,0	376,0
147,0	92,0	188,5	266,0	785,6
90,3	—	—	—	90,3
—	—	—	—	13,0
24,0	16,0	20,0	30,0	100,0
797,0	568,0	706,0	1125,0	3496

## Состав и содержание «малых» элементов-примесей в сплошных магнетитовых рудах

Элементы	Содержание		Элементы	Содержание	
	вес. %	г/дм <sup>3</sup>		вес. %	г/дм <sup>3</sup>
Si	0,15	8,0	P	0,04*	1,9*
Al	0,24	12,0	Mn	0,08	4,0
Ca	0,14	7,0	C	0,02*	1,0*
Na	0,1*	5,0*	V	0,002	0,1
K	0,1*	5,0*	Σ малых рудообра-	0,18*	9,5*
Mg	0,24	12,0	зующих элементов		
Ti	0,06	3,0	Σ всех элементов-	1,40	70,9
H	0,05*	2,4	примесей		

\* Приближенные цифры.

на 7,5% для  $K'=64$  и на 9,5% для  $K'=89$ , что вполне удовлетворительно. Для последних трех значений  $P_K$  при  $K'=94; 96,5; 99$  получаем только плюсовые отклонения от табличных данных, равные соответственно 19,4; 44,0; 148,0%. Эти значения, конечно, велики, но они приходится на область запасов ультрабогатых руд, играющих в общем балансе запасов скарных магнетитовых руд ничтожную роль (см. табл. 26). Поэтому с указанными расхождениями можно смириться и признать аппроксимирующее уравнение (48) удовлетворяющим практические запросы. Принимая полученное значение  $P_K=2,48$  при  $K'=99$  за условную единицу запасов и перехода к условным кларкам концентрации  $K$  полного содержания магнетитового железа в рудах, получаем окончательно аппроксимирующее уравнение в виде

$$P_K = \frac{498/(K_{Fe} - 1)}{e^{0,35(K_{Fe} - 2)^{0,33}}} \quad (49)$$

Это уравнение используется в дальнейшем; вид кривой, соответствующей уравнению, приведен на рис. 11.

При выводе уравнения (49) предположили, что энергия рудообразования расходуется лишь на переработку готовых скарнов в магнетитовую руду без учета энергии скарнообразования. Это предположение не противоречит существующим теоретическим геологическим взглядам и накопленным фактам. Действительно, практика полевых работ показывает, что далеко не всегда возникающие контактовые скарны испытывают сопутствующее оруденение, масштаб проявлений таких пустых скарнов подчас весьма велик. Таким образом, этот важный факт говорит в пользу предположения, что скарнообразование лишь создает почву для дальнейшего процесса образования магнетитовых руд и тем самым оправдывает отдельный от скарнообразования

Состав магнетитовых руд различных кондиций, принятый к расчету

Химические компоненты руд	Единица измерения	Содержания магнетитового железа в скарне и скарновых магнетитовых рудах, усл. кларк															
		1	2	3	4	5	10	15	25	35	50	65	80	90	95	97,5	100
Fe <sub>маг</sub>	г/дм <sup>3</sup>	36,2	72,4	108,6	144,8	181,0	362,0	540,0	900,0	1258,0	1800,0	2340,0	2882,0	3258,0	3439,0	3530,0	3620,0
	вес. %	1,03	2,04	3,07	4,07	5,03	9,85	14,50	23,35	31,55	42,90	53,20	62,96	67,40	69,47	70,45	71,47
O	г/дм <sup>3</sup>	1423	1423	1423	1423	1423	1423	1423	1423	1423	1423	1423	1423	1392	1376	1368	1360
	вес. %	40,35	40,24	40,10	40,00	39,70	38,93	38,25	36,85	35,70	33,90	32,33	30,67	28,80	27,76	27,33	26,87
Si	г/дм <sup>3</sup>	687,4	687,4	687,4	687,4	685,0	620,0	582,0	505,0	430,0	316,0	204,0	90,6	44,5	29,2	18,8	8,0
	вес. %	19,50	19,44	19,40	19,35	19,10	16,97	15,65	13,13	10,76	7,54	4,65	1,97	0,91	0,59	0,37	0,16
Al	г/дм <sup>3</sup>	84,5	82,5	80,8	78,6	78,0	76,6	72,3	63,8	54,8	41,9	28,9	15,6	13,8	12,9	12,4	12,0
	вес. %	2,40	2,33	2,27	2,21	2,18	2,16	1,94	1,66	1,37	1,00	0,66	0,34	0,29	0,26	0,25	0,24
Fe <sub>снл</sub>	г/дм <sup>3</sup>	376,0	359,0	361,0	353,0	352,0	339,5	319,0	277,5	236,0	173,5	111,7	49,6	30,8	22,0	17,3	12,0
	вес. %	10,65	10,41	10,17	9,93	9,83	9,30	8,58	7,20	5,92	4,14	2,53	1,08	0,63	0,44	0,35	0,24
Ca	г/дм <sup>3</sup>	785,6	768,0	751,0	735,0	733,0	708,0	665,0	579,0	492,0	361,0	231,0	100,0	57,5	30,0	18,9	7,0
	вес. %	22,28	21,75	21,21	20,68	20,45	19,36	17,90	15,02	12,32	8,59	5,25	2,10	1,05	0,60	0,37	0,14
Mg	г/дм <sup>3</sup>	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	81,5	76,5	66,6	56,8	42,1	27,2	12,4	12,0	12,0	12,0	12,0
	вес. %	2,56	2,56	2,55	2,54	2,50	2,23	2,06	1,73	1,42	1,00	0,62	0,27	0,25	0,24	0,24	0,24
C	г/дм <sup>3</sup>	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	11,6	10,8	9,2	7,7	5,35	3,0	1,0	1,0	1,0	1,60	1,0
	вес. %	0,37	0,37	0,37	0,37	0,36	0,36	0,299	0,24	0,19	0,19	0,07	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Σ элементов-примесей	г/дм <sup>3</sup>	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0
	вес. %	0,87	0,87	0,87	0,85	0,85	0,85	0,83	0,82	0,77	0,74	0,69	0,65	0,65	0,62	0,62	0,62
Количество молей		151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	151,4	153,0	153,9	154,3	154,7

Расчет энергии образования и дифференцированных запасов железа  
по скарново-магнетитовым рудам

Плотность руды, г/дм <sup>3</sup>	Полное содержание Fe <sub>маг</sub>				Содержание приведенного Fe <sub>маг</sub>		Энергия образования, усл. ед.		Запас приведенного Fe <sub>маг</sub>	
	в 1 дм <sup>3</sup> , усл. кларки	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	вес. %	в 1 дм <sup>3</sup> , усл. кларки	г/дм <sup>3</sup>	ед. объема	ед. массы	усл. ед.	усл. ед. P <sub>уд</sub> =1
3527	1	36,2	0,645	1,03	—	—	—	—	—	—
3537	2	72,4	1,29	2,04	1	36,2	1,26	34,8	0,0288	1234
3547	3	108,6	1,93	3,07	2	72,4	3,45	47,7	0,0105	450
3557	4	144,8	2,58	4,07	3	108,6	5,78	53,2	0,0063	268
3586	5	181,0	3,23	5,03	4	144,8	8,41	58,2	0,0043	184
3650	10	362,0	6,45	9,85	9	324,0	24,0	74,1	0,0015	64,3
3720	15	540,0	9,68	14,50	14	504,0	41,8	83,0	0,00086	36,8
3855	25	900,0	16,13	23,35	24	864,0	83,0	96,1	0,00044	18,65
3990	35	1258,0	22,57	31,55	34	1222,0	128,8	105,0	0,00028	12,0
4194	50	1800,0	32,25	42,90	49	1764,0	205,8	116,5	0,000175	7,49
4400	65	2340,0	41,93	53,20	64	2304,0	298,0	129,3	1,21 · 10 <sup>-4</sup>	5,19
4587	80	2882,0	51,60	62,96	79	2846,0	475,3	167,0	7,58 · 10 <sup>-5</sup>	3,25
4835	90	3258,0	58,45	67,40	89	3222,0	581,4	180,2	6,25 · 10 <sup>-5</sup>	2,68
4953	95	3439,0	61,60	69,47	94	3403,0	703,5	206,5	5,15 · 10 <sup>-5</sup>	2,25
5009	97,5	3530,0	63,25	70,45	96,5	3494,0	864,7	247,5	4,19 · 10 <sup>-5</sup>	1,795
5063	100	3620,0	64,50	71,47	99	3584,0	1565,0	437,0	2,34 · 10 <sup>-5</sup>	1,0

расчет энергии образования собственно магнетитового оруденения. Необходимо подчеркнуть, что образование из литосферы исходных для скарнирования известняков и само скарнообразование по известнякам являются энергоемкими процессами (первый процесс потребляет 3026, второй — 2056 усл. ед. энергии на 1 дм<sup>3</sup>). Однако эти энергетические затраты непосредственно в расчет энергии образования магнетитового оруденения не входят, обуславливая вместе с тем высокий энергетический уровень «условного нуля» этого расчета.

Графическое интегрирование уравнения (49) приводит к ряду практически интересных выводов, которые даны в табл. 27, 28.

Содержания Fe<sub>маг</sub>, вес. %, можно перевести в содержания магнетита, вес. %, умножая на 1,38; доля собственно промышленных руд невелика (~12%), если в расчет включаются все классы руд, она повышается при увеличении нижнего предела содержания металла в добываемых рудах; теоретические таблицы можно использовать при расчете участка земной коры с замкнутым в его пределах скарновым рудогенезом.

Ниже практически использованы приведенные соотношения скарново-магнетитовых месторождений Соколовско-Сарбайского района. Для этого железорудного бассейна СССР на 1972 г. разведанные запасы скарново-магнетитовых руд составили

4,017 млрд. т. при среднем содержании железа 43,52% (диапазон содержаний от максимальных, отвечающих чистым магнетитам, до 20%, принятом за бортовое). К сожалению, не уда-

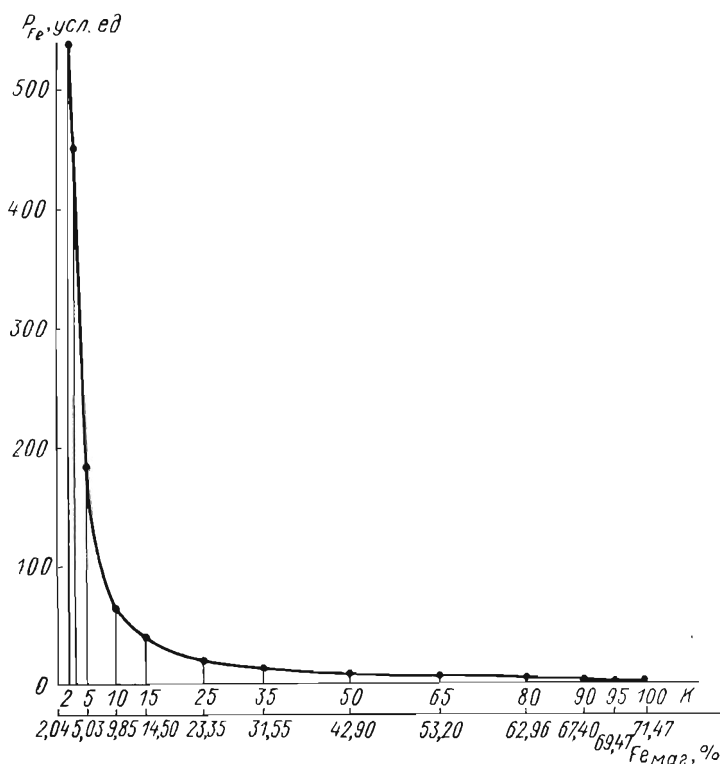


Рис. 11. График дифференцированных запасов магнетитового железа в скарновых месторождениях.

Таблица 27

Относительные запасы скарново-магнетитовых руд различных градаций

Градации руд	Интервалы содержаний магнетитового железа		Доля запасов в общем балансе, %	Запасы на 1 кларк в интервале, вес. % от суммы запасов
	вес. %	$K$		
Убогие	2,04—10,30	2—10,5	65,3	7,68
Резервные	10,30—31,0	10,5—34,5	22,4	0,934
Промышленные	31,0—71,47	34,5—100	12,3	0,188
Всего	2,04—71,47	2—100	100,0	1,02



## Относительные запасы скарново-магнетитовых руд при повышенном нижнем пределе содержаний металла

Классы руд	Интервалы содержаний $F_{\text{маг}}$ вес. %	Доля запасов в общем балансе $F_{\text{маг}}$ %	Доля руд данных содержаний, %		Средневзвешенное содержание $F_{\text{маг}}$ вес. %
			запасов	объемов	
Убогие	2,04—10,3	65,28	91,80	92,30	3,60
Резервные	10,30—31,00	22,39	6,85	6,54	16,55
Промышленные	31,00—71,47	12,33	1,35	1,16	45,50
Всего	2,04—71,47	100,00	100,00	100,00	5,07
Убогие		Не учитывались			
Резервные	10,30—31,00	64,50	83,30	85,00	16,55
Промышленные	31,00—71,47	35,50	16,70	15,00	45,50
Всего	10,30—71,47	100,00	100,00	100,00	21,40
Убогие		Не учитывались			
Резервные (учитываются частично)	19,50—31,00	40,90	56,35	58,8	24,35
Промышленные	31,00—71,47	59,10	43,65	41,2	45,50
Всего	19,50—71,47	100,00	100,00	100,00	33,55
Убогие		Не учитывались			
Резервные	31,00—71,47	100,00	100,00	100,00	45,50
Промышленные					
Всего	31,00—71,47	100,00	100,00	100,00	45,50

лось обеспечить пользование всей совокупностью сведений по запасам руд бассейна, в частности распределением рудных запасов по содержаниям в них металла, но и вышеприведенные цифры оказались достаточными для практических выводов. Для получения этих выводов предположили следующее.

1. Соотношения запасов скарновых магнетитовых руд, выведенные теоретически [по формуле (49)] для различных содержаний в них металла, справедливы и для Соколовско-Сарбайских руд.

2. Все запасы сырья, отвечающие средневзвешенному содержанию разведанных руд (43,52%), учтены полностью. Учтены полностью и все запасы с содержаниями выше 43,52%, вплоть до максимальных, отвечающих сплошным магнетитам (71,47%).

3. Запасы руд богатых категорий с содержаниями выше средневзвешенных восполняются за счет более бедных, с содержаниями ниже средневзвешенных, с таким расчетом, чтобы в смеси их получилась руда со средневзвешенным содержанием, равным 43,52% по Fe<sub>маг</sub>.

4. Каждому диапазону богатых руд соответствует свой диапазон бедных, притом так, что в смеси диапазонов более богатых отвечают более бедные градации (табл. 29).

Таблица 29

Расчеты запасов скарново-магнетитовых руд в Соколовско-Сарбайском бассейне

Интервалы содержания Fe <sub>маг</sub> в руде, вес. %	Среднее содержание в интервале, вес. %	Теоретические дифференциальные запасы, вошедшие в смесь					Остаток запасов в недрах, млн. т	
		% к суммарным запасам			млн. т		металл	руда
		металл	руда	отн. %	металл	руда		
71,47—69,30	70,40	0,503	0,715	100,0	177,0	252,0	0,0	0,0
19,50—21,30	20,40	0,168	0,826	10,2	59,5	294,0	524,0	2585,0
69,30—66,90	68,10	0,604	0,888	100,0	213,0	314,0	0,0	0,0
21,30—23,00	22,15	0,224	1,01	15,3	79,2	360,0	440,0	1993,0
66,90—64,20	65,55	0,669	1,02	100,0	236,0	360,0	0,0	0,0
23,00—24,70	23,85	0,270	1,131	20,8	95,4	403,0	366,0	1550,0
64,20—62,60	63,40	0,362	0,572	100,0	128,0	202,0	0,0	0,0
24,70—26,40	25,55	0,159	0,624	13,5	56,2	222,0	370,0	1420,0
62,60—60,70	61,65	0,384	0,662	100,0	136,0	220,0	0,0	0,0
24,60—28,00	27,20	0,187	0,689	17,6	66,1	243,0	310,0	1130,0
60,70—58,80	59,75	0,406	0,680	100,0	144,0	241,0	0,0	0,0
28,00—29,50	28,75	0,214	0,745	22,1	75,6	266,0	266,0	938,0
58,50—56,90	57,85	0,436	0,755	100,0	155,0	268,0	0,0	0,0
29,50—31,00	30,25	0,242	0,802	27,2	85,5	285,0	229,0	763,0
56,90—54,90	55,90	0,465	0,832	100,0	164,0	294,0	0,0	0,0
31,00—32,60	31,80	0,276	0,866	33,8	97,5	308,0	191,0	605,0
54,90—52,90	53,90	0,496	0,922	100,0	176,0	327,0	0,0	0,0
32,60—34,00	33,30	0,299	0,900	39,7	105,7	321,0	160,5	487,0
52,90—50,90	51,90	0,530	1,022	100,0	188,0	363,0	0,0	0,0
34,00—35,60	34,80	0,331	0,952	47,3	117,0	340,0	130,0	380,0
50,90—48,90	49,90	0,570	1,142	100,0	202,0	405,0	0,0	0,0
35,60—38,00	36,80	0,395	1,071	41,1	139,6	383,0	200,0	550,0
48,90—46,80	47,85	0,617	1,290	100,0	218,0	454,0	0,0	0,0
38,00—40,30	39,15	0,500	1,275	57,50	176,7	455,0	130,5	337,0
46,80—44,70	45,75	0,664	1,450	100,0	235,0	511,0	0,0	0,0
40,30—42,50	41,40	0,660	1,590	83,2	233,0	559,0	47,0	113,0
44,70—42,50	43,60	0,728	1,670	100,0	258,0	589,0	0,0	0,0
71,47—19,50	43,52	11,359	26,061	—	4,017	9,239	3364,0	12851,0

Примечание. Средневзвешенное по остатку руд в недрах составляет 26,2%.

Нарушение плавного нарастания компенсирующих запасов для градаций 24,70—26,40 и 35,60—38,0% вызвано объединением запасов в градациях компенсируемых богатых руд.

Относительные запасы, %, переведены в абсолютные, так как сумма относительных запасов, равная 11,359%, соответствует 4,017 млрд. т металла, откуда 1% соответствует 354 млн. т железа.

Смесь из каждой пары руд «богатой» и «бедной» градаций подобрана в пропорции, обеспечивающей заданное средневзвешенное содержание металла в смеси (43,52%).

Запасы металла пересчитывались в запасы руды в соответствии с приведенными данными (см. табл. 29) о плотности руд с различными содержаниями металла.

Из табл. 29 следует, что помимо учтенных 4,017 млрд. т железа в рудах со средневзвешенным содержанием 43,5% в недрах имеется еще минимум 3—4 млрд. т железа в рудах со средневзвешенным содержанием 26,2%.

В заключение сформулируем общие условия, при которых можно использовать приведенные выше уравнения.

Необходимо, чтобы выбираемые для исследования группы месторождений принадлежали к постмагматическим, гидротермального типа.

Для выбранных месторождений нужно получить теоретические уравнения, связывающие дифференцированные запасы с содержаниями металла в рудах, подобные полученным для касситерит-кварцевых, золото-кварцевых, медно-порфировых и скарново-магнетитовых руд. Предположим, что для месторождений вольфрама, молибдена, урана и других подобных им по кларкам металлов в качестве образца расчета служат касситерит-кварцевые месторождения; для свинцово-цинковых, ториевых, ванадиевых и других — месторождения медно-порфировых руд; для титановых — скарново-магнетитовые руды. Расчет следует распространить на месторождения либо в глобальном масштабе, либо в масштабе рудного района, характеризующегося замкнутым рудообразующим энергетическим процессом; иными словами, требуется, чтобы в районе был единый источник оруденения, каким бы ни был его масштаб.

Следует заметить, что уравнения (40) и (46) можно аппроксимировать [70] выражениями типа (49) для олова формулой

$$P_K = \frac{1}{K e^{0,029(K-1)^{0,5}}}, \text{ для меди } P_K = \frac{1}{K e^{0,125(K-1)^{0,45}}}.$$

#### § 10. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛА В ОТДЕЛЬНО ВЗЯТЫХ РУДНЫХ ТЕЛАХ

В однородных некантованных растворах [60] влияние неизбежных флюктуаций в содержаниях распространяется лишь на микрообъемы. Уже при долях кубического миллиметра, т. е.

при практически любом заметном объеме пробы, в растворе будет находиться одно и то же количество молекул растворенного вещества. Поэтому все особенности образующейся из однородного родоначального гидротермального раствора далеко не однородной руды надлежит искать в особенностях кристаллизации раствора. Между тем вскрыть эти особенности, хотя бы в общем виде без особенной детализации, совершенно необходимо, ибо становится бездоказательной возможность практического применения выведенных выше расчетных формул для оценки перспектив рудоносности территории.

Поставленную таким образом задачу выявления особенностей неоднородной руды, возникающей из однородного гидротермального раствора можно решить тремя путями, при этом могут быть использованы закономерности: 1) кристаллизации многокомпонентных растворов; 2) кинетики химических реакций, происходящих в многокомпонентных смесях; 3) геохимии гидротермальных рудных растворов и месторождений.

*Первый путь* предусматривает использование закономерностей кристаллизации [7, 79].

1. Кристаллизация растворов возникает при переохлаждении и выражается на начальном этапе в появлении центров кристаллизации. Возможно, что в появлении этих центров известную роль играют положительные флюктуации плотности. В дальнейшем решающее значение имеет характер падения температуры.

2. Количество центров кристаллизации (при прочих равных условиях) пропорционально растворенному веществу в растворе.

3. Количество выпадающего вещества из его раствора пропорционально количеству центров кристаллизации и, следовательно, количеству растворенного вещества в растворе. При подобных условиях можно написать

$$dN_p/dt = -\alpha N_p,$$

где  $N_p$  — мгновенное (на данный момент) количество вещества в растворе;  $dN_p/dt$  — количество кристаллизующегося (и выпадающего) вещества из раствора в осадок;  $\alpha < 1$  — коэффициент пропорциональности.

После интегрирования получим

$$N_p = N_0 e^{-\alpha t},$$

где  $N_p$ ,  $N_0$  — количество вещества, оставшегося в растворе в момент времени  $t$ , и начальное в момент начала отсчета.

Из изложенного вытекает, что количество вещества, кристаллизованного и накопленного в осадке в момент времени  $t$ , будет равно

$$N_k = N_0 - N_0 e^{-\alpha t} = N_0 (1 - e^{-\alpha t}). \quad (50)$$

При  $t=0$   $N_k=0$ , при  $t \rightarrow \infty$   $N_k=N_0$ . Количества вещества должны измеряться молями; время  $t$  — условное, его единица отвечает промежутку времени, в течение которого температура раствора падает на одинаковое число градусов (например, на  $10^\circ\text{K}$ ), — величина переменная, меньше при высоких температурах и больше при низких.

По приведенной формуле (50) можно рассчитать количество вещества, выпадающее в осадок из раствора для разных промежутков условного времени и для различных коэффициентов  $\alpha$ , а затем процентные содержания тех или иных веществ в образующихся смесях.

Выше предполагалось, что коэффициент  $\alpha$  не зависит от температуры (течения времени), если  $\alpha$  и зависит от времени, то на расчеты это не влияет. Оценка практической возможности использования приведенных результатов дана ниже совместно с заключением по второму пути.

Рассмотрим *второй* теоретический путь — использование для решения поставленной задачи закономерностей химической кинетики как науки о скоростях протекания химических реакций, механизмах химического взаимодействия реагентов и о зависимостях этих механизмов от различных факторов (концентрации реагирующих веществ, температуры, влияния катализаторов и пр.) [39]. Здесь внимание привлекает теория активных столкновений [84]; смысл ее состоит в том, что, по-первых, для реагирования необходимо столкновение молекул реагентов и, во-вторых, не каждое столкновение реализуется в форме образования молекул нового вещества, а лишь то, энергия которого равняется предельной энергии активации или превосходит ее.

Напишем для двумолекулярных реакций [84]

$$Z = N_1 N_2 (r_1 + r_2)^2 \sqrt{\frac{8\pi RT (M_1 - M_2)}{M_1 M_2}},$$

где  $Z$  — общее число столкновений между молекулами реагентов в 1 сек в 1 мл;  $N_1, N_2$  — количество молекул в 1 мл реагента;  $r_1, r_2$  — радиусы молекул реагирующих веществ;  $M_1, M_2$  — молекулярная масса реагентов.

Относя энергию активации реакции полностью к молекулам одного сорта и используя уравнение распределения молекул по кинетической энергии Л. Больцмана, найдем

$$N^*/N = e^{-E^*/(RT)},$$

где  $N^*/N$  — доля активных молекул  $N^*$  в общем их количестве  $N$ ;  $E^*$  — энергия активации.

Эта энергия (для большинства случаев  $E = 20 \div 60$  ккал/моль) определяется расчетно-опытным путем, если известны константы скорости данной реакции при температурах  $T_1$  и  $T_2$ .

Используя эти формулы, легко определяем количество реально реагирующих молекул  $n$ , отнесенное к 1 мл в 1 сек, называемое удельной скоростью реакции:

$$n = Ze^{-E^*/(RT)}. \quad (51)$$

Таким образом можно использовать основные закономерности химической кинетики.

Переходя к практической значимости описанных путей, подчеркнем, что оба они полностью пригодны лишь в упрощенных условиях ограниченного количества компонентов в растворе, если известны их взаимоповедение, взаимовлияние, существование в растворе и в осадке, параметры  $\alpha$  и  $E^*$ , температурные и прочие влияния на эти параметры и т. п. При попытках распространить закономерности кристаллизации и химической кинетики на растворы типа природных гидротермы пока еще не можем дать ответ на большинство поставленных вопросов. Препятствием здесь являются: предельная многокомпонентность гидротермальных растворов; недостаточная изученность взаимодействий и взаимовлияний между компонентами и проистекающее отсюда незнание параметров, необходимых для расчетов, широкие интервалы температуры и давления и такие же температурные градиенты (по времени) образования гидротермальных месторождений и пр. Напомним, что гидротермальное рудоотложение [74] происходит в интервале температур 700—25°С (главным образом в интервале 400—100°С) при давлениях 950—375 кгс/см<sup>2</sup>, длительность постмагматических процессов при одних и тех же начальных условиях и конечных результатах [41] составляет от 750 до нескольких миллионов лет.

Все это осложняет картину, так что для наших целей расчеты, основанные на теории кристаллизации и химической кинетики, неприменимы.

Таким образом, для решения поставленной задачи остается *третий* путь — использование данных геохимии гидротермальных рудных растворов в месторождениях [2, 75, 81, 82]. Опубликованные труды содержат в себе обобщенные материалы по поведению по крайней мере основных рудообразующих элементов и их минералов в гидротермальном процессе, полученные при экспериментах, полевых наблюдениях и обоснованных теоретических расчетах, автоматически учитывающие кристаллизационные и химико-кинетические особенности исследуемых веществ.

Как известно, в геохимическом плане общепринято рассматривать рудоносные гидротермальные образования как водные растворы, предельно многокомпонентные, горячие (с температурой 600—700°С и ниже) и находящиеся под давлением многие сотни — первые тысячи килограмм-силы на квадратный сантиметр, сбрасывающие свою минеральную нагрузку в основном в интервале 400—100°С при давлении 950—375 кгс/см<sup>2</sup>. В составе

гидротерм всегда присутствуют  $\text{NaCl}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{Cl}$ , хлориды щелочных и щелочноземельных металлов,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , различные молекулярные и ионные формы серы ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{S}^{-2}$  и др.), свободные галоиды, бор,  $\text{Fe}_2\text{S}$ ,  $\text{FeS}$ , различные комплексные (галоидные, преимущественно хлоридные и серные) соединения тяжелых металлов и т. п.

Плотность подобных растворов 1,10—1,25 г/мл, временами достигает неосуществимых в лабораторных условиях значений (гидротермальные рапы с общей минерализацией 70—75%, плотностью 1,60—1,65 г/мл; плотность морской воды 1,03 г/мл); рН близко к нейтральному раствору, так как при существующих давлениях растворы представляют собой существенно ассоциированные образования. При кристаллизации описанные гидротермы отлагают различные руды, иногда близкие к мономинеральным, иногда полиминеральные. Сравнение химических составов типичных гидротерм и различных гидротермальных руд показывает, что далеко не все ингредиенты раствора фиксируются в образующейся из них рудах. Практически полностью исчезает вода, очевидно, вместе с ней удаляется обильный в растворе (десятки процентов) хлористый натрий и лишь малую часть натрия можно зафиксировать в немногочисленном альбите; в рудах нет кроме обычной геохимической примеси обильных в растворах водорода, азота, большинства галогенов, углекислоты. Лишь фтор и часть углекислоты фиксируются в виде флюорита и редких карбонатов. Наоборот, главные массы растворенных в гидротерме кремнекислоты, сульфидов железа, серы, тяжелых металлов, кислорода, бора так или иначе передаются рудам. Ниже изложены основные сведения по этим важнейшим ингредиентам растворов и руд. Поведение жильных минералов изложено по Г. Д. Холланду [82], а рудных (сульфидных) — по Х. Л. Барнсу, Г. К. Чаманскому [2] и Г. Ф. Смиту [75].

Кварц и его полимерные модификации являются наиболее распространенными жильными минералами гидротермальных месторождений всех типов, составляя в некоторых из них (в золото-кварцевых) более 99% их минерального состава. В связи с этим поведение кремнекислоты в растворе достаточно хорошо изучено [82] (табл. 30).

На рис. 12 приведена сводная диаграмма, иллюстрирующая растворимость кварца при разных температуре и давлении. Из табл. 30 следует, что лишь при градиентах  $100^\circ\text{C}/\text{км}$  и  $100\text{ кгс}/\text{см}^2$  на 1 км снижается растворимость в пределах  $400\text{—}600^\circ\text{C}$ , во всех же остальных случаях этот параметр повышается. Разность между соответствующими растворимостями определяет количество кремнекислоты, выпадающей в раствор при охлаждении. Наибольшие количества будут выпадать при высоких температурах.

С геохимической точки зрения особенный интерес вызывает фактическая независимость растворимости кремнезема в вод-

ных растворах от концентрации растворенных солей, что исследовано практически для всего диапазона условий. Растворимость  $\text{SiO}_2$  мало зависит от pH водных растворов почти для всех условий, представляющих геологический интерес. Растворенный кремнезем, очевидно, существует в растворе главным образом в виде одного или многих мономеров с формулой  $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ . По-видимому, следует считать, что в водных растворах ионы  $\text{Si}^{4+}$  стремятся к четвертной координации с кислородом и наиболее вероятной формулой нейтральной частицы кремнезема в гидротерме будет  $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Все сказанное в обобщенном виде подтверждается тем, что простое остывание является главнейшим фактором выпадения кремнекислоты из раствора.

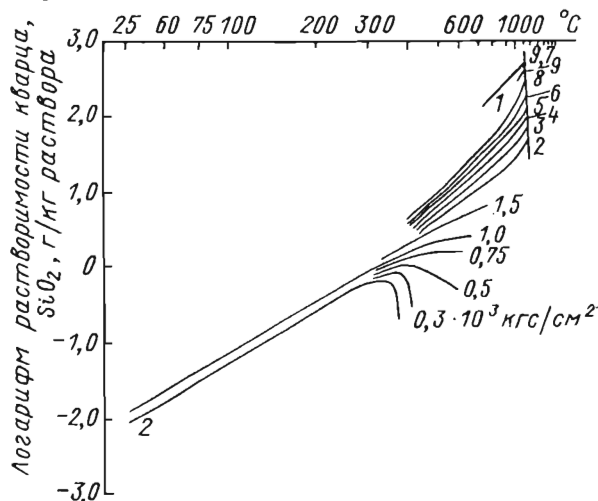


Рис. 12. Диаграмма растворимости кварца в воде в зависимости от температуры и давления [82].

Таблица 30

Растворимость кварца,  $\text{SiO}_2$ , г/кг раствора

T, °C	35°C/км		100°C/км	
	100 кгс/см <sup>2</sup> на 1 км	300 кгс/см <sup>2</sup> на 1 км	100 кгс/см <sup>2</sup> на 1 км	300 кгс/см <sup>2</sup> на 1 км
15	0,006	0,006	0,006	0,006
100	0,060	0,064	0,055	0,062
200	0,380	0,400	0,290	0,310
300	0,810	1,300	0,760	0,910
400	1,900	2,800	0,790	1,800
500	3,200	6,900	0,720	3,500
600	5,100	15,000	0,760	6,000
700	10,200	29,000	1,200	11,000



В статье Г. Д. Холланда [82] изложены материалы о растворимости еще ряда жильных минералов: флюорита, карбонатов, щелочноземельных элементов (главным образом кальцита), сульфатов этих же элементов, в том числе барита, и сделаны соответствующие выводы. В частности, говорится, что флюорит относится к числу широко распространенных минералов гидротермального происхождения, обладающих умеренной растворимостью, на которую сильно влияет присутствие в растворе других веществ. Растворимость флюорита в чистой воде достигает максимума (24,7 мг/кг раствора) около  $100^{\circ}\text{C}$  и с приближением критической температуры опять становится очень низкой, однако затем она возрастает. С повышением давления растворимость флюорита растет; присутствие в растворе хлористого натрия также действует положительно, однако наличие кремниевой кислоты снижает растворимость. В целом при всех условиях при высоких температурах ( $450\text{--}600^{\circ}\text{C}$ ) и наличии в растворе многих солей растворимость флюорита в большинстве случаев не превышает первых десятков миллиграммов на 1 кг раствора, стремится к нулю при критической температуре и становится равной 24,7 мг/кг при  $100^{\circ}\text{C}$ . Основой выпадения флюорита из раствора, как и для кварца, является охлаждение раствора.

Проблема растворимости щелочноземельных карбонатных минералов является более сложной, чем для флюорита. Здесь решающими факторами являются рН раствора и присутствие растворенного углекислого газа. Как известно, повышение температуры снижает растворимость углекислого газа. В связи с этим самой важной особенностью эволюции гидротермальных систем с участием важнейшего карбонатного минерала — кальцита — следует считать именно быстрое снижение растворимости этого минерала при повышении температуры раствора. Следовательно, отложение кальцита нельзя рассматривать столь же просто, как это имело место для кварца и флюорита. Необходимо ввести в рассмотрение иные факторы, и одним из них является вскипание гидротерм. Количество кальцита, отлагающегося из раствора при вскипании, зависит от ряда причин. Тем не менее Г. Д. Холланд [82] указывает, что при вскипании раствора при  $300^{\circ}\text{C}$  и снятии давления углекислого газа до  $70\text{ кгс/см}^2$  кальцита выпадает в осадок около 100 мг из каждого килограмма раствора.

Поведение растворимости щелочноземельных сульфатных минералов в гидротермальных растворах в количественном отношении примерно такое же, как и поведение растворимости флюорита. Здесь следует заметить, что если окисляется гидротермальный раствор, в котором сера находится в восстановленном состоянии или в форме комплекса, то главным компонентом, содержащим серу, будет сульфат-ион. Следовательно, осаждение сульфатных минералов может быть результатом изменения фугитивности кислорода в процессе эволюции гидротер-

мального раствора. В качестве одного из подобных минералов Г. Д. Холланд [82] выбрал барит. Это наименее растворимый минерал среди широко распространенных гидротермальных сульфатов щелочноземельных элементов, однако он часто присутствует в гидротермальных жилах и поэтому может служить эталоном. Барит крайне слабо растворим в чистой воде (единицы миллиграммов на 1 кг раствора), однако в присутствии хлористого натрия растворимость его резко повышается (до 150 мг/кг раствора при 5 молях NaCl и 150°C). Растворимость резко снижается, если отношение концентрации ионов бария и сульфата в растворе не равно единице. Отмечается, что многие эпитермальные жилы несут в себе значительные количества барита, который, как уже отмечено, на практике проявляет себя как минерал слабой растворимости в гидротермальных растворах, подобный в этом отношении флюориту и кальциту. В связи с этим главной нерудной компонентой гидротермальных растворов в полном согласии с наблюдениями практики надлежит считать кремнекислоту.

Перейдя к рассмотрению растворимости, переноса и отложения рудных, преимущественно сульфидных минералов, прежде всего отметим, что [75] последовательность отложения простых сульфидов в гидротермальных жилах выдерживается постоянно в следующем порядке: FeS (FeS<sub>2</sub>), ZnS, PbS, Cu<sub>2</sub>S, Ag<sub>2</sub>S, Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, HgS. Весьма важной является формула комплексобразования в растворе [2]:  $M^{2+}(aq) + nA^{-x}(aq) = MA_n^{2-nx}$ .

С использованием квантово-механических данных выведен следующий ряд [75] рудных элементов, в котором они расположены в порядке убывания в знаменателе некоторой константы, ккал, характеризующей их склонность к комплексобразованию: Hg/—227; Cd/—156; Pb/—154; Cu/—134; Zn/—132; Sn/—126; Ni/—83; Fe/—82; Co/—81; Mn/—78.

Авторы добавляют к этому, что наибольшей устойчивостью обладают комплексы ртути, для марганца комплексобразование очень слабое. Почти одинаковая устойчивость комплексов меди и цинка обуславливает близость и, по-видимому, взаимозаменяемость их в ряду природной зональности. К этому добавим, что последним четким комплексобразователем является, очевидно, олово, в то время как никель, железо и кобальт близки в рассматриваемом отношении к марганцу. Сказанное подкрепляется выводом Х. Л. Барнса и Г. К. Чаманского [2] о том, что механизм, определяющий заметную растворимость пирита (и пирротина), по-видимому, коренным образом отличается от того, который является характерным для комплексобразователей (ртути, кадмия, свинца, меди, цинка, олова). Как найдено опытным путем, присутствие в растворе всех лигандов, образующих устойчивые и хорошо растворимые комплексы с только что перечисленными цветными металлами, не влияет на растворимость пирита. Наоборот, присутствие в растворе таких необыч-

ных для гидротерм групп, как  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$  в сероводородной обстановке при  $\text{pH}=6,1$ , позволяет достичь растворимости пирита до 526 мг/л при  $263^\circ\text{C}$ , что выше растворимости при этих условиях других сульфидов и сравнимо с растворимостью кварца ( $\sim 570$  мг/кг).

Главная причина выпадения  $\text{FeS}_2$  из раствора — падение температуры. Приняв во внимание все сказанное выше и широкое распространение пирита не только в сульфидных месторождениях, но и в природе, возникает возможность сопоставить пирит со столь же распространенным кварцем и рассматривать его как один из главных «жилых» минералов, особенно для группы сульфидных месторождений. Что касается собственно рудных элементов ( $\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Sb}$  и  $\text{As}$ ), то приведем лишь самые общие сведения, необходимые для дальнейшего.

Так, общепринято считать, что все перечисленные элементы в гидротермальных растворах существуют в форме комплексных соединений, устойчивых при  $700\text{--}200^\circ\text{C}$ . На настоящий момент остается не выясненным до конца вопрос: в сочетании с какими лигандами возникает такой металлоносный комплекс? Так, Г. К. Хелгесон [81] считает, что главную роль играют галоиды, в первую очередь хлор, а Х. Л. Барнс и Г. К. Чаманский [2] эту роль отводят сере и ее производным соединениям. Так это или иначе, но оказалось, что подобным металлическим комплексам свойственна высшая растворимость в горячих водных растворах, нежели минеральным соединениям, в которых эти металлы проявляются в природе в месторождениях. Это обстоятельство легко снимает вопрос о чрезмерном потреблении воды на образование рудоносных растворов.

По мнению Х. Л. Барнса и Г. К. Чаманского [2], не существует способов, которые бы позволяли однозначно определить концентрацию металлов в рудных растворах. Но можно определить порядок этих концентраций путем исследования жидких включений в минералах. Высокое содержание металлов в гидротермах оговаривается необходимостью соблюдения определенных стехиометрических соотношений между суммами металлов и серой, что не всегда, как установлено, наблюдается в гидротермальных растворах. Г. К. Хелгесон [81] приводит растворимость галенита в концентрированных растворах хлористого натрия при разных температурах (20—650 частей на 1 млн.), он считает, что это вполне обеспечивает образование гидротермальных месторождений свинцового блеска. Итак, надо признать, что вопрос состава минеральной нагрузки, соотношения ее компонентов и содержания металлов в гидротермальных растворах еще далек от своего точного разрешения. Для выявления закономерностей распределения металлов в отдельно взятых рудных телах совершенно необходимо принять какие-то определенные обоснованные данные по составу гидротермального

раствора и по содержанию в нем металла. Для расчетов предположим, что:

1) исходный гидротермальный раствор несет в себе только кремнекислоту и олово, т. е. допустим, что из этого раствора образуются широко распространенные в природе кварц-касситеритовые жилы, содержащие в себе пренебрежимо малые количества иных минералов;

2) содержания кремнекислоты в растворе с учетом температуры и давления примем средние из первых двух столбцов табл. 30 и данных сводной диаграммы Г. Холланда (рис. 12); содержания олова 20, 100 и 500 мг/кг раствора. Все эти содержания отнесены к начальной стадии раствора при  $700^{\circ}\text{C}$ ;

3) как указано выше, кремнекислота в растворе находится в форме группы  $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и выпадает из раствора в форме кварца и его полиморфных модификаций в основном в связи с понижением температуры, вызывающей дегидратацию группы. Более сложно происходит выпадение олова. В начале этого процесса, на интервале температуры  $350\text{—}300^{\circ}\text{C}$ , т. е. после прохождения раствором критической точки ( $374^{\circ}\text{C}$ ), распадается оловоносный комплекс с освобождением иона олова. Затем образуется касситерит в результате реакции между ионами олова и кислорода и, наконец, выпадает касситерит в осадок;

4) описанная схема автоматически предполагает:

а) выпадение кремнекислоты задается схемой растворимости; в качестве цифр приняты вышеупомянутые средние,

б) выпадение касситерита, образующегося в результате столкновений между ионами олова и кислорода, будет усиливаться по мере уменьшения содержания кремнекислоты в растворе, поскольку последнее благоприятным образом будет сказываться на числе эффективных столкновений;

5) итоговым результатом сброса гидротермальным раствором минеральной нагрузки является образование кварц-касситеритовых руд. Принимается, что последний процесс имеет место в интервале температур  $350\text{—}100^{\circ}\text{C}$ , как это предполагается ныне большинством исследователей. Более ранняя по выпадению ( $700\text{—}350^{\circ}\text{C}$ ) и более поздняя ( $100\text{—}50^{\circ}\text{C}$ ) кремнекислоты идут на образование до- и послерудного «пустого» кварца;

6) при вышеизложенных условиях кривая «запасы—содержание» для образующих руд неизбежно должна быть правоасимметричной. Это следует из того, что если кривой выпадения кварца может быть сопоставлена кривая типа (50) с постоянным коэффициентом  $\alpha$ , то для олова (касситерита) — кривая с возрастающим  $\alpha$  по мере падения температуры. Одновременное же выпадение двух осадков по этим кривым и приводит к правоасимметричному распределению в смеси малого компонента (олова).

На рис. 13 изображена схема образования кварц-касситеритовых руд при содержании олова 100 мг на 1 кг раствора.

В табл. 31 приведен цифровой материал для содержаний олова 20, 100 и 500 мг на 1 кг раствора, с возрастанием его выпадения.

Если по данным табл. 31 построить график распределения запасов в зависимости от их содержаний в рудах (последние два столбца), то получим правоасимметричную кривую. Подобный вид закономерностей выявляется и по другим строчкам.

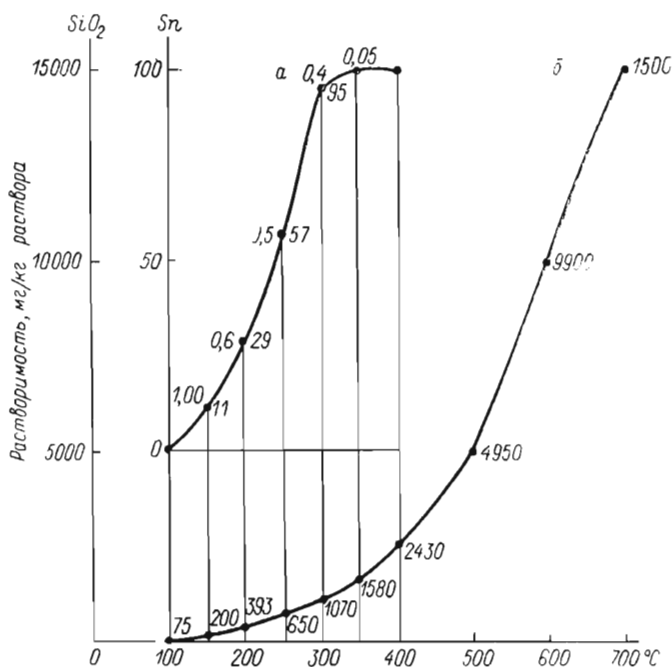


Рис. 13. Схема выпадения в осадок касситерита (а) и кварца (б) (по обобщенным данным) [82].

Сдвигение начала кривых выпадения олова (касситерита) по оси температур вправо и влево на  $50^{\circ}\text{C}$  не меняет правоасимметричного характера кривой распределения олова в осадке.

Выше было высказано основанное на фактах предположение, что в сульфидных рудах роль главного «жильного» минерала, подобного кварцу в кварцевых рудах, играет пирит-пирротин. Тогда, очевидно, табл. 31 и рис. 13 смогут быть построены и для медных, свинцовых, цинковых, никелевых и других руд с тем же конечным результатом: доказательством образования запасов, подчиняющихся правоасимметричному закону распределения кривой «запасы—содержания».

Таблица 31

Результаты расчета содержаний олова в кварц-касситеритовых жилах, образующихся в температурном интервале 400—100°С

T, °C	SiO <sub>2</sub> в растворе, мг/кг	Sn в растворе, мг/кг	Расчётные интервалы температур, °C	Выпадает SiO <sub>2</sub> в осадок из 1 кг раствора, мг	Выпадает Sn в осадок из 1 кг раствора, мг	Коэффициент выпадания Sn в осадок	Выпадает касситерита в осадок, мг Sn×1,26	Сумма SiO <sub>2</sub> +SnO <sub>2</sub> в осадке, мг	Среднее содержание олова в осадке, %	Доля Sn в балансе запасов, %
400	2430	20 100 500	400—350	850	0	— —	— —	— —	— —	— —
350	1580	20 100 500	350—300	510	1,0 5,0 25,0	0,05	1,26 6,0 31,5	511,26 516,3 514,5	0,20 0,97 4,62	5,0
300	1070	19 95 475	300—250	420	7,6 38,0 190,0	0,40	9,5 48,0 240,0	429,5 468,0 660,0	1,77 8,13 28,8	38,0
250	650	11,4 57 285	250—200	257	5,7 28,0 140,0	0,50	7,2 35,0 176,0	264,2 292,0 433,0	2,16 9,6 32,3	28,0
200	393	5,7 29 145	200—150	193	3,4 18,0 90,0	0,60	4,3 23,0 113,0	197,3 216,0 306,0	1,73 10,62 29,40	18,0
150	200	2,3 11 55	150—100	125	2,3 11,0 55,0	1,0	2,9 14,0 69,5	127,9 139,0 194,5	1,80 7,92 28,3	11,0
100	75	0	100—50	75	0,0	— —	— —	— —	— —	— —
В среднем на интервале T=350÷100°С				1505	20,0 100,0 500,0	1,0	25,2 126,0 630,0	1530,2 1631,0 2135,0	1,31 6,12 23,4	100,0 100,0 100,0

Примечание. При более дробном подразделении температурных интервалов правоасимметричный характер кривой выявляется более резко.

Итак, теоретическое рассмотрение вопроса распределения металла в отдельно взятом рудном теле безотносительно его ценного компонента, лишь бы он принадлежал к группе малых металлов, приводит нас к убедительному выводу о правоасимметричном законе распределения ценного металла в общей рудной массе, сложенной либо кварцем, либо пиритом и пирротинном, либо совместно этими минералами. Среднее содержание металла всецело определяется средним его содержанием в той порции единого родоначального раствора, из которого возникло данное рудное тело.

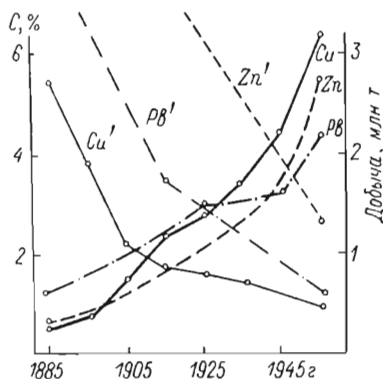


Рис. 14. Статистические данные по увеличению добычи металлов при снижении кондиций руд. Cu, Zn, Pb — добыча металлов; Cu', Zn', Pb' — содержания металлов в рудах.

Как известно, любое месторождение состоит из ряда отдельных рудных тел, притом таких, что чем больше средневзвешенное содержание в нем металла, тем меньшую роль играет это тело в общем балансе запасов. Иными словами, кривая «запасы—содержания», построенная по их средневзвешенным содержаниям и заключенным в них запасам, при условии, что все эти тела произошли из одного гидротермального источника, будет также правоасимметричной. Иначе и быть не может, так как, хотя суммарный гидротермальный раствор и составляется из ряда порций разных содержаний, однако же чем богаче порция, тем ее меньше, и наоборот. Это закономерно следует из основных термодинамических взаимоотношений.

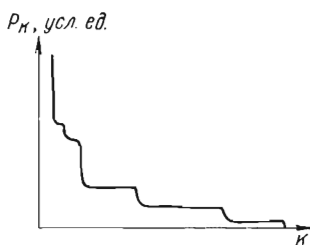
В соответствии со всем сказанным закон распределения металла в отдельно взятом месторождении, состоящем из ряда рудных тел, происшедших из одного и того же источника, будет также правоасимметричным. Обратимся к практике. Согласно опубликованным материалам большинство исследователей ныне придерживается взгляда о правоасимметричном законе распределения металла в месторождениях, причем многие считают его логарифмически нормальным (логнормальным) [47]. Опубликован ряд статистических сведений по этому вопросу (рис. 14). Из этих материалов наглядно следует, что чем богаче руды, тем

их в природе меньше, причем степень уменьшения растет по мере возрастания богатства руд. Например за 80 лет содержания по меди упали в 6—7 раз, а запасы возросли в 12—13 раз.

Наконец, А. Пелиссонье [57] приводит подобную правоасимметричную теоретическую кривую «запасы металла — содержание» для конкретного месторождения (рис. 15), на которой ступени позволяют определить запасы металла и соответствующие им содержания.

Итак, все теоретические и практические материалы убедительно свидетельствуют о правоасимметричном законе распределения металла как в отдельно взятых рудных телах, так и в

**Рис. 15.** Теоретическая кривая «запасы металла — содержание» для конкретного месторождения [57].



месторождениях. В то же самое время, если мы возьмем кривую «запасы—содержание» для любого металла, построенную по теоретическим данным, предположив несмешивание отдельных порций гидротермального рудоносного раствора, то увидим, что эта кривая будет иметь тот же правоасимметричный характер. Подтверждением служат теоретические кривые распределения олова, золота, меди и магнетитового железа, приведенные выше.

Отсюда следует возможность практического использования выводов, вытекающих из сравнения кривых «запасы—содержание» рудных тел и месторождений с кривыми теоретических расчетных запасов по тем же металлам для выявления (и оценки) еще не вскрытых запасов руд.

В этой связи возникают два вопроса, окончательные ответы на которые пока дать невозможно.

1. Насколько тождественны в деталях практические и теоретические кривые распределения, являющиеся в целом правоасимметричными?

Здесь можно высказать предположение, основанное на первоначальных энерго-энтропийных расчетах, что если бы родоначальный раствор застыл мгновенно, то содержание металла в образовавшемся таким образом рудном теле во всех точках объема его было бы равномерным. Однако он кристаллизуется долговременно и в целом закономерно. При этих условиях наиболее энергетически выгодным будет путь кристаллизации, когда суммарная энтропия осадка (без учета энтропии кристалли-



ческой решетки) будет равна (или приближаться) энтропии теоретического исходного рудообразующего раствора до смешения его составляющих порций. Таким образом, теоретически предсказывается достаточная для практических целей тождественность в деталях правоасимметричных теоретических и практических кривых «запасы—содержание» металлов в рудах.

В то же время точный ответ может дать лишь массовая проверка на практическом материале; таким же путем могут быть найдены и необходимые поправочные коэффициенты.

2. Обосновано ли использование теоретических выводов для отдельно взятого рудного тела?

Теоретические выводы следует использовать лишь для крупных залежей: чем меньше отдельное рудное тело, тем меньше была порция родоначального раствора и, следовательно, тем большее влияние на кристаллизацию его могли оказать различные неблагоприятные факторы (например, неоднородность охлаждения, приводящая к нарушению нормального хода кристаллизации). Поэтому следует сделать вывод, что применение теоретических кривых следует считать вполне обоснованным лишь к практической кривой «запасы—содержание», составленной по совокупности рудных тел, принадлежащих к одному и тому же месторождению. Однако лишь практика способна дать ответ на вопрос о минимальном количестве подобных тел.

Тем не менее при данной степени разведанности рудного тела, которая должна быть обязательно равномерной по всему объему залежи, по конфигурации кривой распределения «запасы — содержание» можно говорить о минимальном относительном невыявленном количестве запасов, судя по отклонению от монотонности практической кривой распределения. В качестве примера приводится оценка 8 рудных тел одного из оловорудных районов (рис. 16). Тела разведаны с одинаковой степенью детальности. Результаты оценки приведены в табл. 32.

Из табл. 32 видно, что рудные тела *а, б, г, з* разведаны практически полностью, *в, д, е, ж* содержат в себе еще значительные невоскрытые запасы. Приведенный пример показывает, что хотя оценка сделана достаточно приближенно, тем не менее можно решить очень важный вопрос, касающийся степени разведанности как отдельно взятого рудного тела, так и группы их.

Итак, при осуществлении сформулированных условий и принятии приведенных положений можно решить следующие задачи.

1. Определение прироста запасов при данном снижении кондиции добываемых руд. Прирост площади, заключенной под теоретической кривой запасов в пределах между старыми и новыми значениями бортовых содержаний, решается элементарно (в долях площади, отвечающей учтенным запасам).

2. Определение минимального прироста запасов по учтенным запасам, средневзвешенному содержанию металла в ру-

дах и бортовому содержанию. Задача решается методом, аналогичным примененному при решении задачи для Соколовско-Сарбайского железорудного района.

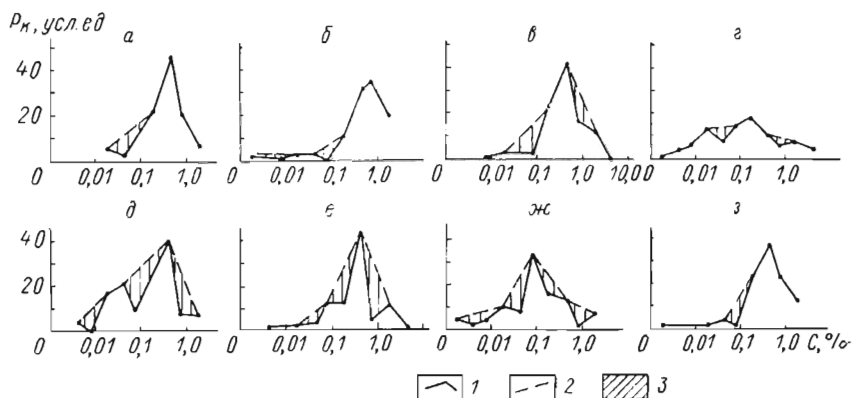


Рис. 16. Фактическое и теоретическое распределение запасов по классам содержаний олова для отдельных рудных тел одного из оловорудных районов. Запасы: 1 — фактические, 2 — рассчитанные по теоретической формуле, 3 — перспективные.

Таблица 32

Относительные не выявленные запасы в отдельно взятых рудных телах, определенные путем установления уклонений от монотонности кривой «запасы — содержание»

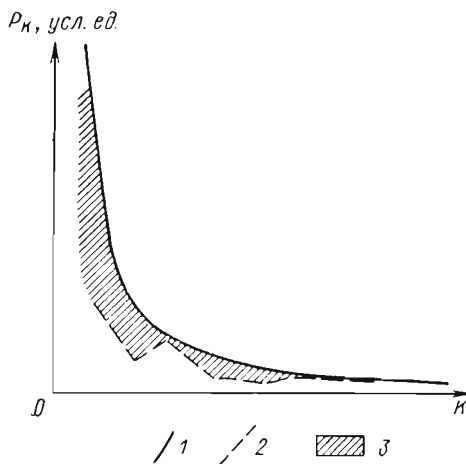
Рудное тело	Классы содержания, усл. ед.	Не выявленные запасы, %	Суммарные не выявленные запасы, %	Рудное тело	Классы содержания, усл. ед.	Не выявленные запасы, %	Суммарные не выявленные запасы, %
а	0,05	10,5	10,5	е	0,25	15,7	48,9
	0,005	2,1			0,75	27,9	
б	0,0075	2,1	10,5	ж	0,005	6,3	41,3
	0,075	6,3			0,0075	4,2	
	0,05	6,6			0,075	14,2	
в	0,075	11,1	24,3	з	0,25	8,3	8,0
	0,025	6,6			0,75	8,3	
	0,05	7,2			0,075	8,0	
г	0,75	2,4	9,6	Σ 191,8			
	0,0075	8,4					
д	0,005	14,6	38,7				
	0,075	15,7					
	0,75	5,3					

3. Определение минимального прироста запасов по графику распределения учтенных запасов по грациям руд различных содержаний. Задача решается следующими путями:

— сравнением средневзвешенных содержаний по учтенным рудам и теоретическим, взятым в пределах учтенных кондиций;

— построением теоретической кривой  $P_K=f(K)$  через высшую точку кривой учтенных запасов и определением неучтенного металла, т, по площади между теоретической и практическими кривыми; рис. 17 поясняет сказанное;

— комбинированием предыдущих способов;



**Рис. 17. Оценка перспективных рудных запасов территорий.**

1 — аппроксимирующая кривая запасов; 2 — установленные запасы; 3 — минимальная оценка перспективных запасов.

— использованием соотношений объемов руд и приуроченных к ним запасов.

В соответствии с представлением об образовании универсального рудообразующего раствора возможная эродированность месторождения не будет сказываться на реальности результатов.

### § 11. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЗАПАСОВ РУД В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ, ОБРАЗОВАННЫХ СИСТЕМОЙ РУДНЫХ ТЕЛ

Выше рассмотрены теоретические основы оценки перспективных рудных запасов с точки зрения геохимических представлений. Здесь изложены основы расчетов, использующие закономерности гидродинамического разрыва пластов горных пород — явления, открытого в двадцатых годах текущего столетия. По этому вопросу накоплена обширная литература, в том числе ряд обзорных работ и монографий. Две из них [31, 32] и послужили исходными для изложения теоретических сведений о гидродинамическом разрыве пород.

Гидравлическим (гидродинамическим) разрывом пласта называется процесс образования и распространения трещин в горных породах под воздействием давления, которое оказывает на горные породы жидкость, газ и расплавленные магматические породы. Таким образом, гидродинамический разрыв пласта может происходить как при искусственном воздействии на горные породы, так и в естественных условиях.

При искусственном разрыве в заранее выбранном интервале скважины создают высокое давление путем закачки в пласт вязкой жидкости. Когда давление нагнетаемой жидкости превысит некоторое значение, в пласте образуется начальная трещина. Эту трещину удлиняют и расширяют путем закачки в нее жидкости. В результате упругой деформации горных пород края трещины сужаются, поэтому на последнем этапе искусственного гидродинамического разрыва пласта в жидкость подмешивают песок, который препятствует после снятия давления сжодению стенок трещины. Искусственный гидродинамический разрыв пласта применяется в нефтедобывающей промышленности обычно для того, чтобы повысить продуктивность нефтяных, нагнетательных и газовых скважин. Наряду с этим можно преследовать и другие цели, например создание экранов, препятствующих подтягиванию конусов воды в скважины, сбойка скважин для подземной газификации углей, дегазации угольных пластов и т. п.

Упомянутый разрыв может привести и к вредным явлениям. Например, если при бурении скважины под действием промывочной жидкости в горных породах образуются трещины, то возникает опасность катастрофического ухода глинистого раствора; аналогичным образом при накачке подземных газохранилищ (при чрезмерно высоких давлениях газа) во вмещающих породах могут образоваться вертикальные трещины, по которым закачиваемый газ уйдет в вышележащие пласты или в атмосферу.

Для выяснения механизма гидродинамического разрыва пласта интересно сравнить критическое давление, при котором начинают образовываться трещины, с вертикальным горным давлением. Для этого приведем объяснение Ю. П. Желтова некоторых терминов.

В пластах или массивах горных пород существует естественное напряжение, возникшее в результате действия на породы силы тяжести, сил, связанных с тектоническими процессами, и других сил физико-химической природы. Это напряжение называют горным давлением. Различают вертикальную и горизонтальную составляющие, которые можно назвать соответственно полным и боковым горным давлением. Значение каждой из составляющих определяется плотностью вышележащих горных пород, типом и интенсивностью тектонических процессов и некоторыми другими обстоятельствами. Другими словами, есте-

ственное напряжение внутри горных пород — горное давление — является продуктом всего процесса образования геологических структур.

Знание горного давления необходимо как при исследовании, так и при практическом осуществлении многих процессов в горных породах. Можно двумя путями определить горное давление. 1. Прямое измерение в пластах или массивах горных пород, наблюдение над разрывами пластов с помощью геофизики и пр. 2. Расчет горного давления методами механики сплошных сред, что хотя и сопряжено со многими теоретическими трудностями, тем не менее оказывается во многих случаях единственно возможным способом, дающим вполне приемлемые для практики результаты. Укажем основной случай, когда составляющие горного давления могут быть рассчитаны. Это имеет место при отсутствии значительных тектонических движений в горизонтальном направлении и при почти горизонтальном залегании пластов, когда вертикальная компонента  $q_v$  горного давления определяется действием силы тяжести и рассчитывается по формуле

$$q_v = \sum_{i=1}^n d_i h_i, \quad (52)$$

где  $d_i$  — плотность пород;  $h_i$  — мощность слоя пород.

Следует иметь в виду, что плотность пород может расти с глубиной. Так, у Ю. П. Желтова [31, 32] плотность пород при изменении глубины залегания с 0 до 1500 м возросла в 1,17 раза. При этих же условиях боковое горное давление  $q_b$  не превосходит вертикального горного давления; формула для его расчета имеет вид

$$q_b = \alpha q_v, \quad (53)$$

где  $\alpha < 1$  — коэффициент бокового давления, зависит в основном от коэффициента Пуассона.

Таким образом, вертикальная составляющая горного давления будет наибольшей, горизонтальная — наименьшей.

Если в упругом пласте отсутствовали значительные тектонические движения и, следовательно, деформация каждого элемента пород в горизонтальном направлении равна нулю, то коэффициент  $\alpha$  может быть рассчитан по следующей простой формуле:

$$\alpha = \nu / (1 - \nu), \quad (54)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Для прочных песчаников  $\nu = 0,25$ ,  $\alpha = 0,33$ ; для алевролитов  $\nu = 0,4$ ,  $\alpha = 0,66$ . Эти значения в общем согласуются с практическими американскими данными, полученными в результате анализа гидродинамических разрывов пластов. По этим данным для прочных пород (песчаников)  $\alpha = 0,3 \div 0,4$ ; алевролитов

$\alpha=0,6\div 0,7$ . Таким образом, в среднем коэффициент бокового давления  $\alpha\approx 0,5$ . Необходимо подчеркнуть, что естественное напряжение в горных породах может иметь неодинаковые значения в различных точках одного и того же пласта. Это особенно относится к боковому горному давлению, которое может претерпевать большие изменения.

Сравним критическое давление, при котором начинают образовываться трещины, с вертикальным горным давлением. Данные по этому вопросу приведены во многих литературных источниках по разным районам. Так, на Ромашкинском нефтяном месторождении критическое давление было определено по 73 скважинам средней глубиной до 1700 м, для 39 из них (53% от общего количества скважин) было установлено, что коэффициент  $\alpha\leq 0,8$ . На месторождении Ключевское (при глубине скважин 2100—2350 м) коэффициент  $\alpha=84,7\div 97,8$  и лишь в одном случае оказался равным 1,14. На Туймазинском нефтяном месторождении коэффициент  $\alpha=0,61\div 0,75$ , в среднем 0,67. Аналогичные результаты получены по разрывам пластов на нефтяных месторождениях Азербайджана.

В промысловых условиях были проведены многочисленные опыты по определению ориентировки трещин, образующихся при гидродинамических разрывах пластов, в том числе с использованием нефтедобывающих шахт. Они показали, что в зависимости от естественного напряженного состояния пластов и способа осуществления разрывов последние могут быть вертикальные (и близкие к ним) и горизонтальные (и близкие к ним). Многие исследователи, особенно американские, теоретически считают, что образование вертикальных трещин разрыва много вероятнее, нежели горизонтальных. Ю. П. Желтов считает, что размеры трещин могут достигать в длину нескольких десятков метров и зависят от подаваемых давлений, количества трещинообразующей жидкости и т. п.

Интересны выражения для определения параметров образующихся трещин. Однако задача определения этих параметров для трещин, образующихся в трехмерном пространстве, решена лишь для крайне ограниченных размеров, поэтому обратимся к решению плоской задачи. В этом случае допустим, что имеется одиночная трещина длиной  $2l$ , расположенная в бесконечной упругой плоскости (рис. 18); на контур трещины действует в направлении, параллельном оси  $OY$ , постоянная распирающая нагрузка  $p$ , кгс/см<sup>2</sup>. Тогда, как указывает Ю. П. Желтов [31, 32], согласно Н. И. Мухелишвили, ширина (мощность) образующейся трещины

$$m_0 = \frac{4(1-\nu^2)pl}{E} = \frac{2(1-\nu^2)\cdot 2lp}{E} = A\cdot 2l, \quad (55)$$

где  $m_0$  — мощность трещины;  $l$  — полудлина трещины в упругой плоскости;  $E$  — модуль Юнга.

Из формулы (55) следует, что ширина (мощность) образующейся трещины пропорциональна ее линейному размеру (длине  $2l$ ), поскольку остальные величины постоянные.

В теории сопротивления материалов рассматривается деформация двух толстых плит, шарнирно закрепленных по периметру, в результате воздействия внутренней равномерно распределенной распирающей нагрузки.

Для дальнейшего предположим, что:

а) толщина стенок  $h$  трещин при всех размерах постоянная и значительно превосходит линейные размеры, т. е.  $h = \text{const}$ ,  $h \gg 2l$ ;

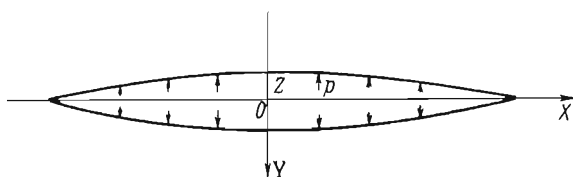


Рис. 18. Образование вертикальной трещины в бесконечной упругой плоскости под влиянием равномерной распирающей нагрузки  $p$ .

б) внутреннее (деформирующее) давление  $p$ , кгс/см<sup>2</sup>, статистически постоянное и равномерно распределено по всей площади стенок;

в) извне на трещины оказывает влияние только всеобщее гидростатическое давление, специальной односторонней нагрузки нет.

При этих условиях, согласно «Справочнику машиностроителя», 1956 г., для центров плит раздвижение (мощность)  $m_0$  будет определяться по формуле

$$m_0 = C \frac{pl^4}{Eh^3} \left[ 1 + \alpha \left( \frac{h}{2l} \right)^2 \right], \quad (56)$$

где  $2l$  — длина трещины, принимаемой для простоты квадратной;  $h$  — толщина плиты;  $C$ ,  $\alpha$  — постоянные коэффициенты, определяемые только формой деформирующихся плит.

Формулу (56) можно преобразовать к виду

$$m_0 = C \frac{pl}{E} \left[ \left( \frac{l}{h} \right)^3 + \frac{\alpha}{4} \cdot \frac{l}{h} \right].$$

По условию  $h \gg 2l$ , следовательно,  $2l/h \ll 1$ ; так как положительная степень правильной дроби всегда меньше самой дроби,

то степени  $(l/h)^3$  можно пренебречь по сравнению с  $(l/h)$  и мы получим после упрощения

$$m_0 = C \frac{pl}{E} \cdot \frac{\alpha}{4} \cdot \frac{l}{h} = \frac{C\alpha}{4} \cdot \frac{p}{Eh} l^2 = Al^2 = AS, \quad (57)$$

где  $A$  отображает произведение всех постоянных коэффициентов.

Из формулы (57) следует, что ширина (мощность) образующейся трещины при известных условиях может быть пропорциональной площади самой трещины.

Для естественного образования трещин при гидротермальном рудообразовании можно сделать следующее заключение [71].

1. Трещины (пути продвижения и камеры рудоотложения при гидротермальном рудообразовании) вполне могут возникнуть под воздействием внутреннего давления гидротермальных растворов.

2. Процесс образования гидротермальных трещин находит свое естественное объяснение в том, что на глубинах рудообразования (первые километры) гидростатически уравновешенное горное давление пород еще не наступило и, наоборот, наблюдается неравномерное распределение составляющих этого давления. Вертикальная составляющая горного давления превосходит горизонтальную, т. е. сопротивление стенок трещины горизонтальному их раздвижению меньше, чем вертикальное давление на них.

3. Возникающие условия совершенно аналогичны тем, которые существуют при гидродинамическом искусственном разрыве пластов с той только разницей, что вместо разрывного усилия, обеспечиваемого водяным насосом, действует особый механизм.

4. Сущность этого механизма стоит в прямой связи со способностью газоводных сред, к которым должны быть причислены и гидротермы, трансформировать одностороннее давление на них во всестороннее той же интенсивности (закон Паскаля). Гидротермальный раствор, воспринимая в недрах повышенную вертикальную составляющую горного давления, с той же силой действует и в горизонтальном направлении на стенки, оказывающие пониженное сопротивление, в результате возникает вертикальный (или близкий к нему) разрыв горных пород.

5. Подавляющее количество трещинных гидротермальных рудных месторождений, не затронутых последующей тектоникой, имеют вертикальные (или близкие к этому) падения, это служит доказательством описанного образования рудовмещающих трещин. Подобным же доказательством может служить и часто наблюдаемое в практике отсутствие продолжения оформленной рудовмещающей трещины как вверх по восстанию, так и вниз по падению от собственно рудного тела и прослеживаемой с трудом по нечетким следам. Это обстоятельство является



прямым доказательством схождения стенок образовавшейся трещины, если только процесс прохождения гидротермы по трещине не завершился отложением в ней расклинивающего рудного материала.

6. Все сказанное относится к индивидуальным трещинам. На самом деле в природе при рудообразовании возникают одновременно системы их. В связи с этим возникает вопрос: по какому закону распределены запасы данного выбранного средневзвешенного содержания по рудным телам различной (линейной) крупности? Иными словами, каковы количественные запасы металлов, заключенные в крупных, средних и мелких залежах (месторождениях) с одинаковыми (в среднем) содержаниями металлов в рудах? Для этого рассмотрим основные вероятностные закономерности, применимые ко всей совокупности ослабленных зон, естественно возникающих в рамках замкнутого процесса гидротермального трещинообразования.

Напишем

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = eS = e(N_1S_1 + S_2N_2 + \dots + N_nS_n), \quad (58)$$

где  $S$  — суммарная поверхность всех земных плоскостей разрыва (ослабленных зон);  $N_1, N_2, \dots, N_n$  — количества разрывных поверхностей, группирующихся около средних их значений по площади  $S_1, S_2, \dots, S_n$ ;  $e$  — расход механической энергии на образование единичной по площади разрывной поверхности;  $E$  — суммарная энергия трещинообразования;  $E_n$  — количество той же энергии, израсходованное на образование  $N_n$  трещин площадью  $S_n$ .

Трудно предположить существование разрывных трещин каких-либо привилегированных значений по площади, термодинамическая напряженность трещинообразования, определяемая значением  $e$ , всюду без большой ошибки может считаться единой, поэтому предположим, что  $E_1 = E_2 = \dots = E_n$ , тогда

$$\left. \begin{aligned} N_{n-1}S_{n-1} &= N_nS_n; \\ N_n/N_{n-1} &= S_{n-1}/S_n. \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

Предположим, что трещины имеют квадратную форму, т. е. стенки трещин являются квадратными плитами. Отсюда

$$\left. \begin{aligned} S_n &= l^2_n; \\ N_{n-1}/N_n &= l^2_n/l^2_{n-1}; \\ N_{n-1} &= N_n l^2_n/l^2_{n-1}. \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

Пришли к первому основному выводу, что независимо от размера трещин и, следовательно, от связанных с ними запасов, количество трещин (численность месторождений различной линейной крупности) подчиняется обратному квадратичному закону. Рис. 19 иллюстрирует сказанное.

Выше было показано [формула (55)], что мощность образующейся трещины зависит от линейного размера трещины по простиранию. Это обстоятельство позволяет установить соотношение объемов, а следовательно, и запасов, сосредоточенных в рудных телах различных линейных размеров. По выражению (55) объем одной трещины

$$V_n = aS_n m_0 = aS_n \frac{2(1-\nu^2)\rho}{E} \cdot 2l = abS_n \cdot 2l_n, \quad (61)$$

где  $a$  — постоянный коэффициент, учитывающий влияние формы тела на его объем;  $b = 2(1 - \nu^2)\rho/E$  — постоянный коэффициент, учитывающий совокупное влияние коэффициента Пуассона  $\nu$ , модуля Юнга  $E$  и трещинообразующей разрывной нагрузки  $\rho$ ;  $S_n$ ,  $2l_n$  — боковая площадь и линейный размер трещины.

Запас в одном теле

$$P_n = dab \cdot 2l_n S_n,$$

где  $d$  — плотность единообразной кондиционной руды.

Для другого тела размером  $2l_{n-1}$  будем иметь

$$P_{n-1} = dab \cdot 2l_{n-1} S_{n-1}.$$

Тогда суммарные запасы во всей совокупности рудных тел

$$P_n = \Sigma P_n = N_n S_n dab \cdot 2l_n;$$

$$P_{n-1} = \Sigma P_{n-1} = N_{n-1} S_{n-1} dab \cdot 2l_{n-1}.$$

Отсюда соотношение запасов

$$\frac{P_n}{P_{n-1}} = \frac{N_n S_n dab \cdot 2l_n}{N_{n-1} S_{n-1} dab \cdot 2l_{n-1}} = \frac{2l_n}{2l_{n-1}}, \quad (62)$$

где  $d$ ,  $a$ ,  $b$  — постоянные величины;  $N_n S_n = N_{n-1} S_{n-1}$  — по условию.

На рис. 20 (кривая 1) изображен график, отвечающий формуле (62). Таким образом, пришли к выводу: ширина (мощность) образующейся трещины, а следовательно, и рудного те-

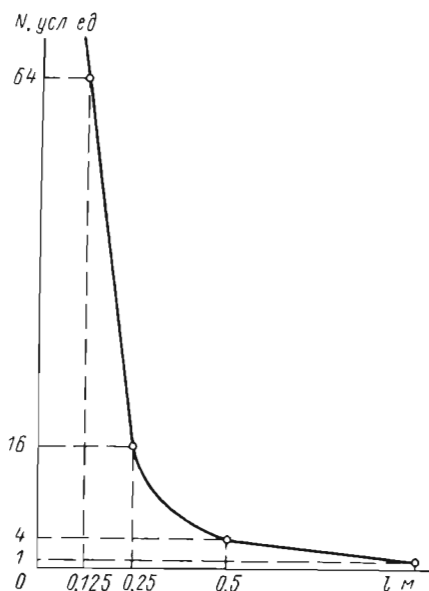


Рис. 19. Зависимость количества трещин  $N$  от их длины  $l$ .

ла, в случае ее выполнения минеральным веществом, определяется линейным размером.

Вместе с тем нельзя забывать, что согласно формуле (57) мощность трещины, когда она полностью ограничена по периметру, может зависеть и от площади (а не от линейного размера) трещины. Действуя способом, совершенно аналогичным тому, который был использован в предыдущем разделе, получаем следующее выражение для отношения запасов, сосредоточенных в рудных телах различных линейных размеров:

$$\frac{P_n}{P_{n-1}} = \frac{\Sigma P_n}{\Sigma P_{n-1}} = \frac{S_n}{S_{n-1}} = \frac{l_n^2}{l_{n-1}^2} = \left(\frac{2l_n}{2l_{n-1}}\right)^2. \quad (63)$$

На рис. 20 (кривая 2) изображен график, отвечающий формуле (63). Таким образом, пришли к выводу: ширина (мощность) образующейся трещины, а следовательно, и рудного тела, в случае ее выполнения минеральным веществом, определяется площадным размером.

На практике будут сочетаться трещины, а следовательно, и рудные тела с

мощностями  $m_0$ , различным образом зависящими от их линейных размеров по простиранию  $2l$ , однако заключенными в пределах  $f(2l) \leq m_0 \leq f(S)$ . Отсюда следует, что в общем случае для систем трещин (рудных тел) наивероятнейшей зависимостью суммарных запасов и их отношений от линейных размеров должны явиться выражения

$$P_n = a(2l_n)^\gamma; \quad \frac{P_n}{P_{n-1}} = \frac{a(2l_n)^\gamma}{a(2l_{n-1})^\gamma} = \left(\frac{2l_n}{2l_{n-1}}\right)^\gamma, \quad (64)$$

где  $P_n, P_{n-1}$  — суммарные запасы однокондиционных руд в рудных телах линейных размеров  $2l_n$  и  $2l_{n-1}$  по простиранию соответственно;  $a$  — постоянный коэффициент, учитывающий зависимость запасов от формы залежей, постоянный во всей серии родственных рудных тел;  $\gamma$  — постоянный для данной серии родственных рудных тел коэффициент ( $1 \leq \gamma \leq 2$ ).

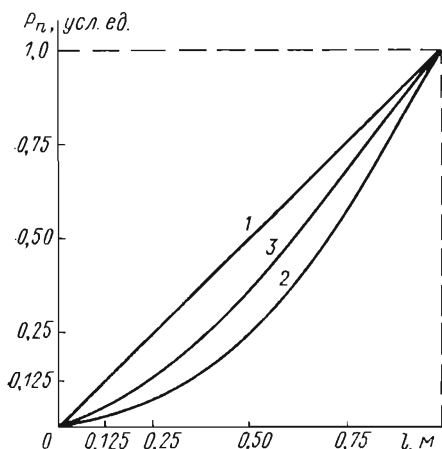


Рис. 20. Суммарные запасы рудных тел различной длины по простиранию.

Мощность пропорциональна: 1 — длине по простиранию, 2 — квадрату длины, 3 — мощности в степени 1,5.

На рис. 20 (кривая 3) изображен график, отвечающий формуле (64). Таким образом, пришли к основному выводу: ширина (мощность) образующейся трещины (а следовательно, и рудного тела) заключена в пределах от линейной до квадратичной зависимости от линейных размеров (иначе, длин по простиранию) рудных залежей.

Формулы (60), (62)—(64) предоставляют возможности для дальнейших выводов. Действительно, примем максимальное по длине по простиранию рудное тело за единицу и в долях этой условной единицы определим линейные размеры других залежей. То же самое сделаем и в отношении запасов, приняв максимальный запас, сосредоточенный в максимальном по длине рудном теле, за единицу. Тогда получим следующие расчетные формулы:  $n = 1/l^2$  (для количества рудных тел),  $P = \alpha l^1$ ;  $P = \beta l^\gamma$ ;  $P = \delta l^2$  (для запасов, сосредоточенных в рудных телах различной мощности), где  $n$  — количество жил;  $P$  — суммарный запас в совокупности рудных тел;  $l$  — линейный размер залежи; 1,  $\gamma$ , 2 — показатели степени при  $l$ , характеризующие зависимость мощности рудного тела от его длины (1 — линейная, 2 — квадратичная,  $\gamma$  — промежуточная зависимость);  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  — постоянные коэффициенты.

Интегрирование этих уравнений дает следующие зависимости для рудных тел в пределах от  $l_1$  до  $l_2$ :

$$\sum_{l_1}^{l_2} n = N = \left[ -1/l \right]_{l_1}^{l_2}. \quad (65)$$

Для запасов, сосредоточенных во всей совокупности рудных тел, линейный размер от  $l_1$  до  $l_2$ :

$$\left. \begin{aligned} \sum_{l_1}^{l_2} P &= \frac{1}{2} \alpha [l^2]_{l_1}^{l_2}; \\ \sum_{l_1}^{l_2} P &= \frac{1}{1+\gamma} \beta [l^\gamma]_{l_1}^{l_2}; \\ \sum_{l_1}^{l_2} P &= \frac{1}{3} \delta [l^3]_{l_1}^{l_2}. \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

По формулам (66) составлена табл. 33.

Все вышеизложенное позволяет сделать три основных вывода, имеющих общее значение.

1. Между числом рудных тел, их линейными размерами и заключенными в них запасами при условии общности происхождения всей системы залежей имеются определенные математические зависимости.

Количество рудных тел и запасы в них

Интервалы рудных тел по длине $l$ по простиранию	Количество рудных тел в интервале, %	Запасы в рудных телах интервала при мощностях залежей, пропорциональных степеням		
		1,0	1,5	2
1—0,75	2,22	44,0	50,00	57,75
0,75—0,50	4,44	31,40	30,9	29,80
0,50—0,25	13,34	18,90	15,6	10,90
0,25—0,125	26,70	4,40	2,70	1,37
0,125—0,0625	53,30	1,20	0,80	0,18
1—0,0625	100,00	100,00	100,00	100,00

2. В системе рудных тел района число крупных по масштабам проявления залежей значительно меньше средних, а тем более мелких.

3. Небольшое количество крупных залежей несет в себе подавляющую часть запасов руд района.

Закономерность, что количество точек минерализации, рудопроявлений и мелких непромышленных месторождений неизмеримо превышает промышленные в пределах любого рудного района, хорошо известна любому геологу. Так, согласно данным В. И. Красникова, в среднем крупные месторождения составляют 7% по их числу, но они содержат 65% общих запасов металлов, в то время как средние и мелкие месторождения составляют 23 и 70% при суммарных запасах в них 26 и 9% соответственно. По данным Л. Сливтера, в рудном районе Бэзин и Рэндж (США) рудные тела длиной 12 м встречаются в 330 раз чаще, чем тела длиной 660 м, однако суммарная стоимость последних в 500 раз превышает суммарную стоимость первых. В этом же районе всего 4% от существующих здесь рудников обеспечивают 80%, а 16% рудников — 97% всей добычи руд. При этом месторождения «слоны» (с добычей, оцениваемой свыше 1 млрд. долларов) встречаются 1 раз на 1000.

По И. Ф. Григорьеву, на Рудном Алтае всего 2,6% от числа известных месторождений в общей добыче руд обеспечивали 98,5%. По С. С. Смирнову, аналогичные цифры в Восточном Забайкалье составляют 4,2 и 92%. Наконец, по А. В. Сидоренко, всего 15% от всех медных месторождений обеспечивают 86% запасов и всю добычу этого металла; в то же время 2% от числа месторождений нефти содержат в себе 50% запасов.

Основываясь на закономерностях, управляющих количеством месторождений и объемными запасами, сконцентрирован-

ными в группах месторождений однообразных линейных размеров, можно утверждать, что эти закономерности служат в качестве оценочных критериев перспективной рудоносности территорий. Эти критерии на практике используются разными путями. Согласно первому прогнозные запасы, а с ними числа и ожидаемые размеры еще не вскрытых рудных тел будут пропорциональными разностям площадей под соответствующими теоретическими и фактическими кривыми. Другой путь связан с использованием теоретических математических соотношений и последующим сравнением с практическими.

Пусть имеется полная система рудных тел, возьмем подсистему, характеризующуюся для индивидуальных представителей какой-либо особенностью, например, запасы руд в объемном исчислении в каждом представителе составляют ряд  $1 : 10 : 100 : 1000$ . Тогда легко показать, что при среднем показателе 3,5 для зависимости  $V = l^a$  ( $3 < a < 4$ ) суммарные численности рудных тел в выбранных классах составят ряд  $52 : 14 : 4 : 1$ , в то время как ряд суммарных запасов руды (и металла в предположении однокондиционности руд) в отдельных классах, в процентах к полным запасам в 4 классах, будет выражаться как  $3 : 9 : 24 : 64$ . На практике сравнивают теоретические соотношения объемных запасов и практические. Отклонения в ту или иную сторону должны быть интерпретированы как еще не вскрытые рудные перспективы. Вместе с тем следует подчеркнуть, что последнее заключение будет иметь полную силу лишь при отсутствии эродированности месторождения. Это следует из того, что в системе рудные тела связаны между собой единой закономерностью, нарушение которой должно быть учтено введением поправок.

Особенных результатов надлежит ожидать от совместного использования критериев, установленных в районе по условиям и объемам руд. Геометрический (объемный) критерий должен восполнить описанные выше критерии по качеству руд. Действительно, по статистическим данным о размерах рудных тел и запасам руд, сосредоточенных в них (по району), устанавливается в каких по линейным размерам и в каком количестве рудных тел можно обнаружить еще не вскрытые запасы, предсказываемые критериями по качеству.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ В ПРАКТИКЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Глава целиком посвящена результатам использования теоретических расчетных формул в практике различных геолого-поисковых исследований.

Понятие энергии рудообразования и, следовательно, весь расчетный аппарат безоговорочно следует применять для коренных образований. Используя тождественность результатов анализа проб данного геологического материала вне зависимости от того, взяты ли пробы от монолита или собраны из кусков естественно дробленного материала, предполагаем, что состояние коренных образований — монолитные выходы или кусковый элювий-делювий — не имеет значения. Важно, однако, чтобы опробуемые образования не несли бы следов химического выветривания. Здесь имеются в виду первичные горные породы, руды, ореолы первичного рассеяния и т. п.

Во всех вторичных геологических образованиях (рыхлые, подвергшиеся химическому выветриванию покровные породы, ореолы вторичного рассеяния, любой дальнепринесенный материал и т. п.) дело усложняется и требуется применение особых приемов геохимического опробования, введение поправок и оговорок и др.

Хорошо известен из обширной практики поисков месторождений по их ореолам вторичного рассеяния факт, что ореольные содержания падают (при прочих равных условиях) по мере роста мощности элювиально-делювиального покрова. При 10—12-метровой мощности покрова ореол исчезает. Естественно, возникает необходимость приведения параметра ореола по содержанию к одному уровню. Допустим, что определено содержание какого-либо элемента в эпицентре его ореола вторичного рассеяния  $C_{изм}$ , пусть в кларках концентрации эта величина выражается  $K_{изм}$ . Тогда энергия ореолообразования

$$E_{изм} = K_{изм} \ln K_{изм}. \quad (67)$$

Пусть истинное содержание в коренной руде (по спая) будет в  $i$  раз выше:  $K_{ист} = iK_{изм}$ . Тогда будем иметь  $E_{ист} = K_{ист} \ln K_{ист}$ .

Беря отношение  $E_{ист}/E_{изм}$ , другими словами, определяя поправочный коэффициент  $\alpha$  для перехода от измеренной энергии рудообразования к истинному ее значению, получаем

$$\alpha = \frac{E_{ист}}{E_{изм}} = \frac{K_{ист} \ln K_{ист}}{K_{изм} \ln K_{изм}} = i \frac{\ln(iK_{изм})}{\ln K_{изм}} = i \left( 1 + \frac{\ln i}{\ln K_{изм}} \right). \quad (68)$$

Содержание  $C_{ист}$  определяется при непосредственном измерении (в скважине или выработке) содержания интересующего ингредиента в руде или нахождением по известным формулам продуктивности рудного тела по продуктивности его ореола вторичного рассеяния с последующим пересчетом на содержание. Полученные цифры, выраженные через кларки концентраций, используются при расчетах энергии рудообразования.

Невыскрытые запасы оцениваются с использованием энергии рудообразования путем сравнения теоретической и практической кривых. Здесь, во-первых, обе кривые запасов должны быть построены для одинаковых интервалов содержаний; для теоретических кривых используются интегральные расчетные выражения. Во-вторых, при расчетах не следует учитывать эродированность рудных запасов, так как мало вероятно, что оно происходило выборочно, лишь в определенных градациях руд. Во всех же иных случаях эрозия одинаково сказывается на всех разновидностях, следовательно, соотношение запасов руд разных содержаний должно сохраниться. Выводы о рудных перспективах, построенные на реальных и теоретически выведенных весьма правдоподобных данных о вероятнейших соотношениях запасов различных содержаний, должны соответствовать истинным.

При оценке с использованием закономерности трещинообразования необходимо сравнивать теоретическую и практическую кривые численностей рудных тел в разумно выбранных пределах их длин по простиранию, причем теоретические численности устанавливаются по соответствующим интегральным формулам.

Дополнительно следует остановиться на влиянии эродированности рудных тел. Совокупность трещин (рудных тел) представляет собой закономерную систему, в которой отдельные звенья взаимосвязаны, и при этом так, что при случайном их нарушении соотношения между звеньями меняются. Ненарушенную систему рудных тел можно себе представить в виде своеобразной пирамиды, основание которой составляют мелкие тела, но в большом количестве, выше располагаются более крупные, но соответственно в меньшем числе, а вершину венчает одно тело, с ним связаны главные запасы системы. Естественно, что изъятие из пирамиды ряда слагающих ее элементов тотчас же нарушит соотношение частей.

Это обстоятельство составляет и силу и слабость метода оценки запасов по соотношению рудных тел различных разме-



ров. Теория позволяет предугадать количество рудных тел в заданной системе и с учетом уже обнаруженных залежей оценить перспективу рудоносности. Сколько рудных тел и каких размеров из общего их перспективного числа уничтожено эрозией и сколько имеется налицо не обнаруженных в недрах, установить нельзя. Поэтому рассматриваемый критерий оценки рудоносности слабее критерия энергии рудообразования, однако в совокупности с иными критериями геологической природы позволяет оценить степень эродированности изучаемого месторождения, рудного узла или района.

Следует отметить, что поскольку в расчетах с использованием представлений об энергии рудообразования не накопилось достаточно опыта, то в отдельных случаях при расчете дифференцированных запасов (даже при схожести ситуаций) применяются различные расчетные формулы, которые с вполне приемлемыми отклонениями дают единообразные конечные результаты.

## **§ 12. ЭНЕРГИЯ РУДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ**

Геохимическое картирование проводится для:

1) установления геохимических (металлогенических, петрографических) провинций;

2) установления родственности (по магматичности) изверженных пород;

3) расчленения немых толщ и выявления маркирующих горизонтов осадочных образований;

4) выявления первоначального генезиса метаморфических пород;

5) уточнения физико-химических и геологических условий образования различных пород, руд и минералов;

6) предварительной оценки перспективной рудоносности интрузий, вулканогенно-осадочных линз и осадочных серий.

При подобных исследованиях опробование проводится по коренному материалу, не носящему следов каких-либо вторично наложенных процессов, при исследовании генезиса метаморфизованных толщ опробуются реликтовые участки. Пробы каменного материала, отбираемые на анализ, должны быть представительными, т. е. соответствующими по составу опробуемой породе.

Назовем элементарной минералогической ячейкой объем (массу), сложенный породообразующими минералами, взятыми в зонах среднего для всей породы размера и в количествах, отображающих их содержание. Тогда, очевидно, представительной будет являться проба, по минеральному составу кратная элементарной ячейке. Строгое осуществление этого требования на практике затруднительно, и поэтому надо следить за тем,

чтобы реальная проба превосходила бы элементарную ячейку в такое количество раз, чтобы вероятная некрапность мало сказалась на определяемых величинах. На практике достаточно, чтобы отбираемая проба превосходила элементарную ячейку не менее чем в 10 раз. Отсюда следует, что представительные пробы будут разного объема для пород, сложенных зернами минералов различной крупности и различного содержания их в породе, и тем больше, чем крупнее зерна породообразующих минералов, неравномернее их содержания. При исследовании обычных изверженных и осадочных пород отбираются пробы массой около 200 г, что вполне достаточно для правильной характеристики их.

Следующим вопросом является количество проб, которое должно быть взято и проанализировано на изучаемом геологическом объекте для определения химического состава этого геологического образования. Если бы состав геологического образования был в любой точке неизменным, то достаточно взять одну пробу. Однако на самом деле в содержаниях данного элемента в разных пробах, взятых с одного и того же геологического объекта, неизбежно наблюдаются определенные флюктуации. Поэтому содержания элемента в пробах будут различными и подчинены при этом какому-либо определенному закону распределения (чаще всего логнормальному). В то же время в пробах, взятых с разных объектов, содержания случайно могут оказаться близкими. Чтобы уверенно характеризовать поэлементный состав исследуемого геологического объекта, приходится брать несколько проб.

В настоящее время общепринято, что для подавляющего числа малых (рудообразующих) элементов, находящихся в породах в состоянии сингенетического рассеяния, присуще закономерное распределение их содержаний. Для получения необходимых характеристик реального распределения содержаний элементов [10] в опробуемом геологическом материале вполне достаточно 16—20, реже 30 проб. Часто на практике приходится ограничиваться взятием с объекта всего 5—8 проб, однако в этом случае отклонения от истинных содержаний могут достигать больших значений, если закон распределения не близок к равномерному.

Пробы (вне зависимости от их числа) распределяются по поверхности исследуемого объекта с одинаковой плотностью. Опробовать следует все однородные геологические образования, индивидуально отображаемые на карте в масштабе проводимых работ. По ряду содержаний исследуемого элемента при помощи соответствующих статистических приемов обработки определяются мода (или медиана), стандартное отклонение, эксцесс и т. п. За кларк, как правило, принимается модальное значение. Эти параметры однозначно характеризуют особенности распределения содержаний исследуемого элемента в изу-

чаемом объекте. Сравнение их по ряду объектов и позволяет делать все надлежащие геохимические выводы. Пробы перед анализом обрабатываются по общепринятым правилам, основным видом исследования химического состава проб является спектральный анализ.

Результаты геохимических исследований необходимо давать либо в виде таблиц, либо в виде геохимических карт. Следует заметить, что на принципы построения последних еще не выработалось общих взглядов. Очень эффективное построение элементарных геохимических карт приводит на практике к громоздким графическим материалам либо к перегрузке карт. В связи с этим приходят к выводам о рациональности составления геохимических карт по ассоциативным группам элементов и отображают особенности проявления этих групп в виде единых показателей. Для этого можно рекомендовать следующие ассоциативные группы элементов-показателей:

общей минерализации — I, Br, Cl, F, S, Se, Te;  
пегматитового процесса — Li, Rb, Cs, Be, Nb, Ta, Sc;  
кварцеворудного рудообразования — Sn, W, Mo, B;  
сульфидного рудообразования — Cu, Zn, Pb, Cd, In, Tl, Ge,  
Bi, As, Sb, Au, Ag, Ba, Hg;  
редкоземельной минерализации — Y, TR, Zr, Hf, Th, U;  
эвмагматического рудообразования — Ni, Cr, Co, плати-  
ноиды.

Все эти группы можно одновременно нанести на геохимической карте различными значками или изолиниями, если позволяет масштаб съемки, или отобразить объединенно. Принципиальным показателем, позволяющим объединять группы элементов независимо от их числа и состава в группе является энергия рудо-ореообразования. Основными расчетными формулами служат выражения (27) и (28).

Рассмотрим методику построения геохимических карт. По отношению к выбранной базе сравнения определяют  $K_i$  для каждого из исследуемых элементов; затем вычисляют нужные значения по уравнению (27). За базу сравнения при мелко-масштабных съемках (1 : 1 000 000—1 : 500 000) следует выбирать литосферу в целом; при средне- и крупномасштабных работах (1 : 200 00—1 : 25 000) рациональнее брать наиболее распространенные в районе безрудные изверженные породы типа гранитоидов.

На карту рекомендуется при мелко-масштабных съемках выносить сумму энергии рудообразования по всем исследованным элементам или отдельно сумму по элементам, подвергнувшимся или только привносу, или только выносу. При средне- и крупномасштабных исследованиях на карту наносят суммарную энергию рудообразования по ассоциативным группам элементов. Все изложенное в полной мере относится к геохимическому картированию по коренным образованиям.

Рассмотрим геохимическое картирование на площадях, перекрытых дальнепринесенным материалом — ледниковыми, золовыми и аллювиальными отложениями. В этом случае результаты опробования по поверхности ни в коей мере не могут быть отнесены к подстилающим их на глубине коренным породам и могут служить для геохимической характеристики покровных пород. Для геохимического опробования коренных пород необходимо использовать современную буровую технику.

Интересный случай представляет собой геохимическое картирование на площадях, перекрытых мощным чехлом элювиально-делювиальных пород, которые поверхностным химическим выветриванием превращены в существенно глинистые образования. При химическом выветривании коренных пород большинство рудообразующих элементов-примесей остается в новообразующихся элювиально-делювиальных глинах неприкосновенным (более того, содержания некоторых из них за счет сорбции несколько увеличиваются), поэтому геохимическое картирование можно проводить даже с опробованием по поверхности. Однако тождественное приближение результатов опробования к данным по коренным породам ожидается при глубинном скважинном опробовании по выходящим под наносы коренным породам.

При геохимическом картировании на площадях с относительно тонким элювиально-делювиальным покровом мы можем столкнуться с ореолами вторичного рассеяния, развитыми в исследуемом покрове. Если отбор проб по поверхности будет вполне достаточным для геохимической характеристики подстилающих коренных пород, то показатели проб, взятых на площади ореола вторичного рассеяния, должны быть приведены к коренному рудному телу [см. формулу (68)].

Материал, полученный при геохимическом опробовании кусков выноса пролювиальных потоков, аллювиальных донных осадков небольших ручьев и речек и реже коллювия склонов, не рассматривается как равноправный данным геохимического картирования, он не учитывается при составлении собственно геохимической карты, а при нанесении его на карту применяются специальные знаки. Эти данные являются важнейшим материалом при перспективной рудной оценке бассейнов питания опробованных образований. Для удобства и краткости характеристики используются показатели суммарной энергии рудообразования.

Рассмотрим два примера геохимического картирования рудных площадей, проведенного в Северном Казахстане.

В геологическом строении первой рудной площади принимают участие метаморфические и вулканогенно-осадочные отложения среднего и позднего протерозоя, кембрия, раннего и среднего ордовика, прерванные в различных частях рудного поля позднепротерозойскими и позднеордовикскими интрузиями

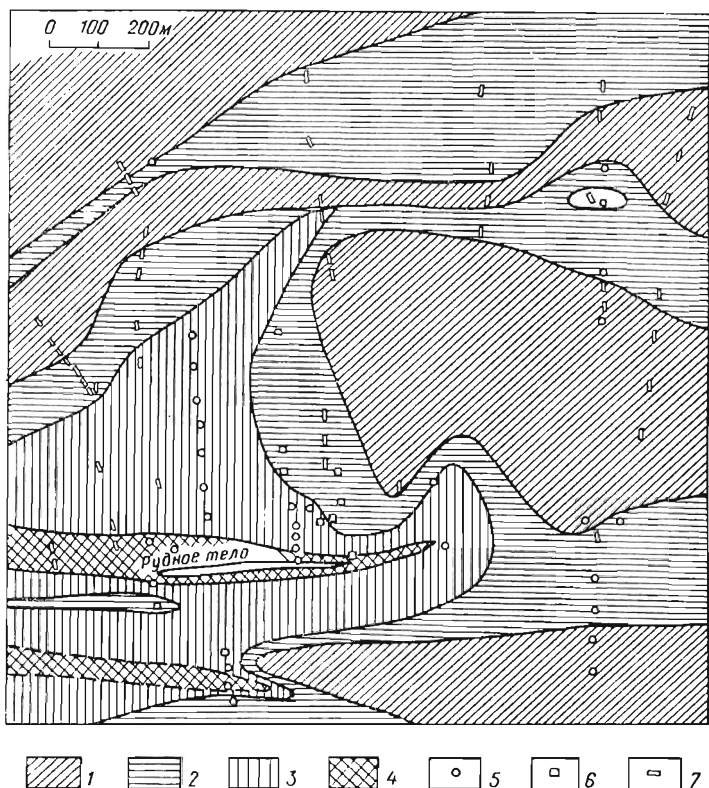
основного и среднего состава. В структурном отношении площадь месторождения представляет собой моноклираль, оборванную на юге зоной тектонических нарушений. Породы, слагающие моноклираль, падают на север под углом 50—60°. Поверхностные рыхлые покровы представлены элливиально-делювиальными образованиями переменной мощности от 0 до 10 м. Рудные тела месторождения, обнаруженного на этой площади, приурочены к тектонической зоне широтного простирания, выполняют систему оперяющих ее трещин северо-восточного направления. Они обычно локализованы в толще конгломератов, надвинутых на алевролиты и песчаники. Надвиг падает на юг под углом 15—25°. Оруденение, как правило, ограничено этим надвигом.

На месторождении известно несколько рудных тел, представленных кварцево-баритовыми линзами с сульфидами. Наиболее крупная из рудных залежей — это линза № 1, прослеженная по простиранию более чем на 100 м при средней мощности 6,5 м. Минералогический состав руды — барит и кварц как основные жильные минералы и, кроме того, галенит, сфалерит, халькопирит, гематит, магнетит, малахит. Границы рудных тел обычно четкие, распределение оруденения неравномерное. Рудные минералы образуют прожилки и гнезда, а также встречаются в виде рассеянной вкрапленности. Ореолы первичного рассеяния рудных тел имеют те же линзообразные формы и прослеживаются во вмещающих породах до 30—35 м; они имеют зональное строение, причем для внешней зоны обычно характерны медь, мышьяк и цинк.

Оруденение вскрыто и изучено канавами, картировочными и поисковыми скважинами. Геохимическое опробование рудовмещающих толщ по поверхности и из горных выработок было проведено повсеместно на всей рудоносной площади по сетке 50×20 м. Обогащение коренных пород широким набором рудообразующих элементов сульфидного ряда и особенно медью, свинцом, цинком, висмутом, мышьяком и другими элементами выявлено на участке скв. 15, 17 и 24, где четко прослеживаются аномалии вызванной поляризации.

При графическом изображении результатов геохимической съемки использованы показатели суммарной (по всем выявленным элементам) энергии рудо-ореолообразования (рис. 21). Из рис. 21 ясно следует, что на общем сравнительно слабо проявленном аномальном фоне очень четко выступают две широтные узкие геохимические аномалии. Первая аномалия значительно выше 100 ед. энергии рудообразования приурочена к конгломератам (рудное тело № 1) и позволяет надеяться на продолжение промышленного оруденения в западном направлении. Вторая аномалия такой же суммарной интенсивности, как и первая, расположена в 200—250 м к югу от нее и также имеет горизонтальное простирание. Следует подчеркнуть, что

отображение этой аномалии по отдельным элементам дало весьма пеструю картину. Тем не менее ряд благоприятных черт, сближающих рассматриваемую вторую аномалию с заведомо рудоносной первой, позволил задать здесь ряд скважин, которые и подсекли новые рудные тела.



**Рис. 21. Геохимическая карта рудного участка, построенная в показателях суммарной энергии рудообразованиями.**

Энергия, усл. ед.: 1 — <10, 2 — 10—50, 3 — 50—100, 4 — >100; 5 — буровые скважины; 6 — шурфы; 7 — каналы.

Рассматривая геохимическую карту первого участка в целом, можно сделать вывод, что суммарная энергия рудообразования отмечается в юго-западной части, где и следует в дальнейшем выявлять перспективные участки.

В геологическом строении второй рудной площади принимают участие метаморфические сланцы и гнейсы раннепротерозойского возраста, прорванные интрузиями сиенито-диоритов и дайками кислого и среднего состава. Последние образуют жильные пояса, локализующиеся в зонах тектонических нару-

шений. В тектоническом отношении рассматриваемая площадь приурочена к области докаледонской складчатости, она расположена на стыке анти- и синклинория. Местами сохранились мощные коры выветривания. Поверхностные рыхлые покровы представлены элювиально-делювиальными образованиями переменной мощности (от 0 до 10 м) и местами — мощными глинами неогена.

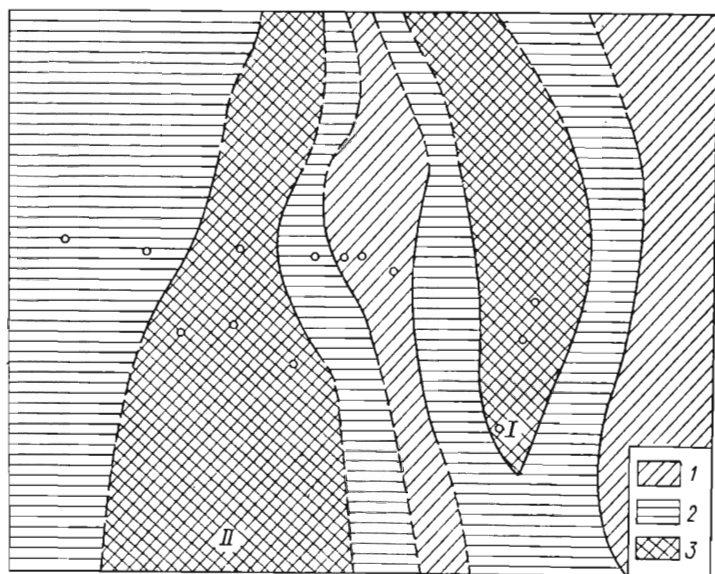


Рис. 22. Геохимическая карта второго рудного участка построенная в показателях суммарной энергии рудообразования.  
Энергия, усл. ед.: 1 — <10, 2 — 10—100, 3 — >100.

Рудное месторождение в целом приурочено к протяженной зоне дробления субмеридионального простирания, секущей вмещающие породы. В ее пределах геологопоисковыми работами выявлено 5 рудных зон. Они локализуются на контактах сиенито-диоритовых интрузий с вмещающими их метаморфическими сланцами и частично в пределах самих интрузивных тел. Зоны вытянуты в субмеридиональном направлении и круто падают на запад. Они имеют значительные размеры по протяженности и мощности. Наиболее обогащенные участки рудных зон представлены брекчированными, сильно окварцованными и лимонитизированными вмещающими породами, сцементированными сульфидами. По минералогическому составу сульфиды представлены пиритом, арсенопиритом, галенитом, халькопиритом, сфаленитом. Рудные зоны перекрыты довольно мощными глинами неогена.

Изучение распределения содержаний рудообразующих элементов во вмещающих породах позволило установить, что оруденение обычно сопровождается ореолами первичного рассеяния серебра, висмута, свинца, цинка, меди, молибдена, мышьяка, сурьмы и других представителей сульфидного оруденения. В корях выветривания и в перекрывающих рудные зоны и тела рыхлых отложениях фиксируются солевые ореолы вторичного рассеяния тех же элементов, но с иными содержаниями и их соотношениями.

Площадь одного из рудных участков месторождения детально геохимически изучена по коренным породам с использованием проб, взятых из поверхностных и подземных выработок, скважин и т. п. Анализ проводился по всем рудообразующим элементам сульфидного ряда. Окончательные результаты представлены в показателях суммарной энергии рудообразования. Из рис. 22 следует, что на этом участке выявляются две геохимические аномалии субмеридионального простирания. Восточная аномалия интенсивностью 300—900 усл. ед. суммарной энергии рудообразования довольно быстро затухает в южном направлении. Западная аномалия с интенсивностью по отдельным пробам из выработок 3000—4000 усл. ед. энергии протягивается через весь планшет. Последующими буровыми работами высокая рудная перспективность этой аномалии подтверждена открытиями в ее зоне коренного оруденения.

### **§ 13. РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУД СЛОЖНОГО СОСТАВА И КОМПЛЕКСНЫХ ОРЕОЛОВ**

Расчеты энергии рудообразования по предложенным формулам (27) и (28) крайне просты. Исходными данными при расчетах являются содержания всех проанализированных элементов в пробе и их кларковые содержания в гранитоидах. Содержания элементов в пробе могут быть получены по данным любого вида анализа. Концентрации в гранитоидах рассчитываются как местные региональные кларки или как кларки для земной коры [16].

Произведения  $K_i \ln K_i$  рассчитываются по таблицам натуральных логарифмов или по специально построенной номограмме (см. рис. 6). На номограмме по оси абсцисс отложены кларки концентраций элементов, т. е. отношения содержания их в пробе к местному или земному кларку в гранитоидах, по оси ординат — произведения кларков концентрации на натуральный логарифм этой величины, т. е. энергия. Вычисляется концентрация каждого элемента  $K$  и затем по этому значению определяется по номограмме энергия рудообразования (отложенная на оси ординат). Например, содержание олова в пробе составляет 0,01% при земном кларке для гранитоидов 0,0003%, concentra-



ция его в пробе составит 33, чему соответствует  $K \ln K = 112$  усл. ед. Дальнейший расчет предусматривает суммирование энергии рудообразования по всем элементам в пробе. Если содержание элемента в пробе меньше его кларкового содержания в гранитоиде, то рассчитывается его деконцентрация — «вынос». В этом случае концентрация вычисляется как отношение кларкового содержания к содержанию в пробе.

«Энергия привноса» и «выноса» иногда используется самостоятельно, поэтому отдельно суммируется энергия по элементам, присутствующим в пробе в вышекларковых концентрациях, и по элементам, содержания которых в пробе нижекларковое. Для получения суммарной энергии рудообразования «энергия привноса» и «выноса» складываются. В результате для каждой точки опробования получаются три числа, характеризующие энергетически как процесс рудообразования в целом, так и отдельно происходящее при этом перераспределение элементов.

Нужно иметь в виду, что применяемая формула предусматривает учет всех химических элементов в каждой пробе. Однако, как показывает опыт работ, изменения концентраций подавляющего большинства элементов, в первую очередь основных породообразующих, незначительны и несоизмеримы с изменениями концентрации рудных элементов (элементов — геохимических индикаторов оруденения). Если содержания последних в измененных породах и в рудах меняются по отношению к содержанию их в гранитоидах в десятки, а чаще в сотни и тысячи раз, то содержания остальных элементов меняются в пределах десятые доли — единицы раз. Такими изменениями при вычислении можно пренебречь и вполне допустимо рассчитывать энергию рудообразования по основным индикаторам данного типа оруденения. Например, при изучении полиметаллических месторождений достаточно учитывать свинец, цинк, медь, висмут, мышьяк, индий, галлий, германий, кадмий; оловорудных месторождений — олово, вольфрам, висмут, мышьяк, медь, свинец, цинк, серебро, индий, сурьму; для месторождений золота — золото, серебро, теллур, селен, свинец, цинк, медь.

Использование энергии рудообразования позволяет заменить многочисленные геохимические материалы документами, построенными в едином показателе. Разнообразие геохимических данных часто является основной трудностью при интерпретации. Каждая проба при этих работах анализируется на широкий круг элементов. По линиям опробования или плоскостям геологических разрезов строятся многочисленные графики, обычно несущие разную информацию. Результаты по ним оцениваются лишь качественно. Именно поэтому для облегчения интерпретации и сокращения объема работ по обработке геохимических данных в разное время и разными исследователями предлагались многие приемы представления единообразной геохи-

мической информации. Простое суммирование концентраций содержаний элементов в пробе исключалось, так как в этом случае элементы, содержащиеся в большом количестве, подавляли остальные компоненты, хотя обычно именно последние и являлись определяющими в рудном процессе. Вполне естественным был переход от содержаний элементов к их концентрациям, т. е. к отношениям содержаний к местному фону или мировому кларку.

Такой формальный прием оказался достаточно удобным и простым и до настоящего времени находит широкое применение при геохимических работах. В частности, суммирование концентраций элементов рекомендует С. В. Григорян в качестве специального геохимического показателя, характеризующего аддитивный ореол. Однако этот прием имеет и ряд недостатков. Во-первых, простое суммирование не описывает геохимический процесс. С точки зрения рудообразования необходимость такой операции трудно обосновать. Никакого физического смысла этот прием не несет. Во-вторых, суммирование не только не облегчает работу с малоконтрастными ореолами, но из-за несовпадения повышенных концентраций разных элементов затрудняет возможность их выделения. Поэтому в качестве единого геохимического показателя (выделяемого формально) предложили произведение концентраций всех проанализированных элементов или какой-либо их части (мультипликативные ореолы, ореолы над- и подрудных элементов).

Этими приемами при интерпретации геохимических аномалий можно пользоваться. Однако, как и суммирование концентраций, перемножение их теоретически не обосновано и можно рекомендовать только как формальный прием. Тем же недостатком обладают и другие геохимические коэффициенты, например парные отношения содержаний элементов, отношение произведений определенных групп элементов, отношение произведений разных степеней содержаний и т. д. Хотя с применением электронно-вычислительной техники появляется возможность выбора наиболее практически удобных коэффициентов, неудовлетворенность, вызванная необоснованностью их физической природы, остается прежней.

В этом смысле предпочтительнее использовать энергию рудообразования как единый геохимический коэффициент, который несет в себе еще и смысловую физико-химическую нагрузку, позволяющую делать приближенные заключения о рудном процессе.

Прикладное значение использования энергии рудообразования как единого геохимического показателя можно проиллюстрировать многими примерами. Одним из примеров ее использования для поисков рудных зон под наносами является профиль картировочных скважин и горных выработок на одном из золоторудных месторождений. Как видно из рис. 23, в строении

участка принимают участие метаморфические сланцы протерозойского возраста, прорванные интрузивом диоритов. В контакте их прослеживается протяженная зона дробления субмеридионального простирания, к которой приурочены рудные тела месторождения. Для поисков рудных тел и зон в скважинах и горных выработках в вышеуказанном профиле, определили по пробам золото и его элементы-спутники. По комплексу элемен-

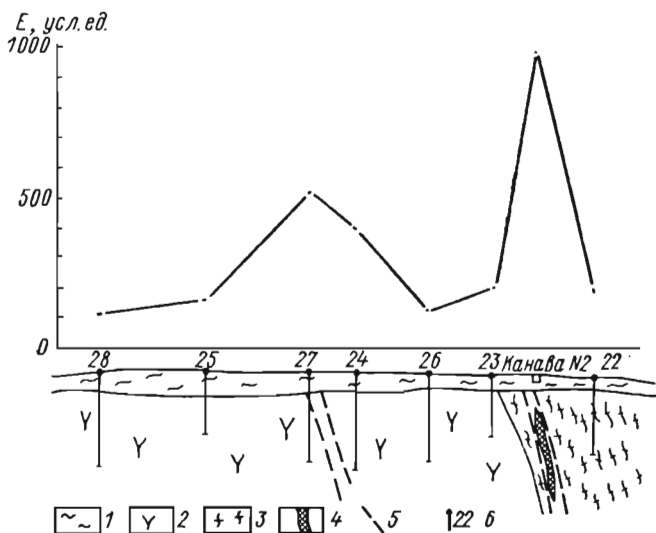


Рис. 23. График распределения суммарной энергии рудообразования на золоторудном месторождении.

1 — глины; 2 — диориты; 3 — метаморфические сланцы; 4 — рудные тела; 5 — разломы; 6 — скважины.

тов рассчитаны энергии рудообразования для каждой пробы и значение вынесено на график. Как видно из графика, распределение энергии наибольшее над канавой № 2 и достигает 990 усл. ед. Эта канава вскрывает рудную зону, т. е. над рудой отмечаются аномальные значения. Повышение энергии отмечается над скв. 24, 27. Они также вскрывают зоны дробления и минерализации.

Во втором примере рассматривается энергия рудообразования по поисковой скв. 106, заданной с целью подсечения оруденения на глубине. Поисковые работы велись на участке, в строении которого принимают участие песчано-сланцевые отложения ордовика. Эти породы сложены в складки, осложнены разрывами различных направлений, прорваны интрузиями диоритов. Оруденение локализуется, как правило, в диоритах, в узлах пересечения тектонических нарушений северо-восточного и субмеридионального направления и оперяю-

щих их трещин. В скважине в призабойной части отмечена зона рассланцевания и окварцевания. Опробование показывает, что в интервале 35—47 м повышается содержание золота и элементов-спутников (свинца, висмута, цинка, серебра и др.). Наиболее широкий ореол образует свинец, галлий и цинк. Для всего комплекса элементов рассчитана энергия рудообразования, суммарные значения которой вынесены на график. Как видно из рис. 24, по энергиям отмечаются ореолы в интервалах 20—30 и 35—47 м. Эти ореолы более контрастны, что особенно важно при невысоких содержаниях отдельных элементов в пробах или при наличии ореолов от нескольких рудных тел.

Рассмотрим применение понятия об энергии рудообразования на рудопроявлении вольфрама. В геологическом строении района рудопроявления принимают участие сланцы и песчаники позднепалеозойского возраста, прорванные крупно-реже среднезернистыми двуслюдяными гранитами, образующими массивы, от которых отходят многочисленные апофизы во вмещающие породы. В экзо- и эндоконтактах массива и его апофиз отмечаются рудопроявления рудно-кварцевого типа. Рассматриваемое нами рудопроявление вольфрамита расположено в пределах апофизы гранитов и представлено жилами субмеридионального простирания локализующимися в тектонической зоне. Падение жил близко к вертикальному. Длина отдельных жил 50—90 м, средняя мощность 0,4—0,6 м. На глубину они прослеживаются на десятки метров.

Одна из жил (рис. 25) представлена кварцем и имеет мощность около 0,5 м и протяженность по простиранию 90 м. Она вертикально залегает в среднезернистых двуслюдяных гранитах. Кроме кварца в жиле в незначительном количестве присутствуют турмалин, флюорит, вольфрамит, пирит, арсенопирит. Вдоль зальбандов жилы наблюдается слабая грейзенизация. К востоку от жилы в гранитах обнаружены два пегматитовых тела длиной несколько десятков метров максимальной мощностью 7—10 м. Периферическая часть пегматитов сложена письменным гранитом, затем следует зона блокового пегматита и кварцевое ядро, в котором присутствует небольшое количество берилла и турмалина.

Геохимические пробы отбирались из коренных пород по профилю, проходящему вкрест простирания кварц-вольфрамитовой жилы и пегматитов. Анализ проб проводился методами просыпки и высокочувствительного спектрального анализа. По результатам анализов в жиле и вблизи нее установлены повышенные содержания бора, индия, мышьяка, свинца, висмута, серебра, вольфрама и меди. Повышения содержаний часто очень незначительны и для некоторых элементов связаны не только с жилой, но и с рассеянной минерализацией в гранитах (мышьяк, серебро, висмут). Говорить о наличии и размерах первичного ореола в этом случае сложно. Скорее можно отметить лишь не-

значительное локальное увеличение содержаний указанных элементов непосредственно в жиле. В отдельных пробах за пределами жилы отмечаются повышенные содержания многих элементов.

В пегматитах установлены только повышенные содержания цинка, вольфрама и висмута, а иногда и бора. Говорить о геохимической индикации пегматитов по данным распределения отдельных элементов вообще невозможно. Чтобы получить более четкую картину, были рассчитаны энергии рудообразования (табл. 34). По энергии рудообразования в жиле и вблизи

Расчет энергии рудообразования

Номер проб	Мышьяк			Олово			Германий		
	$K$	$\ln K$	$K \ln K$	$K$	$\ln K$	$K \ln K$	$K$	$\ln K$	$K \ln K$
77	100	4,6	460	10	2,3	23	1	0	0
83	50	3,9	195	2,7	1,0	2,7	2	0,7	1,4
84	33	3,5	115,5	3	1,1	3,3	2	0,7	1,4
85	1	0	0	1	0	0	2	0,7	1,4
86	33	3,5	115,5	1,7	0,5	0,9	1	0	0
87	1,5	0,4	0,6	1	0	0	1	0	0
88	1	0	0	1,7	0,5	0,9	1	0	0
89	3,3	1,2	3,9	1,7	0,5	0,9	2	0,7	1,4
90	1,6	0,5	0,8	1	0	0	2	0,7	1,4
91	1	0	0	1,5	0,4	0,6	4	1,4	5,6
92	1	0	0	1	0	0	2	0,7	1,4
93	1,5	0,4	0,6	1	0	0	1	0	0
94	3,3	1,2	3,9	1	0	0	1	0	0
95	1,5	0,4	0,6	10	2,3	23	2	0,7	1,4
96	2,3	0,8	1,8	1	0	0	2	0,7	1,4
97	1,5	0,4	0,6	15	0,4	0,6	2	0,7	1,4
98	1	0	0	3	1,1	1,3	1	0	0

нее постоянно фиксируется очень четкий ореол (сотни условных единиц) при устойчиво ровном фоне меньше 10 усл. ед. Ширина ореола — несколько десятков метров, т. е. значительно больше, чем собственная мощность жилы. Оба пегматитовых тела также выделяются четкими аномалиями энергии рудообразования со значениями более 100 усл. ед.

В следующем примере рассматривается полиметаллическое месторождение. В геологическом строении его участвуют триасовые известняки, брекчии, песчаники, алевролиты и кремнистые сланцы, которые перекрываются туфами кварцевых порфиров. Интрузивные породы представлены дайками, небольшими штокообразными телами андезитов, тяготеющих к трещинам субширотного направления, дайками диоритовых и диабазовых пор-

фиритов, приуроченных к нарушениям субмеридионального и северо-западного направления.

Оруденение приурочено к протяженной тектонической зоне, которая фиксируется с поверхности вышеуказанными дайками диоритовых и диабазовых порфиритов.

В пределах тектонической структуры наблюдается равномерная вкрапленность пирита. Рудные тела жиллообразной формы имеют протяженность первые десятки метров. В большинстве случаев они залегают на контакте даек диоритовых и диабазовых порфиритов с вмещающими туфами кварцевых порфиритов.

Таблица 34

для рудопроявления вольфрама

Свинец			Висмут			Цинк			Серебро		
К	ln K	K ln K	К	ln K	K ln K	К	ln K	K ln K	К	ln K	K ln K
3,3	1,2	3,9	100	4,6	460	1	0	0	40	3,7	148
1	0	0	5	1,6	8	2	0,7	1,4	2	0,7	1,4
1	0	0	10	2,3	23	2	0,7	1,4	1	0	0
1	0	0	10	2,3	23	2	0,7	1,4	1	0	0
3	1,1	3,3	1,7	0,5	0,9	2	0,7	1,4	1	0	0
5	1,6	8,0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
3	1,1	3,3	3,3	1,2	3,9	1	0	0	1	0	0
1	0	0	1,7	0,5	0,9	2	0,7	1,4	2	0,7	1,4
1	0	0	3,3	1,2	3,9	2	0,7	1,4	1	0	0
3	1,1	3,3	1,7	0,5	0,9	1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	0	0	3	1,1	3,3	1	0	0
1	0	0	1,5	0,4	0,6	3	1,1	3,3	1	0	0
1	0	0	1,5	0,4	0,6	2	0,7	1,4	1	0	0
30	3,4	102	5	1,6	8	1	0	0	1	0	0
6	1,8	10,8	1	0	0	2	0,7	1,4	1	0	0
5	1,6	8	3,3	3,5	15,5	2	0,7	1,4	1	0	0
2	0,7	1,4	3,3	1,2	3,9	1	0	0	2	0,7	1,4

Сплошные сульфидные руды окаймляются вкрапленностью тех же сульфидов в туфах. Главные рудные минералы — сфалерит, галенит, халькопирит, второстепенные — арсенопирит, пирротин, пирит. Геохимически опробован керн разведочных скважин. На рис. 26 приведены результаты анализа руды по скв. 1, 3. Непосредственно в рудном теле отмечаются самые высокие содержания свинца, цинка, меди, мышьяка, олова, марганца. Отдельные повышенные содержания этих элементов обнаруживаются в виде незакономерных всплесков содержаний по всей скважине. Говорить о характере первичных ореолов по виду графиков сложно. Можно предположить, что непрерывный первичный ореол отсутствует или существует инфильтрационный ореол, значение которого для определения размеров рудных тел труд-

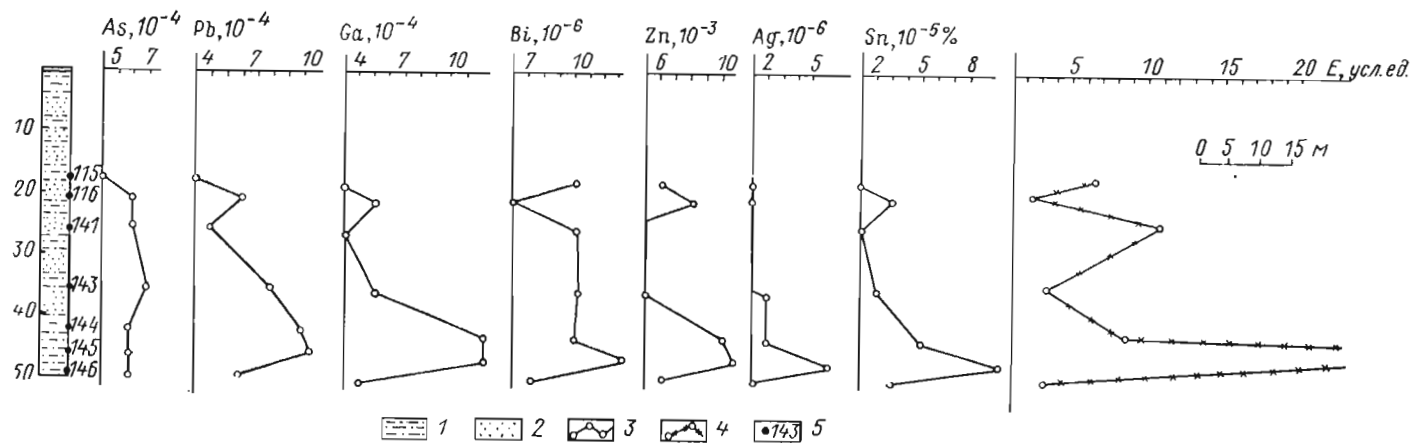


Рис. 24. График распределения содержаний элементов и суммарной энергии рудообразования в скважине на золоторудном участке.

1 — алевролиты; 2 — песчаники; графики распределения: 3 — содержаний элементов; 4 — суммарной энергии рудообразования; 5 — точки взятия проб и их номер.

но определить. В то же время необъяснимы и не ясны перспективы участков с повышенными содержаниями цинка, мышьяка и олова в верхней части скв. 3.

По энергии рудообразования можно сделать более определенные выводы. Во-первых, только непосредственно рудные тела характеризуются значениями энергии до 300 усл. ед. Никаких других сходных с ними участков, как это можно было выделить по распределению отдельных элементов, в изученных скважинах нет. Во-вторых, вблизи рудных тел по обеим скважинам устанавливаются участки (20—30 м) повышенных значений энергии рудообразования (около 50—100, редко выше 100 усл. ед.). Видимо, они характеризуют первичный ореол вскрытых рудных тел. Это подчеркивает поисковое значение первичных ореолов, выделить которые по распределению отдельных элементов, как указывалось выше, было трудно.

Таким образом, оба рассмотренных примера показывают, что даже в относительно простых по составу обособленных рудных телах распределение энергии рудообразования позволяет получать не только те же результаты, что и по распределению отдельных элементов, но и более контрастно и уверенно определять первичные ореолы. Еще более отчетливо эти преимущества изучения распределения энергии рудообразования проявляются при мало контрастных и сложных по составу первичных ореолах.

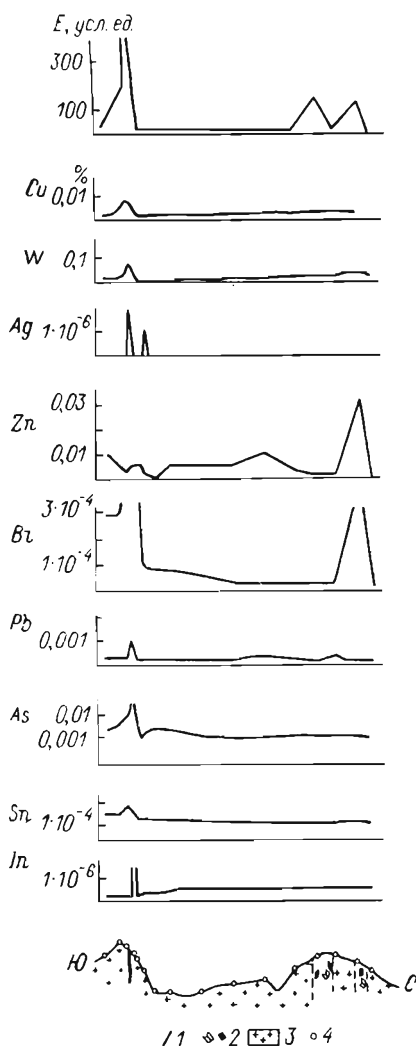


Рис. 25. Распределение содержаний элементов и энергии рудообразования на вольфрамовом месторождении.

1 — кварцево-вольфрамитовая жила; 2 — пегматиты; 3 — граниты; 4 — точки отбора проб.



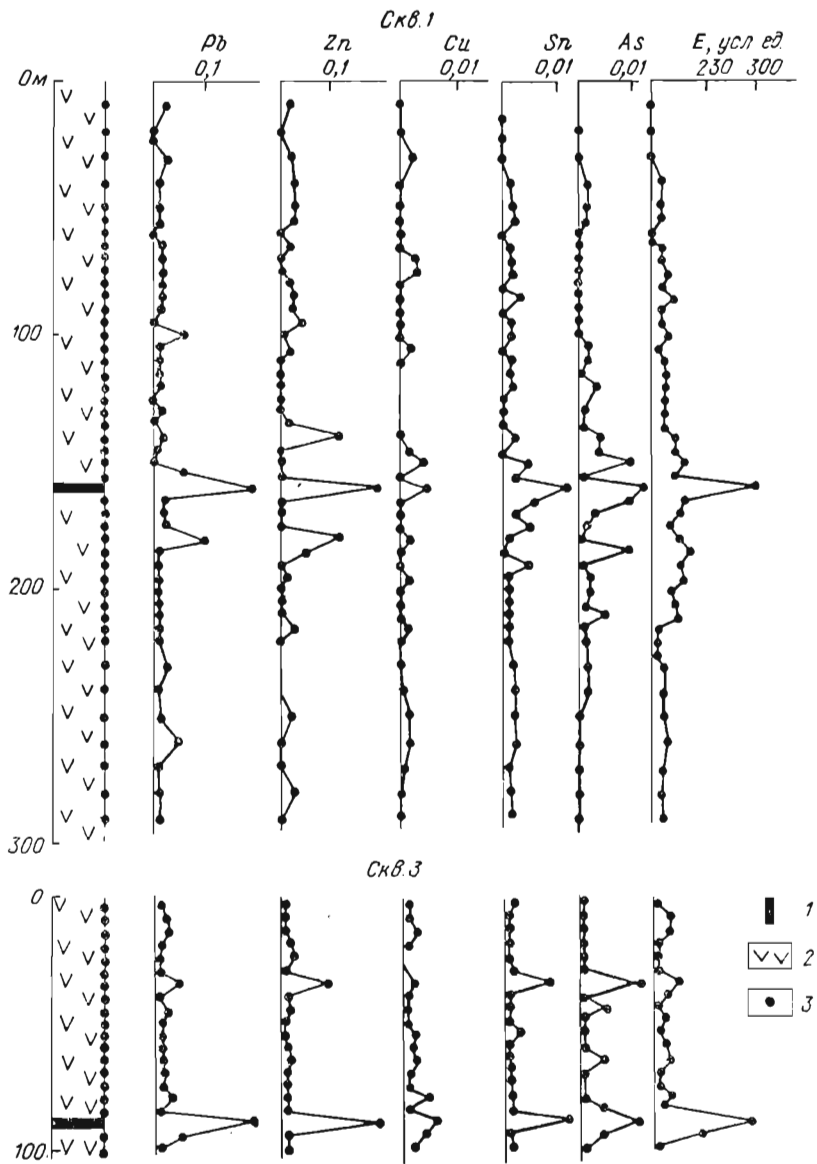


Рис. 26. Распределение содержаний элементов и энергии рудообразования по скважинам полиметаллического месторождения.

1 — полиметаллическое рудное тело; 2 — вмещающие эффузивные породы; 3 — точки отбора проб.

В качестве примера рассмотрим результаты геохимических работ на оловорудном месторождении. Район месторождений сложен глинистыми и кремнистыми сланцами, алевролитами и спилитами верхней перми, несогласно перекрытыми терригенными отложениями триаса, юры и мела и эффузивными породами палеогенового возраста.

Интрузивные породы представлены дайками среднего и малого размера — диорит-порфиритов, кварцевых порфиритов, андезитов, дацитов, гранодиоритов, внедрившихся от верхнего мела до миоцена. Тектонические структуры представлены складками северо-восточного и субмеридионального простирания и разломами позднемелового возраста того же направления и более молодыми — северо-западного и широтного. Разломы меридионального и северо-восточного направления, как правило, контролируют орудование.

На месторождении развиты серии жил и минерализованных зон дробления. Рудные тела обычно имеют небольшую мощность (до 1 м) и прослеживаются по простиранию и падению на сотни метров. По составу они относятся к хлорито-сульфидному, реже турмалино-сульфидному типу оловорудных месторождений. Количество сульфидов в этом типе обычно невелико.

Состав рудных тел сложен. Рудные минералы представлены касситеритом, пирротинном, пиритом, арсенопиритом, халькопиритом, сфалеритом, в небольших количествах встречаются галенит, блеклые руды, висмутин, станнин, марказит, киноварь, золото и серебро. Из нерудных минералов преобладает кварц, постоянно присутствует турмалин или хлорит. Изменения вмещающих пород прослеживаются от рудных жил до 3—10 м. Гидротермальные процессы выражаются в появлении кварцево-турмалиновых метасоматитов (обычно у кварцево-касситеритово-турмалиновых жил), кварцево-серицитовых и кварцево-серицитово-хлоритовых пород.

Месторождение по строению рудных тел несколько отлично от остальных месторождений района. Морфология тел этого месторождения сложна, границы устанавливаются только по данным опробования. В песчаниках и сланцах позднемелового возраста в полосе шириной более 300 м постоянно отмечаются тонкие прожилки (мощностью от нескольких миллиметров до 1—2 см), сложенные кварцем, турмалином, флюоритом, серицитом, карбонатом, касситеритом, пиритом, сфалеритом, пирротинном, арсенопиритом. Эти же минералы образуют мелкую вкрапленность и рассеянные гнезда по всему рудному полю. Предполагается, что рудными телами являются минерализованные зоны дробления, прослеживающиеся на сотни метров по простиранию.

В пределах этих зон подразумевается сгущение прожилков и гнезд. Макроскопически эти зоны не выделяются и все рудное поле представляется широкой полосой рассеянной минера-

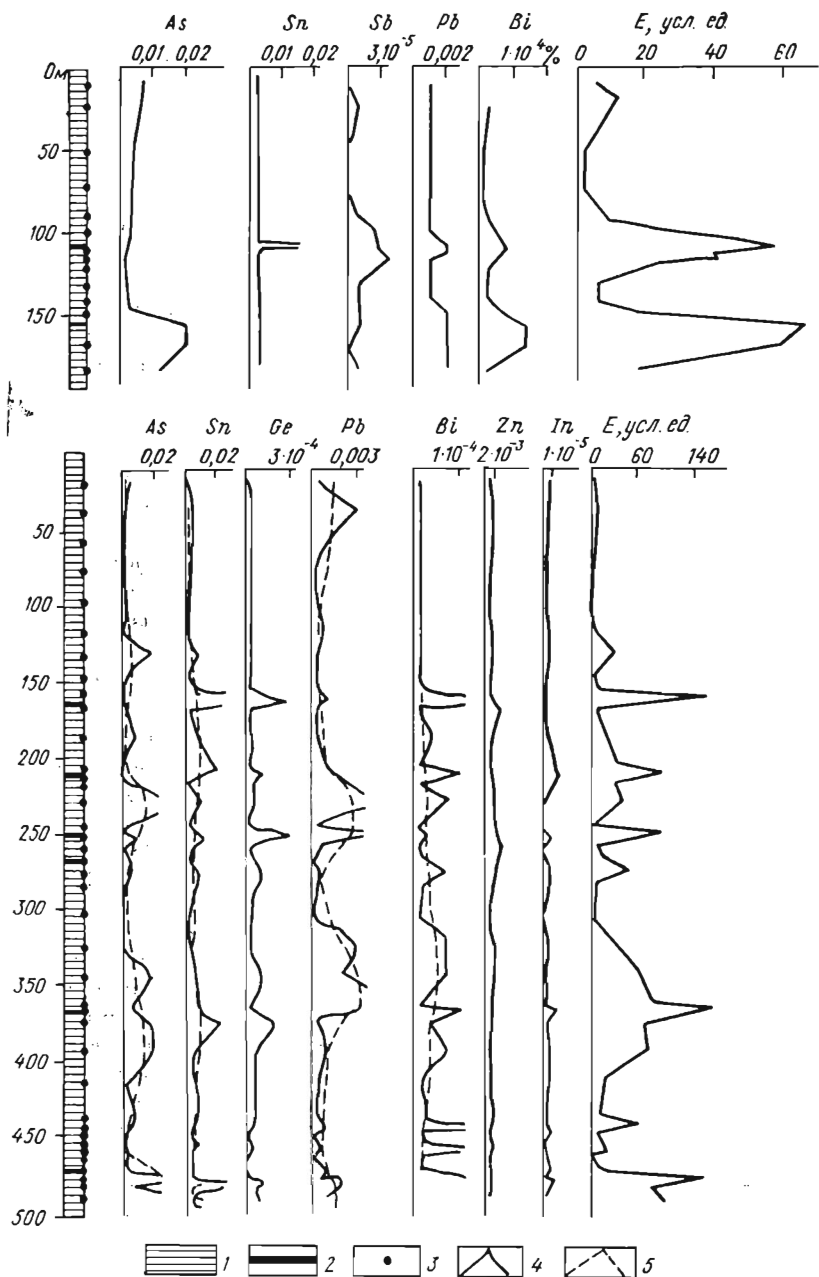


Рис. 27. Распределение содержаний элементов и энергии рудообразования на оловорудном месторождении.

1 — вмещающие осадочные породы; 2 — зоны оловорудной минерализации; 3 — точки отбора проб; графики: 4 — фактические; 5 — сглаженные.

лизации. Задачей геохимических работ являлось выделение минерализованных зон и рудных тел по первичным ореолам олова и его элементов-спутников. Задача решалась путем геохимического опробования керна скважин в центральной части рудного поля. Отобранные пробы подвергались высокочувствительному спектральному анализу. На рис. 27 выделяются по геологическим данным рудные тела. Повышенными содержаниями олова характеризуются в первой скважине 2, во второй 6 тел. Остальные рудные тела при опробовании на олово только этих (без учета соседних) выработок были бы пропущены. Это в свою очередь могло привести к ошибочной оценке перспектив всего участка при изучении его редкими поисковыми выработками. С учетом элементов-спутников также нельзя было прийти к однозначным выводам.

По данным опробования первой скважины одна из зон, являющаяся повышенными содержаниями олова, отмечалась очень незначительными повышениями концентраций (в 2—3 раза выше фоновых) сурьмы, свинца и висмута и вовсе не отмечалась по концентрации мышьяка. Другая зона, не содержащая повышенных концентраций олова, выделялась слабыми аномалиями мышьяка, свинца и висмута. Говорить о выделении рудных зон на основании геохимических данных было сложно. Небольшие, не совпадающие между собой повышения содержаний отдельных элементов, можно было рассматривать как случайные флуктуации при общей зараженности рудного поля и неравномерном распределении элементов.

Распределение суммарной энергии рудообразования, нанесенной на график согласно данным табл. 35, не вызывает никаких сомнений в правомочности выделений обеих зон как объектов дальнейшего исследования. На фоне низких значений (меньше 5—10 усл. ед.) суммарной энергии рудообразования они вы-

Таблица 35

**Суммарная энергия рудообразования по разрезу вкrest простираания**

Номер пробы	Сумма энергии, усл. ед.		Номер пробы	Сумма энергии, усл. ед.	
	по всем элементам	по мышьяку и олову		по всем элементам	по мышьяку и олову
1200	269,1	8,9	1185	2299,8	1175,0
1198	137,0	4,6	1202	161,8	37,0
1193	221,0	30,6	1201	245,1	162,0
1194	221,0	30,6	1182	187,1	39,7
1187	274,8	135,0	1195	115,5	42,8
1203	231,2	171,4	1194	205,1	125,0
1199	919,4	733,0	1181	105,9	24,1
1186	2002,4	1275,0	1196	88,3	6,6
1205	529,2	308,6	1180	176,5	11,2

деляются резкими повышениями (по 40—60 усл. ед.). При этом ширина аномалий не меньше 30—50 м, т. е. даже при достаточно большом интервале опробования они не могут быть пропущены. По данным второй скважины распределение отдельных элементов еще более сложное и еще труднее интерпретируется. Как указывалось выше, только самая верхняя и самая нижняя из зон отмечаются повышенными содержаниями олова. Вторая и третья зоны сверху характеризуются очень слабыми увеличениями содержания олова, остальные зоны или интервалы по скважинам содержат олово в фоновых концентрациях. В то же время по скважине отмечаются еще 5 участков с повышенными концентрациями олова, по интенсивности не меньше, чем во втором и третьем рудных зонах, но не связанные с рудными телами.

Распределения других элементов-индикаторов оруденения также идентичны. Повышенными содержаниями мышьяка отмечается только нижнее рудное тело, и в то же время относительно высокие его содержания отмечаются на 4 участках вне зон. В 3 рудных телах фиксируются повышенные содержания германия и в одном случае те же содержания этого элемента отмечаются на безрудном участке. По содержанию свинца отчетливо выделяются 2 рудных тела (3-е и 5-е) и один безрудный участок. Аномалии, связанные с 1-м и 6-м рудными телами, мало контрастны. Подобных и несколько более интенсивных аномалий свинца вне рудных тел выделяется еще 5. Повышенными концентрациями висмута характеризуются 1, 2, 5 и 6-е рудные тела и 6 безрудных участков.

В целом, рассматривая распределение рудных элементов по скважине, можно отметить лишь общую неравномерную минерализацию пород, трудно говорить о выделении рудных тел на основе этих данных. По распределению же суммарной энергии рудообразования все 6 рудных зон выделяются аномалиями с максимальными значениями 80—160 усл. ед. при фоновых значениях меньше 10 усл. ед. Ширина аномалий 20—50 м. Более слабой аномалией выделяется зона дробления между 5-м и 6-м рудными телами; по геологическим соображениям эта зона безрудна. Других ложных аномалий по распределению энергии рудообразования не выделено. Пример свидетельствует, что расчет суммарной энергии рудообразования (при сложных и мало контрастных первичных ореолах) позволяет достаточно надежно выделять перспективные рудные тела даже в том случае, когда по главному полезному компоненту из-за неравномерности его распределения они не обнаруживаются. Этот простой и эффективный вид обработки геохимических данных может явиться полезным дополнением в комплексе поисковых методов.

Свойство энергии рудообразования более контрастно позволяет использовать весьма эффективно этот показатель при разбраковке геофизических аномалий. В качестве примера рас-

смотрим ртутное месторождение, где рудная минерализация помимо киновари представлена пиритом, арсенопиритом и другими сульфидами. Наличие последних позволило рекомендовать в качестве одного из главных геофизических методов — метод вызванной поляризации. Его можно применять как при поисках рудных тел, так и при разведке для корреляции, оценки межскважинного пространства и т. д. Однако в ряде случаев пространственная разобщенность оловянной и иной сульфидной

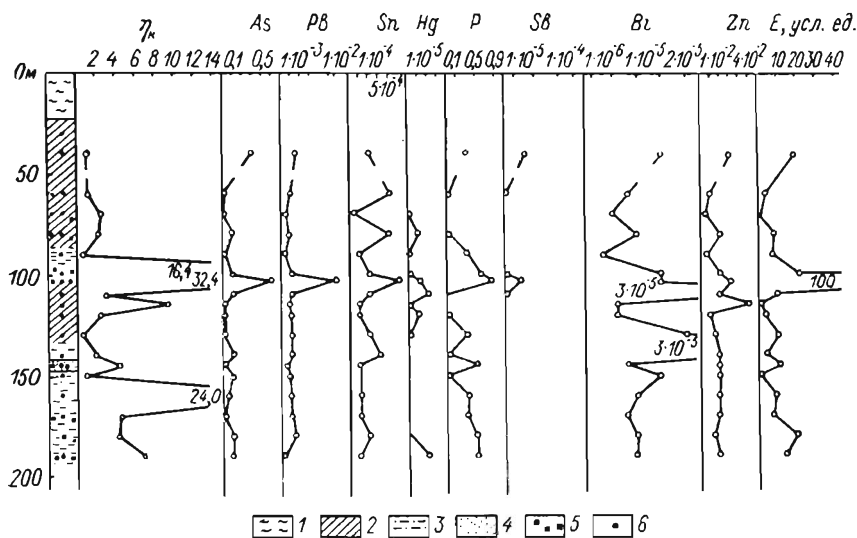


Рис. 28. Графики распределения поляризуемости, содержаний элементов и энергии рудообразования в породах на ртутном месторождении.

1 — покровные суглинки; 2 — глинистые сланцы; 3 — алевролиты; 4 — песчаники; 5 — пирит; 6 — точки отбора проб.

минерализации приводит к неоднозначности результатов работ этим методом.

В рассматриваемом примере, приведенном по данным Г. А. Виллера (рис. 28), по скважине выделяется 2 четкие аномалии кажущейся поляризуемости в районе глубин 100 и 160 м. По отдельным элементам кривой устанавливаются малоcontrastные аномалии, фиксирующиеся, как правило, по одной точке и не совпадающие друг с другом. Из-за неравномерного распределения олова также трудно говорить о перспективности какой-либо части скважины или одной из аномалий кажущейся поляризуемости. Распределение суммарной энергии рудообразования позволяет отчетливо определить «перспективную» верхнюю аномалию кажущейся поляризуемости. Преимущество использования расчетов энергии рудообразования перед изуче-

нием распределения отдельных элементов отчетливо видно на рис. 28.

Весьма удобно использовать рассматриваемый показатель при объемной характеристике рудного поля в целом или отдельных крупных его частей. При этом энергия рудообразования позволяет характеризовать рудное поле как единый объект по минимально аномальным значениям этого показателя и выделять в пределах его отдельные ветви и рудные тела по максимальным его значениям. Сходные представления можно получить, рассматривая по отдельности распределения элементов-индикаторов оруденения, физических параметров минерализованных пород и т. д. Но каждое такое отдельно взятое распределение будет описывать рудное поле как единый объект менее обобщенно. Например, распределение элементов средней части единого ряда зональности будет характеризовать лишь центральные части рудных тел. Распределения таких параметров, как проводимость или поляризуемость, очень часто характеризуют окаймление рудных тел на месторождениях редких и благородных металлов.

Таким образом, распределения отдельных элементов и физических параметров дают полезные сведения о деталях строения рудного поля, но хуже описывают его в целом. Распределение энергии рудообразования учитывает одновременно особенности распределения элементов отдельных частей ряда зональности, т. е. элементов, определяющих неодинаковые состав и физические свойства в различных частях рудного поля. В то же время в центральных частях рудных тел и по путям следования рудоносных растворов часто наблюдаются повышенные содержания главного полезного компонента и близких ему в ряду зональности элементов. Это повышение содержания не всегда может быть достаточно контрастным и легко определимым при рассмотрении отдельных элементов или физических свойств руд и вмещающих пород. Энергия рудообразования позволяет выделять основные рудоконтролирующие структуры в пределах рудного поля.

Таким образом, основные преимущества энергии рудообразования: обобщенность результатов и увеличение контрастности при обработке геохимических материалов позволяют эффективно использовать этот показатель при описании рудных полей. В качестве примера рассмотрим оловорудное месторождение Дальнего Востока (пример приведен по материалам Н. П. Емельянова и И. В. Касьяновой).

Район месторождения сложен геологическими образованиями мелового, неогенового и четвертичного возраста. Среди меловых отложений выделяются четыре свиты — средних и основных эффузивов и их туфов, липаритов и их туфов, ксенотуфов с маломощными покровами и потоками липаритов и липаритов-игнимбритов. Эти толщи прорваны интрузивными образова-

ниями, представленные гранитами, гранодиорит-порфирами и дайками кислого и среднего состава.

На вулканогенных породах мелового возраста залегают базальты плиоцена, выше которых лежат повсеместно развитые делювиальные и аллювиальные отложения.

В тектоническом строении район представляет собой прогиб с широко развитыми в нем вулкано-тектоническими структурами. Одни из них, линейно-вытянутые в северо-восточном и субширотном направлениях, оперяют расколы древнего фундамента; вторые представляют собой зону повышенной трещиноватости широтного простираения с широко развитыми дайками и оловянным оруденением. Месторождение относится к хлорит-касситеритовому типу силикатно-касситеритовой формации. Оно приурочено к локальной тектонической зоне трубообразной формы и представляет собой уплощенный штокверк, размером 200×400 м. Вмещают оруденение липариты-игнимбриты мелового возраста и прорывающие их интрузивные гранит-порфиры. Последние образуют пластообразное тело мощностью 200—250 м. Вмещающие породы в пределах месторождения интенсивно гидротермально изменены и превращены в серицит-хлорит-кварцевую породу.

На месторождении широко распространены взрывные брекчии, к которым часто приурочены оловорудные тела. В целом минерализованная зона месторождения характеризуется изометрической формой, со столбообразными обособленными друг от друга участками интенсивного брекчирования. Иногда эти участки по вертикали кулисообразно располагаются относительно друг друга.

Рудные минералы располагаются в виде многочисленных тонких прожилков, небольших гнезд, а также рассеянной вкрапленности во вмещающих породах. Густота сети прожилков различна в пределах штокверка. Кроме штокверков здесь широко развиты жилки и брекчии, сцементированные рудным веществом. Брекчиевая текстура характерна для центральных частей рудных тел, прожилковая — для периферических. По вещественному составу рудные тела различаются главным образом по количественным соотношениям минералов. Выделяются касситерит-хлоритовые, с небольшим количеством сульфидов, и касситерит-сульфидно-хлоритово-флюоритовые тела. В целом для месторождения главными минералами рудных тел являются кварц, хлорит, флюорит, касситерит, адуляр, второстепенными — сидерофилит, арсенопирит, сфалерит, халькопирит, галенит, пирит, вольфрамит.

Основными изменениями вмещающих пород являются хлоритизация, серицитизация, адуляризация, сидерофиллитизация. Границы рудных тел определяются по данным опробования. В строении рудных тел наблюдается зональность, заключающаяся в постепенной смене кварцево-касситеритовой и кассите-



ритово-флюоритово-кварцевой минерализации в центре, касситеритово-сульфидной и сульфидной на периферии. Рудные минералы не образуют сплошного чехла вокруг них, а развиты на отдельных участках и вовсе не обязательно только в верхних частях.

Геохимическими исследованиями установлено, что постоянными спутниками олова являются свинец, медь, мышьяк, серебро и цинк. Присутствуют также вольфрам, висмут, молибден и индий. Наиболее детально изучены 4 основных рудных тела. Каждое из них сопровождается обычно обособленными друг от друга первичными ореолами олова и его элементов-спутников. Ореолы, как и рудные тела, имеют трубообразную форму с изометрическими сечениями в горизонтальных плоскостях. Размеры ореолов олова и свинца превышают размеры рудных тел в 2—3 раза, но они смещены относительно друг друга. Ореолы меди и мышьяка в 1,5—2 раза меньше и тоже в общем тяготеют к рудным телам, но по границам не совпадают с ними и друг с другом. В распределении элементов-спутников олова достаточно четко проявляется вертикальная зональность, проявляющаяся в том, что от горизонта к горизонту олово сменяется вначале повышенными содержаниями меди и свинца, а затем мышьяка (табл. 36).

Таблица 36

Средние арифметические значения содержания элементов в первичных ореолах, %

Горизонты, м	Олово	Медь	Свинец	Мышьяк
340	0,004	0,003	0,01	0,03
290	0,01	0,005	0,01	0,03
230	0,02	0,006	0,03	0,02
170	0,02	0,005	0,02	0,02
110	0,01	0,005	0,01	0,008

Таким образом, по распределению отдельных элементов в пределах месторождения можно говорить о выделении локальных трубообразных участков разобщенных между собой и не совпадающих пространственно по отдельным элементам, т. е. можно предположить сложное строение рудного поля с отдельными благоприятными для отложения определенных минералов участками. Говорить о связи рудных тел в пределах рудного поля и положения определяющих структур (центров минерализации) по таким разноречивым данным трудно (рис. 29).

Суммарная энергия рудообразования рассчитывалась по всем определяемым рудным элементам для каждой пробы с использованием номограммы. Результаты расчета наносились на

схему опробования по каждому горизонту, построенную в изометрической (аффинной) проекции. На рис. 29 не показаны все поверхности, описывающие распределение суммарной энергии рудообразования в пределах рудного поля. В качестве наиболее характерных выбраны изоповерхность 100 усл. ед., как наи-

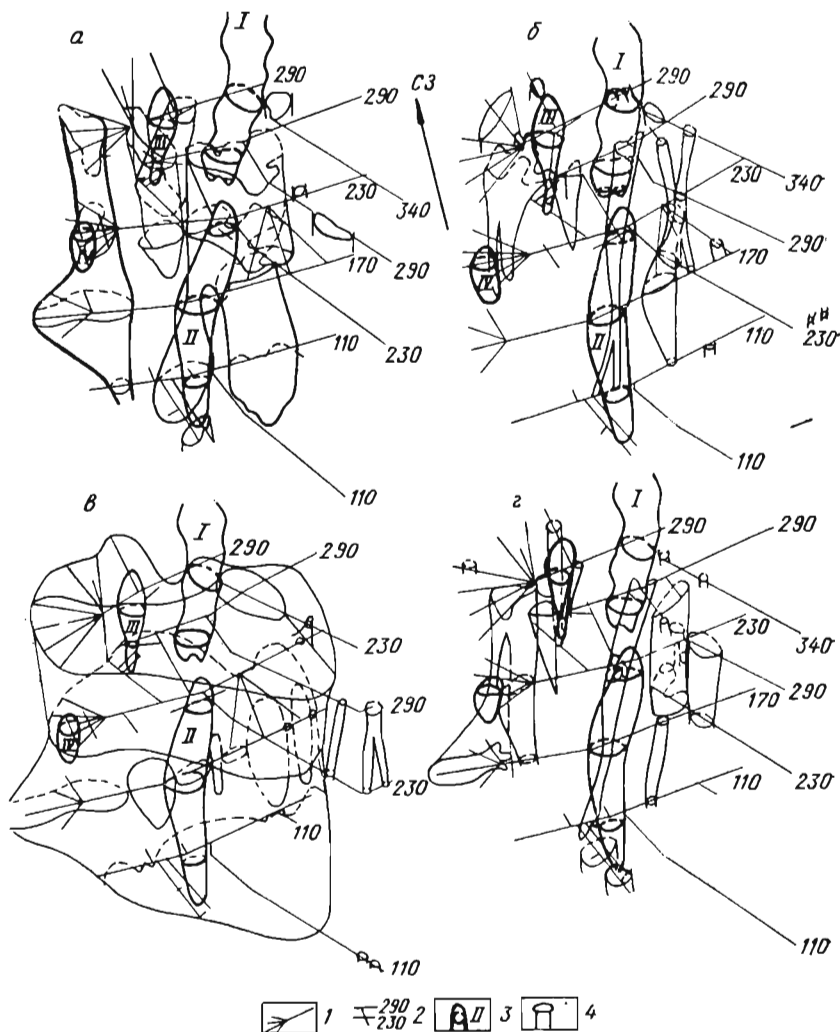


Рис. 29. Схема распределения олова (а), мышьяка (б) и энергии рудообразования (в, г) на оловорудном месторождении. Аффинная проекция. (По материалам И. И. Бока и И. В. Касьяновой).

1 — горные выработки и их направление; 2 — горизонты, по которым проводились опробования; 3 — рудные тела и их номера; 4 — изоповерхности содержания элементов и энергии рудообразования.

более наглядно характеризующая общую структуру рудного поля, и изоповерхность 1000 усл. ед., показывающая внутреннее его строение, положение отдельных его ветвей и путей движения рудоносных растворов.

В результате построений отчетливо выявилась форма рудного поля в целом. Изоповерхность 100 усл. ед. оконтуривает изометрическое в горизонтальном сечении столбообразное тело, не меняющее своего размера на всю изученную глубину. В пределах этого контура оказались все 4 известных рудных тела. При этом граница рудного поля близко подходит к рудным телам с юго-восточной стороны и значительно отступает от них в северо-западной. Характерно, что на горизонтах ниже рудного тела отмечается высокая суммарная энергия рудообразования, а площадь измененных пород с такими значениями не уменьшается.

Таким образом, в результате простой обработки геохимических данных с использованием расчетов энергии рудообразования можно сделать важные выводы о рудном поле. Во-первых, рудные тела I—IV можно рассматривать как обособленные друг от друга части единого рудного поля. Во-вторых, перспективы оруденения на глубину по характеру распределения энергии рудообразования остаются весьма благоприятными. В-третьих, по приведенным данным вскрытое на средних горизонтах рудное тело IV с большой вероятностью продолжается на глубину. В-четвертых, северо-западная часть рудного поля весьма благоприятна для обнаружения новых рудных тел, подобных уже известным.

Правильность выводов подтверждает целый ряд независимых данных. История эксплуатации месторождения свидетельствует о постоянном обнаружении новых рудных тел в пределах рудного поля. В последнее время геологи оптимистически оценивают перспективы продолжения оруденения на глубину. Наконец, работами самых последних лет, рудное тело IV прослежено на нижних горизонтах.

Внутреннее строение рудного поля наглядно иллюстрируется распределением в пространстве наиболее высокой энергии рудообразования, в частности значений, находящихся внутри изоповерхности 1000 усл. ед. В отличие от изоповерхностей, характеризующих распределение отдельных элементов, по которым выводы о положении осевых частей ветвей рудного поля оказываются достаточно разноречивыми, по энергии рудообразования отчетливо выделяются по крайней мере четыре направления. Во-первых, это очень четкое столбообразное тело, совпадающее с рудным телом IV, и резко увеличивающееся в поперечных размерах с глубиной. Во-вторых, серия уменьшающихся по размерам с глубиной тел, приуроченных к рудному телу III. В-третьих, резкое локальное повышение суммарной энергии рудообразования в районе рудных тел I, II. В-четвертых, ряд обо-

собленных, сближенных, крупных трубообразных тел в северо-восточной части рудного поля.

По расположению этих изоповерхностей можно говорить, что повышение суммарной энергии рудообразования является весьма благоприятным признаком для выявления в пределах рудного поля отдельных рудных тел. Этим признаком выделяются все известные рудные тела на месторождении. По характеру расположения изоповерхностей в пространстве, так же как и по общей конфигурации рудного поля, наиболее перспективными представляются глубокие горизонты месторождения, особенно в районе рудного тела IV и северо-восточная часть рудного поля. Если рассматривать участки повышенной суммарной энергии рудообразования как осевые части отдельных ветвей рудного поля или как пути движения рудоносных растворов, то в пределах рудного поля можно наметить целый ряд вертикальных обособленных ветвей, в пределах изученной части не проявляющих тенденции к сближению.

Таким образом, изучение строения рудного поля с использованием расчетов энергии рудообразования позволяет сделать вывод, что это единое трубообразное поле, в пределах которого выделяются отдельные ветви. Ветви на изученной части месторождения не соединяются. К этим ветвям и общему расширению контура рудного поля приурочены рудные тела.

Применение расчетов энергии рудообразования при изучении рудных полей позволяет охарактеризовать их общее и внутреннее строение и оценить относительно слабо изученные его части. Поскольку работы по изучению распределения энергии рудообразования в пределах рудного поля требуют небольших дополнительных затрат, а результаты значительно дополняют знания о месторождении, их следует рекомендовать к широкому использованию. Подобные работы следует рассматривать как важную составную часть в комплексе геологического, геохимического и геофизического изучения рудных полей с поисково-оценочными целями.

Внутреннее строение рудного тела с использованием расчетов суммарной энергии рудообразования изучается подобно тому, как это делалось при изучении рудного поля. Выявление закономерностей пространственного распределения значений энергии рудообразования позволяет более уверенно, чем на основании изучения распределения отдельных элементов или физических свойств минерализованных пород, наметить направления движения рудоносных растворов по рудовмещающей структуре и выделить наиболее перспективные с точки зрения поисков богатых руд участки в промышленном контуре и за его пределами.

В качестве примера рассмотрим оловорудное месторождение Дальнего Востока. Оруденение этого месторождения локализовано в юрских песчано-сланцевых отложениях и перекры-

вающих их верхнемеловых эффузивах среднего состава. Контролируется оруденение крупной зоной дробления субмеридионального простирания, непрерывно прослеженной в пределах месторождения более чем на 10 км. Мощность зоны дробления десятки метров. На глубину она прослеживается более чем на 300—500 м. На всем протяжении зона дробления минерализована. По представлениям ряда исследователей минерализация происходила в течение ряда последовательных стадий (от 3 до 10 и более).

По некоторым современным представлениям значительных перерывов во времени при рудообразовании не было и минерализацию можно рассматривать как одностадийную. Независимо от взглядов на генезис месторождения все исследователи отмечают неоднородность минерализации зоны дробления как по мощности, так и на глубину. Центральные части зоны дробления обычно сложены средне- и крупнозернистыми кварцево-турмалиновыми или турмалиновыми породами, часто пересеченными густой сетью прожилков сливного кварца. Редко в центре встречен кварц. По направлению к вмещающим породам более широкое распространение имеют мелкозернистые кварцево-турмалиновые метасоматиты, которые сменяются кварцево-серицитовыми породами (по песчано-сланцевым) или пропилитами (по эффузивным породам). Степень пропилитизации увеличивается в верхних частях зоны дробления, количество турмалина увеличивается с глубиной.

Рудные минералы образуют в минерализованных породах рассеянную вкрапленность, небольшие гнезда и тонкие прожилки. С шестоватым кварцем и в меньшей степени с кварцево-турмалиновыми породами обычно связана вкрапленность касситерита и вольфрамита. Перечисленные сульфиды, а также галенит, сфалерит, пирит, пирротин и другие обычно неравномерно распределены по всей зоне дробления с некоторым обогащением верхних ее частей.

Рудные тела в пределах зоны дробления выделяются по данным опробования и значительно меньше по размерам самой зоны. Олову в рудах сопутствуют вольфрам, висмут, мышьяк, медь, свинец, цинк, серебро, индий, сурьма. Достаточно отчетливо проявляется зональность в распределении элементов, причем не только вертикальная, но идет обогащение в стороны и вниз от центра минерализации. Условно такую зональность можно назвать концентрической или осевой, как предлагается в работах С. В. Григоряна и других. Ряд зональности в целом не противоречит единому ряду геохимической зональности, и от центра к периферии может быть намечена такая последовательность: олово, вольфрам — висмут — мышьяк, медь — свинец, цинк, серебро — сурьма. Разведка месторождения производилась скважинами и в верхних горизонтах штольнями. По каждому пересечению минерализованной зоны отбирались

бороздовые или керновые пробы (секции) метровой длины. Все пробы подвергались спектральному анализу методом просыпки.

Таким образом, в распоряжении геологов находился большой геохимический материал, вполне пригодный для расчетов энергии рудообразования. По распределению отдельных элементов в пределах рудного тела можно говорить о столбообразном распределении оруденения с вертикальным продолжением рудной минерализации на глубину в южной части месторождения и северным склонением рудных столбов в северной его части (рис. 30). Распределение суммарной энергии рудообразования позволяет наметить более определенно положение осевых линий рудных столбов.

В северной части месторождения намечаются 2 направления высокой энергии рудообразования: от профиля *III* у поверхности к профилю *X* на глубине 300 м и от профиля *XIV* у поверхности к профилям *XVIII—XX* на глубине. В стороне от этих осевых линий и располагается основное промышленное оруденение. Направление их на глубине фиксирует перспективные для обнаружения оруденения части рудных тел за пределами разведанного контура. В южной части месторождения осевая линия, фиксирующая максимальную энергию рудообразования, проходит вертикально вниз в районе *V—VI* профилей и разветвляется к поверхности по направлению к *II* и *VII* профилям. По распределению энергии рудообразования можно говорить, что в этой части месторождения вскрывается нижняя половина рудного тела, с глубиной оруденение сужается и перспективными для его обнаружения являются глубокие горизонты месторождения в районе профилей *V—VI*.

Геохимические методы, которые можно использовать при оценке рудопоявлений, предусматривают изучение первичных и вторичных ореолов распределения основного элемента и его элементов-спутников в минерализованных породах. Оценочная роль вторичных ореолов (металлометрической съемки) небольшая, съемку следует проводить для определения положения рудоносной структуры при достаточной изученности района.

Первичные ореолы имеют важное оценочное значение. Они изучаются при помощи отбора геохимических проб (обычно скочков с интервала до 5 м) и их спектрального анализа для установления характера распределения элемента и его спутников по всей ширине ореола. Специальные геохимические оценочные методы предусматривают изучение характерных элементов, кристалломорфологических особенностей минералов, распределение содержаний элементов-примесей и др.

Из обобщенных геохимических показателей рекомендуется рассчитывать продуктивность по выше и ниже фоновым содержаниям в ореоле, коэффициент аномальности, энергию рудообразования. Распределение перечисленных величин и параметров следует изучать по отдельным линиям наблюдений, но обя-

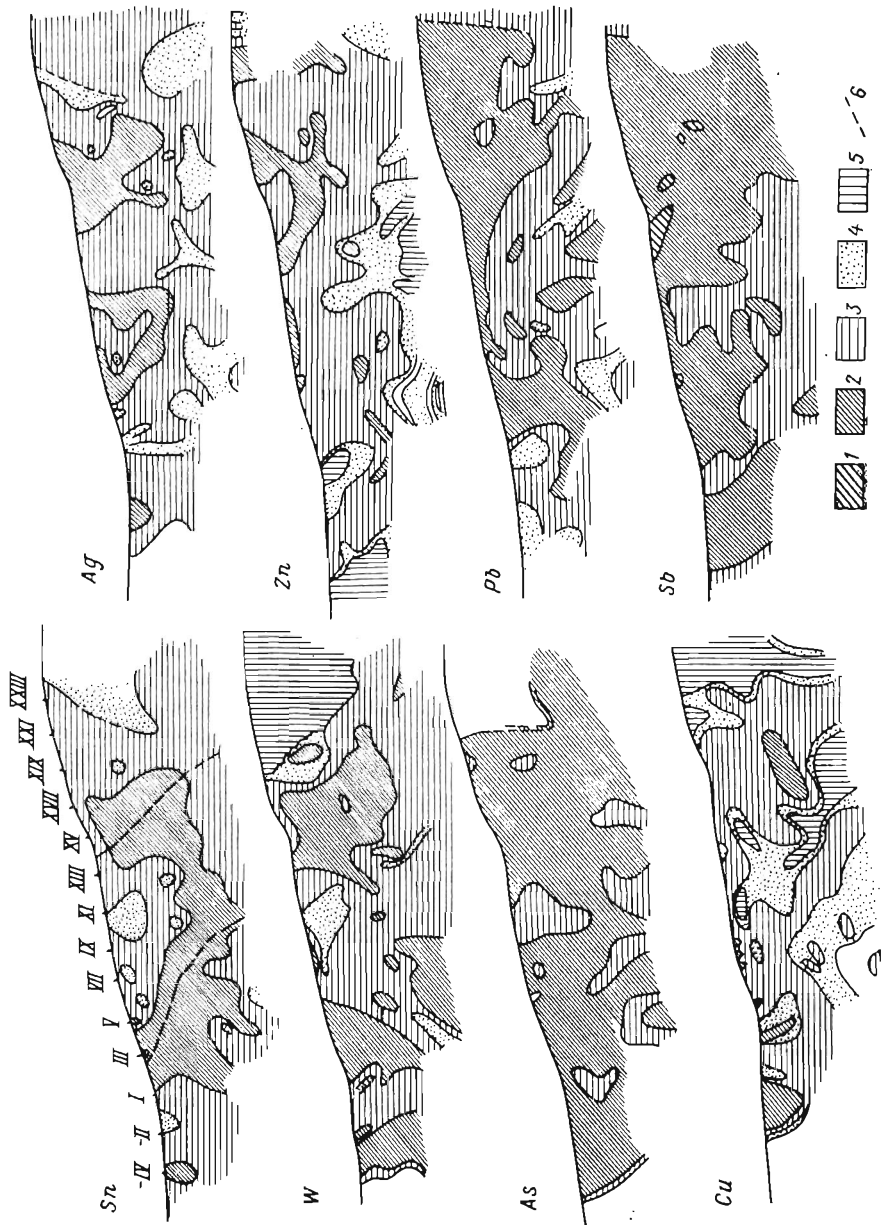


Рис. 30. Распределения продуктивностей отдельных элементов в проекции минерализованной зоны оловорудного месторождения на вертикальную плоскость.

Значения продуктивности, К:м: 1 — >1000, 2 — 300—1000, 3 — 100—300, 4 — 30—100, 5 — <30, 6 — осевые линии максимальных значений энергии рудообразования.

зательно пересекающим рудную и безрудную части эталонного объекта, по вертикальным разрезам или по горизонтным планам. При этом распределение необходимо изображать в виде изолиний.

При оценке рудопроявлений по указанным выше данным используются закономерности строения первичных ореолов вблизи рудных тел линейно-вытянутой формы. В частности, для оловорудных объектов отмечено, что первичные ореолы вблизи «промышленных» и «непромышленных» частей рудных тел различаются между собой. Вблизи промышленных частей рудное вещество концентрируется в рудовмещающей структуре. Рассеяние во вмещающих породах, приводящее к образованию первичных ореолов, проявляется здесь значительно меньше. Лишь по относительно небольшому количеству трещин, сопутствующих основной структуре, отлагаются инфильтрационным путем повышенные концентрации рудных элементов. Между ними содержания элементов фоновые и ниже. В результате продуктивность первичных ореолов вблизи промышленных частей рудных тел низка. На выклинивании рудных тел и за пределами их, наоборот, количество трещин и суммарная мощность резко возрастают и, хотя абсолютные содержания рудных элементов в них меньше, чем у промышленных частей рудных тел, общая продуктивность первичных ореолов значительно больше. Меньше в этих частях и проб с нижефоновыми содержаниями. В общем эту закономерность строения первичных ореолов можно сформулировать следующим образом: промышленные части рудных тел характеризуются концентрацией вещества непосредственно в рудных телах, тогда как краевые, непромышленные их части — рассеянием вещества не только в рудовмещающей структуре, но и во вмещающих ее породах.

Эту закономерность можно использовать на оценочной подстадии для разбраковки отдельных частей рудоносных структур, изученных по редкой сети выработок. Методика оценки заключается в использовании геохимического изучения первичных ореолов, на основании анализа проб, отобранных по всем поисковым выработкам. Однако использование указанной закономерности затруднительно, так как распределение отдельных элементов весьма неравномерно, а отсюда и судить об общей концентрации или рассеянии вещества в первичном ореоле достаточно сложно. Использование расчетов энер-



гии рудообразования в этом случае значительно упрощает оценку. В отличие от использованной в предыдущих примерах методики расчетов в этом случае рассматривается не суммарная энергия рудообразования, а отдельно «энергия привноса» и «энергия выноса». Увеличение «энергии выноса» и уменьшение «энергии привноса» в сравниваемых сечениях является благоприятным оценочным признаком, который успешно можно использовать в комплексе с другими геологическими, геофизическими и геохимическими признаками. Насколько контрастными являются различия по этому признаку, приведено при рассмотрении месторождения Дальнего Востока.

В геологическом строении района данного месторождения участвуют осадочные породы юры — глинистые сланцы, алевролиты, тонкозернистые песчаники, слагающие низы разреза. Выше согласно залегают средне- и мелкозернистые песчаники, на которых налегают песчано-алевролитовые породы — флиш. В северной части они перекрыты слабо дислоцированными вулканитами мела, в основании которых лежат ниже-верхнемеловые осадочно-вулканогенные отложения. Вулканиты мела по составу обычно представлены роговообманковыми и плагиоклазовыми порфиритами (верхняя пачка) и туфами порфиритов (нижняя). Более молодыми, послерудными породами района являются неогеновые базальты и долериты и древнечетвертичные базальты.

Интрузивные породы района представлены гранитами, слагающими крупный массив, комагматическими кварцевыми порфирами и гранит-порфирами. Вдоль региональных разломов субширотного направления обнажаются мелкие тела гранодиоритов, диоритов и др. Они прорывают как юрские осадочные породы, так и эффузивы вплоть до верхнемеловых.

Для территории характерно широкое развитие зон дробления с широко развитой минерализацией в них. Зоны простираются обычно в субмеридиональном направлении. В них отмечаются процессы замещения минералов вмещающих пород новообразованиями и участки открытых полостей. По составу зоны однотипны: в центральных частях жильный кварц (иногда с касситеритом, арсенопиритом, висмутином, вольфрамитом) или турмалиновые породы, пересеченные кварцевыми прожилками. Ближе к зальбандам обнаруживаются турмалиновые и кварц-турмалиновые породы с небольшим количеством сульфидов — арсенопирита, халькопирита, пирротина и т. д. Краевые части сложены пропилитами по эффузивам, кварцево-серицитовыми образованиями и осадочными породами. С увеличением глубины эрозионного среза возрастает роль турмалина в минерализованных зонах, пропилиты сменяются кварцево-серицитовыми породами. Минерализованные зоны имеют в основном простую морфологию, хотя она и меняется.

На площадях с наименьшим эрозионным срезом развиты прожилково-сетчатые линейно-вытянутые зоны со слабой проработкой блоков между прожилками. В зонах с большим эрозионным срезом интенсивность проработки пород увеличивается и в них появляются более крупные жилы. Вблизи вулканических построек обнаруживаются серии сближенных зон минерализации, ограниченно распространенные по вертикали. В центральных частях грабен-синклиналей развивается система сопряженных зон. Среди юрских осадочных пород выделяются:

- а) линейно-вытянутые протяженные зоны;
- б) пучкообразные зоны ограниченного размера в экзоконтакте штокообразных тел;
- в) изометрические тела автобрекчий вблизи даек.

Рудные тела в зонах всех типов устанавливаются по данным опробования. В юрских отложениях олово сопровождается повышенными концентрациями свинца, цинка и железа, в эффузивах мела — свинца и цинка, в туфогенно-осадочных породах — мышьяка и меди.

Отдельные минерализованные зоны и рудные тела образуют почти непрерывные цепочки, прослеженные через весь район. На рис. 31 показаны два пересечения рудных тел в промышленной и непромышленной их части.

Как указывалось выше, рудные тела в этом районе приурочены к минерализованным зонам дробления кварцево-турмалинового состава. Для примера выбраны зоны, где оруденение вмещает песчано-сланцевые породы юрского возраста. На рис. 31 отчетливо видно, что минерализованные зоны сопровождаются первичными ореолами рудных элементов (показаны ореолы только трех из них — олова, свинца и серебра). Ореолы имеют полосчатое строение. Полосы выше фонового содержания элементов сменяются полосами фонового и ниже фонового. Видно, что содержания выше фонового преобладают на разрезе, пересекающем минерализованную зону в непромышленной ее части, а ниже фонового — на разрезе, проходящем через центр рудного тела. В приведенном примере различия ореолов и по распределению отдельных элементов достаточно контрастны. Но и здесь по некоторым элементам (например, по серебру) разрезы сходны между собой. В других случаях различия в строении ореолов могут быть менее контрастны.

Распределения энергии рудообразования в промышленной части рудных тел и на пересечениях безрудной части минерализованных тел являются как бы негативным отображением друг друга. В промышленной части рудного тела «энергия приноса» обычно составляет 1—25 усл. ед., редко превышая эти значения, а иногда не достигает и 1 усл. ед. «Энергия выноса» обычно составляет 26—100 усл. ед., иногда превышает 100 и редко уменьшается до 1—25 усл. ед. В непромышленной части

рудного тела «энергия привноса» обычно 26—100 усл. ед. и более и очень редко 1—25 усл. ед., а «энергия выноса» не превышает 1—25 и часто меньше 1 усл. ед. Такое различие характеристики первичного ореола удобно использовать на оценочной подстадии работ.

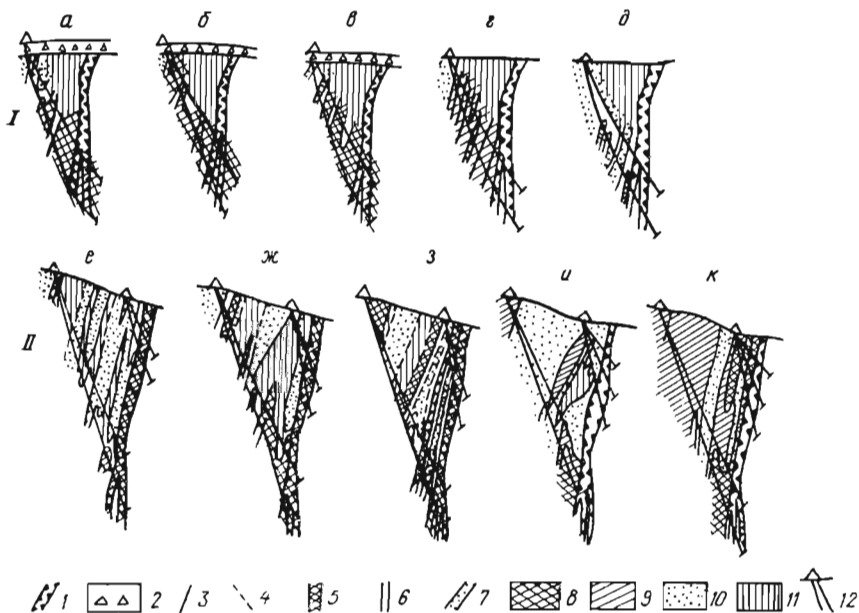


Рис. 31. Распределение рудных элементов (а—в, е—з) и энергии рудообразования (г, д, и, к) по «безрудному» I и рудному II профилям оловорудного месторождения.

Распределение олова (а, е), мышьяка (б, ж), серебра (в, з), «энергии привноса» (г, и), «энергии выноса» (д, к).

I — рудная зона; 2 — делювиальные отложения; границы ореолов: 3 — установленные, 4 — предполагаемые; содержания элементов: 5 — выше фоновых, 6 — фоновые, 7 — ниже фоновых; энергия рудообразования усл. ед.: 8 — более 100, 9 — 100—26, 10 — 1—25, 11 — менее 1; 12 — скважина.

В качестве примера оценки по этому признаку рассмотрим результаты геохимических работ на месторождении Дальнего Востока. Оно расположено в протяженной тектонической зоне субмеридионального простираия. К ней примыкает несколько оперяющих зон северо-западного направления. Месторождение представлено серией крутопадающих зон, сложенных метасоматитами хлорит-серицитового, серицит-кварцевого и кварцевого состава. Вмещают метасоматиты обычно липариты, игнимбриты, реже гранит-порфиры. Граница между метасоматитами и вмещающими породами довольно отчетливая.

Рудные тела представлены кварцевыми метасоматитами мощностью от 1 до 10 м, при этом необходимо отметить, что на участках сочленения основной зоны с мелкими мощность рудных тел и содержание полезных компонентов возрастают. Распределение оруденения неравномерное — гнездовое и столбообразное, повышение концентрации рудных минералов отмечается в зальбандах тел. В рудных телах кроме олова содержатся сульфиды, представленные галенитом, сфалеритом, халькопиритом, пиритом, пирротинном, арсенопиритом. Во вмещающих породах отмечаются прожилки и вкрапленность тех же сульфидов, образующих ореол вокруг рудных тел.

Вмещают оруденение липариты-игнимбриты мелового возраста. Оруденение приурочено к тектонической структуре субмеридионального простирания, прослеживающейся на 1600 м, мощностью 20—150 м. С запада к ней примыкают несколько мелких зон, имеющих северо-западное простирание и прослеживающиеся на 80—450 м. Падение всех зон крутое. Минерализация в пределах зон представлена метасоматитами хлорит-серицитового, серицит-кварцевого и кварцевого состава. Граница между метасоматитами и вмещающими породами резкая. Границы рудных тел в пределах минерализованных зон устанавливаются по данным опробования. Форма рудных тел часто столбообразная. Распределение оруденения неравномерное.

Из рудных минералов в составе рудных тел часто отмечаются касситерит, галенит, сфалерит, халькопирит, пирит, пирротин, арсенопирит. Рудные минералы образуют обыкновенно рассеянную вкрапленность и мелкие гнезда. Иногда они приурочены к зальбандам рудных тел или встречаются во вмещающих породах в виде прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации. С глубиной количество сульфидов в рудах и вмещающих породах убывает.

Из нерудных минералов преобладают кварц, серицит, хлорит, флюорит. Основные элементы-спутники олова — медь, свинец, мышьяк, серебро. Первичные ореолы, как и сами минерализованные зоны, имеют линейно-вытянутую форму. Ширина их составляет первые десятки метров. Достаточно отчетливо в распределении элементов проявляется вертикальная зональность. В верхних горизонтах резко увеличивается содержание свинца и мышьяка, на средних концентрируются медь и серебро, к наиболее глубоким горизонтам приурочены повышенные содержания олова. Промышленные рудные тела концентрируются в северной части рудоносной структуры, в южной обнаруживается лишь рассеянная минерализация. Как в северной, так и в южной части минерализованная зона дробления вскрыта с поверхности канавами, по которым по всей длине взяты бороздовые пробы метровой длины. Все пробы проанализированы спектрально на широкий круг рудных элементов.

По результатам анализов И. В. Касьяновой изучено распределение рудных элементов на поверхности месторождения. Рис. 32 иллюстрирует распределение олова и меди соответственно в северной и южной частях месторождения. Видно, что по характеру первичных ореолов северная и южная части ореолов различаются несильно. Если ореолы меди в южной части шире, чем в северной, то ширина и контрастность ореолов олова в обеих частях практически одинакова. В то же время распределение энергии рудообразования в северной и южной частях месторождения резко различно. В северной части по «энергии привноса» очерчиваются узкие полосы вблизи промышленно интересных частей минерализованной зоны. Энергия здесь иногда превышает 100 усл. ед. Такое большое значение объясняется высокими содержаниями элементов непосредственно в рудной зоне. В первичном ореоле значения не превышают 25 усл. ед., а иногда составляют 1 усл. ед. и меньше.

В южной части ширина аномалий с «энергией привноса» от 26 до 100 усл. ед. и выше в несколько раз больше по площади, значений меньше 1 усл. ед. практически не устанавливается. «Энергия выноса» по абсолютному значению и в той и в другой части месторождения значительно меньше (обычно 1—25, редко 26—100 усл. ед.), но по площади ореолов в северной части в 2—3 раза больше, чем в южной, где повышенные значения «энергии выноса» прослеживаются в виде отдельных относительно узких полос. Настолько же меньше в южной части и суммарная продуктивность по «энергии выноса». Такое распределение энергии рудообразования на площади месторождения южной его части, несмотря на относительное обогащение первичных ореолов оловом и медью, характеризуется отрицательно. Результаты буровых работ на месторождении не противоречат сделанным выводам. Из 9 пробуренных в южной части месторождения скважин ни одна не вскрыла промышленного оруденения, в то время как в северной части сосредоточены основные запасы руды. Таким образом, изучение распределения «энергии привноса» и «энергии выноса» (наряду с другими геофизическими и геохимическими признаками) помогает оценивать линейно-вытянутые минерализованные зоны.

Приведенный пример можно рассматривать как иллюстрацию возможностей использования энергии рудообразования при геохимическом картировании площадей.

Если рассматривать распределение энергии рудообразования по вертикальным разрезам, то можно установить, что центральная часть наиболее крупных промышленных объектов характеризуется большой «энергией привноса» в ореоле, причем в строении его отмечается чередование участков с аномально высокими и относительно низкими значениями энергии, т. е. наблюдается полосчатое строение. Количество полос в ореоле не менее 3—5, ширина их меняется от 5 до 15 м. Для «энергии выноса» харак-

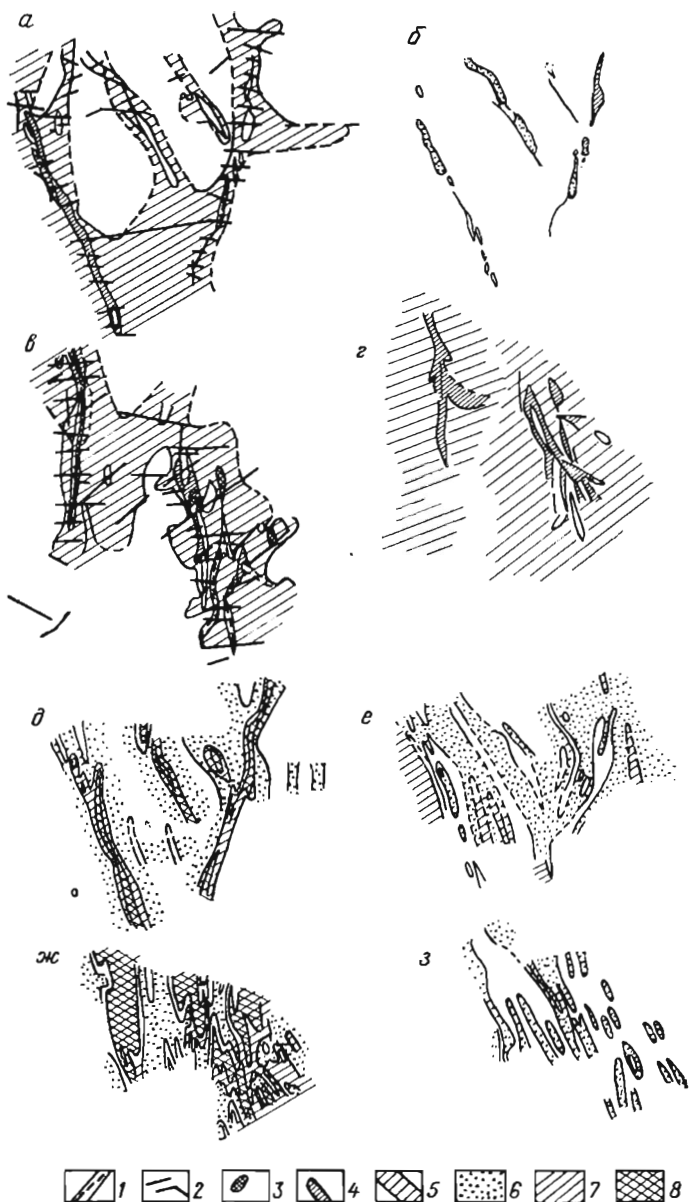


Рис. 32. Распределение олова (а, в), меди (б, г) и энергии рудообразования (д—з) по поверхности оловорудного месторождения (по данным И. И. Бока и И. В. Касьяновой).

Месторождения: а, б, д, е — промышленные, в, г, ж, з — непромышленные.  
 1 — рудные зоны; 2 — каналы; содержания элементов, %: 3 — больше 0,1, 4 — 0,01—0,1, 5 — 0,001—0,01; энергии рудообразования, усл. ед.: 6 — 1—25, 7 — 26—100, 8 — больше 100 усл. ед.; д, ж — «энергия привноса», е, з — «энергия выноса».

терно наличие широких полей относительно повышенных значений. На флангах рудных тел в этом случае аномальные значения энергии рудообразования («энергии привноса») образуют единую широкую полосу. «Энергия привноса» не создает широких непрерывных полос относительно повышенных значений. В непромышленной части относительно крупных рудных тел «энергия привноса» образует самые узкие аномалии с меньшим количеством полос. «Энергия выноса» также наименьшая.

Безрудный участок с рассеянной минерализацией характеризуется наименьшей «энергией привноса» и относительно высокой «энергией выноса».

В заключение можно подчеркнуть, что использование энергии рудообразования как единого геохимического показателя, во-первых, более обоснованно с физико-химической точки зрения, чем других формальных геохимических показателей. Во-вторых, просто и удобно в использовании при наличии результатов анализов специальных геохимических проб или спектральных анализов на широкий круг элементов бороздовых и керновых проб. В-третьих, использование этого показателя, как было показано на примерах, помогает решению конкретных геологических задач в тех случаях, когда их решение по распределению отдельных элементов затруднительно. Другими словами, использование энергии рудообразования облегчает геохимические работы и расширяет перспективы прикладной геохимии. Основными практическими задачами, в решении которых целесообразно использование энергии рудообразования, являются следующие.

1. Выявление первичных ореолов по комплексу элементов для поисков рудных тел, в особенности при сложном строении и комплексном составе ореолов и малой их контрастности.

2. Составление геохимических карт при тех же (осложняющих использование отдельных элементов) условиях.

3. Характеристика общего и внутреннего строения рудного поля и отдельных его частей с целью качественной оценки общих перспектив оруденения и пространственного положения наиболее благоприятных для концентрации оруденения участков.

4. Оценка (разбраковка) перспективных участков на подстанции оценочных работ в комплексе с другими геофизическими и геохимическими методами с минимальными объемами поискового и разведочного бурения и горных выработок.

#### **§ 14. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАПАСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ РУДНЫХ ПЕРСПЕКТИВ ТЕРРИТОРИИ**

Для оценки возможности выявления новых запасов на исследуемой территории прежде всего необходимо определить ее границы. Оцениваемая площадь определяется задачами оценки,

возможностями метода оценки и степень изученности территории.

При перспективном планировании прироста запасов по крупным участкам используются все материалы по распределению для выбранного вида полезного ископаемого для земного шара в целом и для отдельных его частей. Допускается в качестве аксиомы, что при таком масштабе работ оценка возможна. Исследования и сопоставление теоретических и фактических кривых распределения запасов по классам содержаний полезного компонента ( см. гл. II) показывают близость их и, следовательно, возможность оценки. Распределение запасов глобальных или по крупным участкам земного шара подчиняется выведенным выше теоретическим закономерностям.

Не менее важна оценка перспектив выявления новых запасов сырья определенных кондиций в крупных рудных районах, таких как полиметаллическая провинция Рудного Алтая, Тихоокеанский оловорудный пояс, золоторудная провинция Южной Африки и т. п. Сопоставление теоретических и фактических кривых распределения запасов по классам содержаний полезных компонентов для таких провинций (по содержаниям свинца, меди и олова) подтвердило возможность использования предлагаемой методики оценки с точки зрения требований к масштабу и возможностям метода, изученности, т. е. достаточности имеющегося фактического материала. В ряде рудных провинций сделана попытка оценки еще меньших участков. В качестве единицы оцениваемой площади выбирались хорошо обособляющиеся геологически металлогенические зоны или отдельные рудные районы с однотипной рудной минерализацией. Работы показали, что такие районы отвечают всем требованиям и пригодны для оценки. Таким образом, можно говорить уверенно о возможности использования предлагаемой методики оценки перспективных и достаточно изученных рудных районов в масштабе 1 : 200 000—1 : 50 000.

Небольшой опыт работ имеется и по оценке части рудных районов, выделяемой формально (например, половина или четверть площади единого рудного района) или по геологическим соображениям. Все оценки показали возможность такого масштаба работ. Видимо, нижним пределом площадей, на которых предлагаемая методика оценки целесообразна, является рудное поле. Есть примеры совпадения теоретических и фактических распределений запасов по классам содержаний отдельных оловорудных и полиметаллических рудных полей Дальнего Востока и Рудного Алтая.

Выбрав площадь и определив задачу оценки как глобальную (для всего земного шара, отдельных континентов или стран), региональную (для крупных рудных регионов или рудных районов) или локальную (для частей рудных районов или отдель-



ных рудных полей), можно приступить к сбору и группировке материала для оценки.

Прежде всего в границах выбранной площади следует составить перечень рудных объектов одного типа полезных ископаемых, а для них необходимо иметь материалы разведки и эксплуатации, которые являются основой перспективной оценки территории. Затем определяется однотипность материала для оценки, т. е. выбор по всем объектам либо результатов разведочных работ, желательно одной детальности, либо результатов эксплуатации. В зависимости от времени эксплуатации объектов на выбранной территории возможен один из четырех случаев обладания материалов.

1. Имеются сведения о содержаниях полезного компонента по каждой разведочной выработке на каждом объекте.

2. Имеются сведения о запасах полезного компонента и содержаниях его в каждом блоке разведанных запасов.

3. Имеются сведения о запасах руды на каждом объекте и о содержаниях полезного компонента в ней за все время отработки этих объектов.

4. Имеются сведения о среднем содержании полезного компонента и об объеме добытой руды за определенные периоды эксплуатации (например, за каждый год, за 5, 10 лет и т. д.).

Все эти сведения пригодны для оценки по предлагаемой методике, их следует группировать в зависимости от характера сведений.

**Фактическое распределение запасов руды по классам содержания в ней олова для оловорудного района Дальнего Востока (по отдельным разведочным выработкам)**

Объекты	Выработка	Среднее содержание по выработке, %				Запасы руды отнесенные к выработке
		олово	мышьяк	свинец	мель	
Месторождение I	Скв. 10	0,27	0,08	0,12	0,32	325 000
Уч. Дальний	Шт. 5. Р. 23	0,87	0,12	0,43	0,55	12 600

**Фактическое распределение запасов полиметаллических руд по годам эксплуатации для рудного района Казахстана**

Объект	Годы эксплуатации	Добыто, усл. ед.	Средневзвешенное содержание свинца, %
Месторождение I	1950—1960	127	2,3
Месторождение В	1930—1940	50	5,7

После классификации первичный сбор необходимых для оценки материалов можно считать законченным. Дальнейшая обработка собранных материалов заключается в составлении исходных таблиц для построения фактических кривых распределения запасов по классам содержаний.

Если собраны данные типа приведенных выше или запасы по отдельным разведочным блокам, то составление исходных

таблиц просто. Выбираются градации содержаний с таким расчетом, чтобы для статистических выводов было достаточно классов содержаний. Достаточным может считаться 7—12 классов, обычно принимается более дробное деление (15—20 классов). Наметив определенное количество классов содержаний, выбирают граничные наибольшее и наименьшее содержания по фактическим материалам. Весь интервал содержаний между граничными значениями делят на количество градаций с таким расчетом, чтобы границы градаций были достаточно округленными. Например, в рудном районе отмечаются средние содержания свинца в подсчитанных блоках запасов от 0,5 до 14,5%. Весь интервал содержаний разбивается на 15 классов: 0—1,0, 1,1—2,0; 2,1—3,0% и т. д. В другом районе средние содержания олова по отдельным разведочным выработкам колеблются от 0,07 до 2,1%. Для дальнейшей обработки весь интервал содержаний разбивается на 21 класс: 0,0—0,1; 0,11—0,2; 0,21—0,3% и т. д. Затем по каждому классу содержаний, используя фактические данные, суммируют все запасы руды.

**Фактическое распределение запасов полиметаллических руд по классам содержаний свинца (или условного свинца) для рудного района Казахстана**

Классы содержаний свинца (усл. свинца), % (усл. ед.)	Запасы полиметаллической руды (металла), т (усл. ед.)
2,1— 3,0	272
11,1—12,0	37

Запасы группируются только по классам содержаний, если в дальнейшем предполагается использовать распределение запасов только главного полезного компонента. Если рассматривается распределение запасов элементов-спутников, то дополнительно выбираются классы содержаний по каждому спутнику и в дальнейшем запасы по каждому классу содержаний каждого спутника группируются так же, как для главного компонента. Результаты суммирования классифицируются.

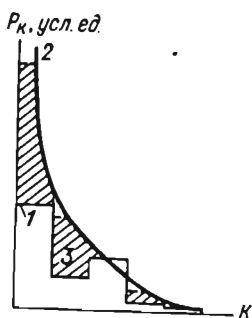
**Фактическое распределение запасов олова и его элементов-спутников по классам их содержаний**

Содержание олова, %	Запасы олова, усл. ед.	Содержание меди, %	Запасы меди, усл. ед.	Содержание мышьяка, %	Запасы мышьяка, усл. ед.
0,61— 0,7	12,3	1,51—2,0	10,4	0,61— 0,07	1,4
0,91—12,0	1,3	3,1—3,5	2,7	—	—

Эти сведения являются основными для оценки рудных территорий на основе использования термодинамических закономерностей.

В случае, когда сведения о запасах и содержаниях в известных месторождениях собирались по материалам их эксплуата-

ции, по отдельным блокам или периодам времени, т. е. собран не собственно первичный материал о закономерностях распределения запасов по классам содержаний, а осредненный в процессе эксплуатации, то для получения фактического распределения необходима специальная дополнительная обработка исходного материала. Мы эту обработку называем разложением фактических запасов по теоретической кривой. Процесс обработки материала при этом заключается в следующем. Фактически добытые за промежуток времени запасы руды с определенным содержанием разбиваются на классы с более дробным содержанием согласно теоретической кривой или формуле распределения запасов.



**Рис. 33.** Схема оценки потенциальной рудоносности площадей.

Запасы: 1 — фактические, 2 — рассчитанные по теоретической формуле, 3 — перспективные.

При разложении исходными в каждом случае являются суммарные запасы по отдельным месторождениям рудного поля, средневзвешенное содержание и бортовое содержание полезного компонента в них, начиная с которого подсчитывались запасы. Подготовительные работы при разложении суммарных запасов заключаются в составлении вспомогательных таблиц, в которых начиная с принятого бортового содержания рассчитываются по теоретической формуле суммарные относительные запасы и средневзвешенное содержание для каждого класса. Пример такого расчета приведен в табл. 37, 38.

Дальнейшее разложение проводится по фактическим данным (табл. 39, 40) для отдельных рудных полей оловорудного района (12 рудных полей) или разным временным периодам эксплуатации (10 периодов) для полиметаллического региона.

Каждый из столбцов соответствует разложению по одному рудному полю (табл. 39) или одному периоду эксплуатации (табл. 40). Суммарные запасы разлагались пропорционально относительным запасам в табл. 37, 38 с соответствующим средневзвешенным содержанием.

Например, рассматриваем рудное поле II (табл. 39), запасы руды 8,5 усл. ед., средневзвешенное содержание 0,64, бортовое содержание принимаем 0,1%. По табл. 37 находим произведе-

Расчет средневзвешенного содержания по теоретическому уравнению распределения запасов оловянной руды по классам содержаний олова в ней

Интервал, усл. кларки	Расчетный кларк, усл. ед.	Среднее содержание, %	Запасы, усл. ед.	Запасы, % к сумме	Пронзведение средних содержаний на запасы	Нарастающая сумма произведений	Нарастающие запасы	Средневзвешенное содержание
1—2	1,5	0,15	8825	20,795	3,12	85,11	99,991	0,85
2—3	2,5	0,25	5138	12,107	3,03	81,99	79,196	1,03
3—4	3,5	0,35	3633	8,561	3,00	78,96	67,089	1,17
4—5	4,5	0,45	2627	6,662	3,00	75,96	58,528	1,29
5—6	5,5	0,55	2289	5,388	2,96	72,96	51,866	1,40
6—7	6,5	0,65	1918	4,519	2,94	70,00	46,478	1,50
7—8	7,5	0,75	1622	3,822	2,87	67,06	41,959	1,59
8—9	8,5	0,85	1466	3,454	2,94	64,19	38,136	1,68
9—10	9,5	0,95	1299	3,061	2,95	61,25	34,683	1,76
10—11	10,5	1,05	1163	2,740	2,88	58,30	31,622	1,84
11—12	11,5	1,15	1063	2,505	2,88	55,42	28,882	1,92
12—13	12,5	1,25	967	2,281	2,85	52,54	26,377	1,99
13—14	13,5	1,35	896	2,111	2,85	49,69	24,096	2,06
14—15	14,5	1,45	826	1,946	2,82	46,84	21,985	2,13
15—16	15,5	1,55	773	1,821	2,82	44,08	20,039	2,19
16—17	16,5	1,65	726	1,711	2,82	41,20	18,218	2,26
17—18	17,5	1,75	678	1,597	2,79	38,38	16,507	2,32
18—19	18,5	1,85	641	1,510	2,79	35,59	14,910	2,39
19—20	19,5	1,95	608	1,432	2,79	32,80	13,400	2,45
20—21	20,5	2,05	573	1,350	2,77	30,01	11,968	2,50
21—22	21,5	2,15	541	1,275	2,74	27,24	10,618	2,56
22—23	22,5	2,25	521	1,227	2,74	24,50	9,343	2,62
23—24	23,5	2,35	495	1,166	2,74	21,74	8,116	2,68
24—25	24,5	2,45	474	1,116	2,73	19,00	6,950	2,73
25—26	25,5	2,55	456	1,075	2,74	16,27	5,834	2,79
26—27	26,5	2,65	434	1,022	2,71	13,53	4,759	2,84
27—28	27,5	2,75	418	0,985	2,71	10,82	3,737	2,86
28—29	28,5	2,85	404	0,952	2,71	8,11	2,752	2,94
29—30	29,5	2,95	390	0,919	2,71	5,40	1,800	3,00
30—31	30,5	3,05	374	0,881	2,69	2,69	0,881	3,05
Σ			42238	99,991	85,09			

ние средневзвешенного содержания на относительные запасы 85,11. По фактическим запасам находим переходный коэффициент  $8,5 : 85,11 = 0,099$ . После этого рассчитываем весь ряд содержаний: для среднего содержания 0,15%  $20,795 \cdot 0,099 = 2,0$ ; для среднего содержания 0,25%  $12,107 \cdot 0,099 = 1,2$ ; для 0,35%  $8,561 \cdot 0,099 = 0,85$  и т. д.

После расчета разложенного запаса по всем рудным полям или периодам эксплуатации вычисляются суммарные запасы по всем классам содержаний (табл. 39, 40). Дальнейшие операции

Расчет средневзвешенного содержания по теоретическому уравнению распределения запасов полиметаллических руд по классам содержания свинца в них

Интервал усл. кларки	Расчетный кларк, усл. ед.	Среднее содержание, %	Запасы, усл. ед.	Запасы, % к сумме	Произведение средних содержания на запасы	Нарастающая сумма произведений	Нарастающие запасы	Средневзвешенное содержание
1—2	1,5	0,15	6,032	17,074	2,561	215,3752	99,859	2,15
2—3	2,5	0,25	3,519	9,969	2,492	212,8742	82,765	2,57
9—10	9,5	0,95	0,815	2,306	2,191	196,4752	47,321	4,17
10—11	10,5	1,05	0,713	2,069	2,172	194,2842	45,015	4,31
11—12	11,5	1,15	0,662	1,873	2,154	192,1122	42,946	4,57
20—21	20,5	2,05	0,341	0,965	1,978	173,5242	30,552	5,61
21—22	21,5	2,15	0,323	0,914	1,965	171,5462	29,587	5,73
31—32	31,5	3,15	0,205	0,581	1,830	152,5432	22,168	6,87
40—41	40,5	4,05	0,151	0,427	1,729	136,4562	17,607	7,75
41—42	41,5	4,15	0,147	0,416	1,726	134,7272	17,181	7,83
50—51	50,5	5,05	0,116	0,328	1,656	119,4007	13,799	8,65
100—101	100,5	10,05	0,047	0,135	1,357	44,8462	3,350	13,38
101—102	101,5	10,15	0,046	0,132	1,341	43,4895	3,215	13,54
150—160	155	15,5	0,026	0,073	1,136	15,2094	0,705	21,42
160—170	165	16,5	0,024	0,067	1,106	14,0733	0,632	22,33
170—180	175	17,5	0,022	0,061	1,0745	12,9678	0,565	22,75
200—210	205	20,5	0,017	0,049	0,996	9,8203	0,395	25,17
250—260	255	25,5	0,012	0,035	0,887	5,0769	0,182	28,22
280—290	285	28,5	0,010	0,029	0,829	2,4489	0,083	30,62

с исходными таблицами являются собственно оценкой потенциальной рудоносности изучаемой территории. Методика ее заключается в следующем.

Строится график (рис. 33), где по оси абсцисс откладывается среднее содержание полезного компонента, а по оси ординат — запасы (фактические или относительные). Затем наносится кривая теоретического распределения запасов по тем же классам содержаний, что и фактическое распределение. Теоретические запасы рассчитываются по приведенным в гл. I фор-

Разложение запасов отдельных рудных полей оловоносного рудного района по формуле теоретического распределения запасов по классам содержаний

Среднее содержание в классе	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0,15	11,7	2,0	3,2	3,4	5,4	10,7	3,8	3,6	3,8	1,0	1,7	0,2
0,25	6,8	1,8	1,8	2,0	3,1	6,3	2,2	2,1	2,2	0,6	1,0	0,1
0,35	4,8	0,8	1,3	1,4	2,2	4,4	1,6	1,5	1,6	0,5	0,7	0,0
0,45	3,7	0,6	1,0	1,1	1,77	3,4	1,2		1,2	0,4	0,6	0,06
0,55	3,0	0,5	0,8	0,9	1,4	2,8	0,9		1,0	0,3	0,4	
0,65	2,5	0,4	0,7	0,7	1,1		0,8		0,8	0,2	0,4	
0,75	2,2	0,4	0,6	0,6	1,0		0,7		0,7	0,2	0,3	
0,85	1,9	0,3	0,5	0,6	0,9		0,6		0,6	0,2	0,3	
0,95	1,7	0,3	0,5	0,5	0,8		0,6		0,6	0,2	0,3	
1,05	1,5	0,3	0,4	0,4	0,7		0,5		0,5	0,1	0,2	
1,15	1,4	0,2	0,4	0,4	0,6		0,5		0,5	0,1	0,2	
1,25	1,3	0,2		0,4	0,6		0,4		0,4	0,1	0,2	
1,35	1,2	0,2		0,3	0,5						0,2	
1,45		0,2			0,5						0,2	
1,55		0,2			0,5						0,2	
1,65		0,2			0,5						0,2	
1,75		0,2			0,4						0,1	
1,85		0,1									0,1	
1,95		0,1									0,1	
Всего по рудному полю	43,7	9,0	11,2	12,8	21,9	27,6	13,9	7,2	13,9	3,9	7,4	0,43
Средневзвешенное содержание по рудному полю	0,49	0,64	0,46	0,51	0,59	0,27	0,48	0,2	0,46	0,47	0,63	0,25

мулам, по вспомогательным таблицам (типа табл. 37, 38) или по специально выведенным уточненным формулам. Последнее следует пояснить особо. Выведенные в гл. II формулы могут, видимо, несколько меняться при уточнении коэффициентов применительно к конкретным рудным районам. Предполагается, что общий вид формулы теоретического распределения запасов по классам содержаний полезных компонентов всегда имеет вид

$$P_K = \frac{100\%/K}{e^{\alpha(K-1)^n}} \quad (69)$$

Можно уточнять только коэффициенты  $\alpha$  и  $n$ , сохраняя порядок указанный в теоретических формулах гл. I. Их можно уточнять только в том случае, если теоретическое и фактическое распределения запасов относительно близко совпадают, т. е. если оцениваемая площадь в общем достаточно опоскована, что допустимо для старых или интенсивно изучаемых рудных районов. В этом случае можно допустить, что хотя бы две точки теоретической и фактической кривой будут совпадать и при этом ни

**Разложение добытых по определенным интервалам времени запасов полиме  
содержаний**

Среднее содержание в классе				
	до 1917 г.	1917—1925 гг.	1926—1930 гг.	1931--1935 гг.
0,25				
0,35				
0,45				
0,75				
1,25				
1,75				
2,25				4,039
2,75				3,170
3,25		0,647	0,871	2,608
3,75		0,541	0,727	2,180
4,25	0,266	0,467	0,628	1,862
4,75	0,235	0,412	0,554	1,659
5,25	0,202	0,355	0,478	1,432
5,75	0,179	0,314	0,422	1,264
6,25	0,164	0,288	0,388	1,162
6,75	0,140	0,262	0,352	1,055
7,25	0,137	0,241	0,324	0,971
7,75	0,125	0,219	0,295	0,883
8,25	0,115	0,202	0,271	0,813
8,75	0,106	0,187	0,251	0,753
9,25	0,098	0,173	0,238	0,697
9,75	0,093	0,163	0,219	0,655
10,25	0,085	0,150	0,202	
10,75	0,082	0,141	0,189	
11,25	0,076	0,133	0,178	
11,75	0,071	0,125	0,167	
12,5	0,064	0,113	0,152	
13,5	0,058	0,103	0,138	
14,5	0,053	0,093	0,125	
15,5	0,048	0,084	0,113	
16,5	0,044	0,077	0,104	
17,5	0,040	0,070	0,095	
18,5	0,037	0,065	0,056	
19,5	0,035	0,061		
20,5	0,032	0,057		
21,5	0,029	0,052		
22,5	0,027			
23,5	0,026			
24,5	0,024			
25,5	0,023			
26,5	0,022			
27,5	0,020			
28,5	0,019			
29,5	0,017			
<b>Всего</b>	<b>2,792</b>	<b>5,795</b>	<b>7,537</b>	<b>25,203</b>
<b>Среднее содержа- ние, %</b>	<b>9,74</b>	<b>7,69</b>	<b>7,18</b>	<b>4,73</b>

## таллических руд по формуле теоретического распределения запасов по классам

Добыча руды, усл. ед.

1936—1940 гг.	1941—1945 гг.	1946—1950 гг.	1951—1955 гг.	1956—1960 гг.	1961—1966 гг.
					99,012
				97,464	68,372
				74,259	52,093
		52,923	79,571	42,587	29,875
23,262	28,388	29,769	44,758	23,955	16,805
15,906	19,377	20,356	30,606	16,381	11,491
11,947	14,554	15,289	22,988	12,303	8,631
9,376	11,422	11,999	18,041	9,656	6,774
7,713	9,396	9,870	14,840	7,943	5,572
6,446	7,855	8,252	12,406	6,640	4,658
5,570	6,783	7,126	10,713	5,734	4,022
4,908		6,281		5,054	3,546
4,234				4,381	3,059
				3,854	2,701
				3,539	2,483
				3,214	2,255
					2,076
					1,887
					1,738
					1,609
					1,490
					1,400
89,362	97,775	161,865	233,924	316,964	331,549
2,56	2,27	1,87	1,75	1,26	1,18



одна точка фактической кривой по значению ординаты не будет больше соответствующей точки теоретической кривой. Такие совпадающие точки можно выбрать в средних частях кривых, где совпадение наиболее вероятно. Практически берутся две точки на оси абсцисс и по ним определяется  $K$ . Предположив, что в них теоретическая и фактическая кривые совпадают, мы тем самым имеем единственное для каждой точки значение  $P$ . Для получения уточненных коэффициентов достаточно решить относительно  $\alpha$  и  $n$  следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{1/K_1}{e^{\alpha(K_1-1)^n}}; \\ P_2 &= \frac{1/K_2}{e^{\alpha(K_2-1)^n}}. \end{aligned} \right\} \quad (70)$$

Такая система легко решается при помощи любого справочника по математике, где приведены значения функции  $y = e^x$ .

Если в результате уточнения коэффициентов кривая пройдет так, что хотя бы одна точка фактического распределения окажется выше ее, то коэффициенты следует вновь уточнить, взяв в качестве совпадающих какие-либо иные точки фактического распределения запасов по классам содержаний. Пример для оловорудного поля приведен в табл. 41. Здесь дано распределе-

Таблица 41

Распределение запасов по классам содержаний для оловорудного поля

Запасы, усл. ед.			Содержания, усл. ед.		Произведение запасов на содержание
Фактические	Приведенные	Теоретические	Фактические	Приведенные	
775,0	193,8	3400	450	0,4	
283,2	70,8	210	1540	0,6	
269,6	67,4	67,4	2400	1,0	67,4
41,0	10,2	18,8	3750	1,6	17,3
52,8	13,2	14,4	4570	1,9	25,1
30,6	7,6	8,6	5670	2,4	18,2
13,4	3,8	6,8	6400	2,7	9,9
17,6	4,4	4,4	8000	3,3	14,5
4,0	1,0	2,3	9600	4,0	4,0

ние условных запасов по классам содержаний олова. При преобразовании минимальные запасы приравнялись к единице и остальные выражались через них. То же было проделано и со средним содержанием для каждого класса, только в качестве минимального принималось содержание, соответствующее до-

стоверно установленным запасам. Приведенные запасы и содержания являются исходными для построения фактического распределения запасов по классам содержаний и вычисления коэффициентов в уравнении теоретического распределения запасов. Близость фактического распределения запасов теоретическому проверяется по произведению запасов на содержания по классам. Постоянное уменьшение этого произведения свидетельствует о распределении, близком к теоретическому.

В рассматриваемом примере уточненные коэффициенты рассчитывались путем приравнивания теоретического и фактического распределений в точках:

$$13,2 = \frac{67,4/1,9}{e^{\alpha(1,9-1)^n}} ; 4,4 = \frac{67,4/3,3}{e^{\alpha(3,3-1)^n}} .$$

В результате решения системы уравнений определены коэффициенты и уточненное теоретическое уравнение:

$$P_K = \frac{67,4/K}{e^{0,9(K-1)0,5}} . \quad (71)$$

Теоретическая кривая достаточно близко характеризует фактическое распределение запасов. Это одновременно свидетельствует о правильности выбора коэффициентов в теоретической формуле и о возможности оценки перспективности рудного поля с точки зрения минимально обязательного нахождения в нем еще не выявленных запасов.

Рассматриваемая методика оценки направлена на предсказание минимальных не выявленных запасов. Вероятность этой возможности определяется степенью изученности оцениваемой территории. Нужно помнить, что оценка ведется не глубже изученного горными выработками и скважинами горизонтов. Сама оценка заключается в вычислении разности значений ординат теоретической и фактической кривых при абсциссе, соответствующей каждому классу содержаний.

Эта разность на графиках выделяется наиболее ярко, например цветом или штриховкой. Окончательный результат оценки составляется в следующем виде.

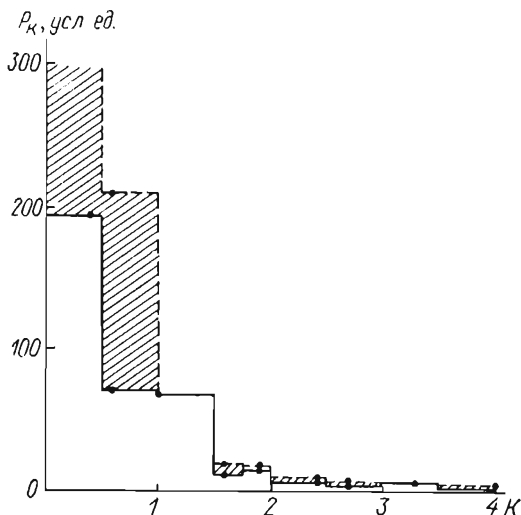
**Оценка изучаемой территории с точки зрения выявления новых запасов руды**

Средневзвешенное содержание, % (усл. ед)	Невыявленные запасы, усл. ед.	Произведение содержания на запасы
3,2	124,1	397,1
10,1	7,1	71,7
Σ	1485,7	10385,1

**Оценка изучаемой территории с точки зрения невыявленных запасов руды при разных бортовых содержаниях полезного компонента**

Бортовое содержание, усл. ед.	Невыявленные запасы, усл. ед.	Средневзвешенное содержание, усл. ед.
1 (ныне принятое)	1324,7	4,8
0,75	23437,1	1,9
0,50	574428,4	0,7

Заключительные графики (рис. 34, 35) и выводы могут явиться удобным и полезным материалом в объяснительных записках к металлогеническим картам, в долгосрочном и опера-



**Рис. 34. Оценка оловорудного поля.**

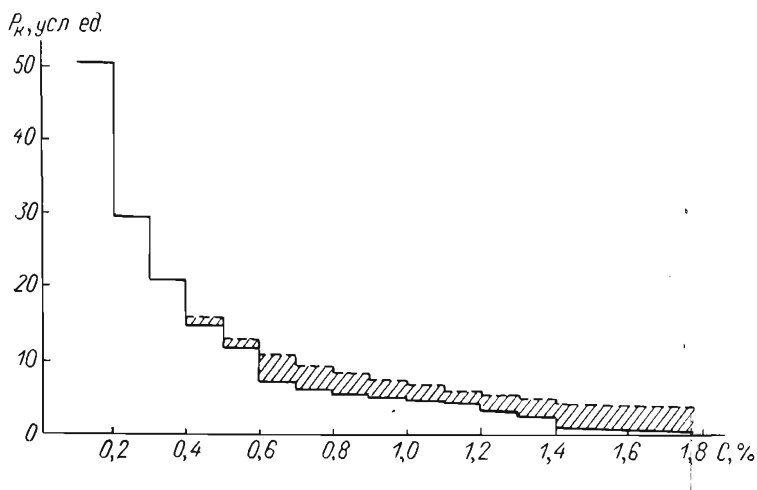
Рассчитано по отдельным выработкам. Усл. обозначения см. на рис. 33.

тивном планировании прироста запасов по крупным организационным подразделениям, проектах на мелко- и среднемасштабные поиски и разведку в пределах рудных полей, в отчетах о результатах поисковых и поисково-оценочных работ. В качестве конкретных примеров оценки рассмотрим 2 рудных региона. Первый из них — район с развитием полиметаллических месторождений.

В геологическом отношении рассматриваемая территория представляет собой область преимущественного развития герцинских складчатых сооружений северо-западного простирания. Они ограничены с северо-востока и юго-запада глубинными разломами, вдоль которых сформировались зоны смятия. В строении вышеуказанных сооружений принимают участие метаморфические образования ордовика, на которых с угловым и стратиграфическим несогласием залегают вулканогенно-осадоч-

ные отложения девонского возраста, являющиеся основными рудовмещающими толщами района (особенно среднедевонские). Завершают разрез вулканогенно-осадочные и осадочные отложения каменноугольного возраста. Вулканогенно-осадочные образования прорваны широко развитыми здесь интрузивами основного, среднего и кислого состава нескольких разновозрастных интрузивных комплексов.

В районе широко развиты разрывные нарушения различного направления и возраста, к узлам пересечений которых часто



**Рис. 35. Оценка оловорудного района.**

Рассчитано по методу разложения запасов.  
Усл. обозначения см. на рис. 33

приурочены рудные узлы. Региональные нарушения сопровождаются разломами более мелких порядков, формирующих структуры рудных полей и месторождений.

В пределах рассматриваемой территории размещается большое количество эндогенных месторождений и рудопроявлений полиметаллов, меди, железа и др. По площади они распределены неравномерно — сконцентрированы в рудные узлы, где плотность их возрастает в десятки раз.

Для оценки еще не выявленных запасов руд проводились расчеты для всей территории в целом и отдельных ее районов (рудных узлов).

История развития горного промысла рассматриваемой территории насчитывает два столетия, поэтому получение сведений о запасах руд по отдельным блокам месторождений или даже по некоторым месторождениям в целом с начала добычных работ представляет собой трудоемкую задачу. В связи с этим для оценочных работ были использованы материалы по запасам

и добыче руд в основном начиная с 20-х годов настоящего столетия, которые группировались по интервалам времени в 5 лет. Для расчета фактического распределения запасов применен метод разложения суммарных запасов руд по классам содержания согласно теоретическим закономерностям и приемам. Пример такого разложения приведен в табл. 40 (содержания запасов даны в условных единицах). По сгруппированным данным строится гистограмма распределения фактически выявленных при разведке и эксплуатации запасов по классам содержаний.

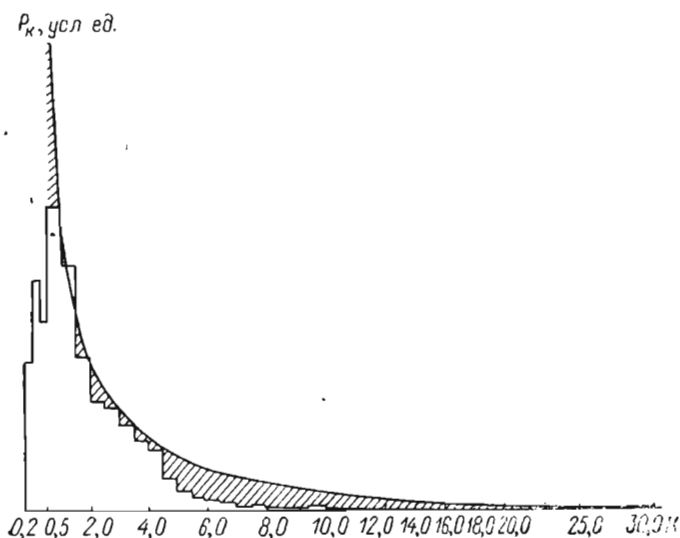


Рис. 36. Оценка рудного региона с полиметаллической минерализацией.

Расчитано по методу разложения запасов (по данным Н. П. Иванова).  
Усл. обозначения см. на рис. 33.

При этом по оси абсцисс наносятся классы содержаний, а по оси ординат — запасы, соответствующие этому классу содержаний.

Теоретические запасы рассчитывались по формуле, согласно приведенным закономерностям в гл. I, которая после определения коэффициентов  $\alpha$  и  $n$  имеет вид

$$P_k = \frac{821\,000\,000/K}{e^{0,07(K-1)^{0,52}}}. \quad (72)$$

Теоретическое распределение запасов, отвечающее этой формуле, рассчитывается и сводится в таблицы. По этим данным на гистограмме фактического распределения строится теоретическая кривая так, чтобы одна из точек ее для какого-либо класса содержаний совпала с точкой фактического распределе-

ния, а все остальные точки последнего располагались ниже теоретической кривой.

Рассчитанные и построенные теоретические кривые и гistogramмы фактического распределения запасов по классам содержания условного свинца для рассматриваемой территории в целом приведены на рис. 36. Как видно из рис. 36, совмещение теоретической кривой и фактического распределения запасов приведено по правилам, изложенным выше. Штриховкой показаны перспективные запасы. В процентах от всех добытых и учтенных запасов с содержанием выше 0,5 усл. ед. они составля-

Таблица 42

Оценка перспективных запасов по классам содержаний для первого рудного района

Классы содержаний, усл. ед.	Относительные запасы, %
0,5—2	9
2—4	4
4—6	5
6—8	6
8—10	5
10—12	3
Больше 12	2
Всего (больше 0,5)	34

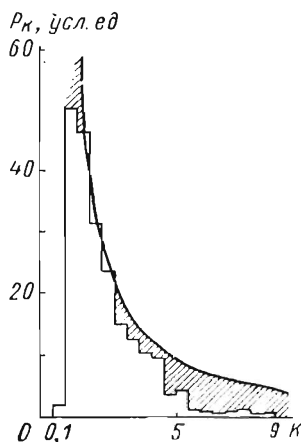


Рис. 37. Оценка металлогенической зоны рудного региона с полиметаллической минерализацией (по данным Н. П. Иванова).

Усл. обозначения см. на рис. 33.

ют 34%. Распределение их по классам содержания приведено в табл. 42.

Следует иметь в виду, что значительный объем запасов руды, оцененный как перспективный для высоких содержаний условного свинца в руде (выше 6 и особенно выше 10 усл. ед.), объясняется тем, что при расчетах не учтена добыча дореволюционных лет, когда добывались только богатые руды. Поэтому прогнозы в этих классах содержаний следует считать завышенными и общий объем перспективных запасов правильнее оценивать около 20% от уже добытых.

Подобным же способом рассчитано распределение запасов по классам содержаний условного свинца для отдельных металлогенических зон этого региона. Рассмотрены три зоны. Теоретическая кривая и фактическое распределение запасов приведены на рис. 37. Теоретическое и фактическое распределение со-

поставлялось по запасам со средним содержанием 1 усл. ед. Как и в распределении для всего региона в целом, ординаты всех точек теоретического распределения были по значению больше, чем для тех же точек фактического распределения. Заштрихованы перспективные запасы, их количество в каждой металлогенической зоне приведено в табл. 43.

Таблица 43

**Оценка перспектив запасов по отдельным металлогеническим зонам полиметаллического рудного региона**

Металлогеническая зона	Классы содержаний, усл. ед.	Относительные не выявленные запасы, %
1	0,5—5	10
	Больше 5	22
	Всего (больше 0,5)	32
2	0,5—5	15
	Больше 5	20
	Всего (больше 0,5)	35
3	0,5—5	20
	Больше 5	7
	Всего (больше 0,5)	27

Общие не выявленные запасы примерно одинаковы для зон 1 и 2 и несколько меньше для 3. К таким общим оценкам следует подходить осторожно, так как не учтены запасы с высокими содержаниями. Если считать, что большая часть запасов с содержаниями больше 5 усл. ед., оцененных как не выявленные, относится к уже добытым, то зона должна представляться наименее перспективной, а наиболее интересной следует признать зону 3.

Приведенный пример иллюстрировал оценку крупного рудного региона и отдельных его частей, выделяющихся по геологическому строению, что позволяет говорить об общих перспективах дальнейшего изучения региона и о распределении усилий на поиски в отдельных рудных районах. Этот пример показывает значительные трудности при оценке старых горнорудных районов, во-первых, из-за необходимости прибегать к несколько формальному приему разложения запасов и, во-вторых, из-за невозможности учесть материалы добычи и разведки дореволюционных лет. Но и при этих недостатках оценка таких районов представляет несомненный интерес.

В качестве второго примера описан менее крупный и более молодой оловорудный район. Он расположен на стыке палеозойских толщ антиклинория с юрскими терригенными отложениями, перекрытыми осадочно-вулканогенными образованиями

мелового возраста. Эти образования сочленяются по системе пересекающихся региональных разломов, которые являются определяющими в расположении интрузивов, вулканогенных пород, а также связанного с ними оруденения.

Современная структура района обусловлена позднемеловой тектоно-магматической активизацией, район расчленен разломами на ряд крупных блоков. Особенностью оруденения этого района является наличие выдержанных тектонических зон, обычно вытянутых в меридиональном направлении. Все рудные объекты этого района характеризуются сходными геологическими условиями и близким типом оруденения. Месторождения разведывались также по единой методике, включающей проходку канав, штолен с полным пересечением рудных зон расщелками и бурение скважин. Результаты анализов бороздовых и керновых проб не только на олово, но и на спутники его доступны и легко могут быть использованы при оценке. При этом была сделана попытка не только охарактеризовать количественно перспективные запасы в рассматриваемом районе, но и дать некоторые предположения о пространственном их размещении. Для этого использовались закономерности распределения элементов-спутников олова. Обоснованием этому служило следующее.

1. Источник оруденения главного полезного компонента и его спутников один и запасы каждого элемента-спутника косвенно характеризуют и запасы олова, так как рассматриваются проявления однотипной минерализации.

2. Запасы элементов-спутников должны распределяться по классам их содержаний согласно общим закономерностям, т. е. можно по приведенной методике оценить невыявленные запасы каждого спутника.

3. В пространственном распространении элементов-спутников для отдельных рудных районов часто устанавливаются вполне определенные закономерности (региональная зональность). Зная такую закономерность, можно указывать, в какой части территории ожидаются определенные элементы-спутники.

4. Можно определить территорию, перспективную для поисков, зная геохимический парагенезис элементов и запасы элементов, выявленные в наименьшей степени.

5. Учитывая связь элементов-спутников с главным полезным компонентом и промышленную значимость каждого парагенезиса, можно оценить относительную перспективность отдельных частей территории на главный компонент. В наиболее благоприятном случае это означает возможность предсказать, в какой части территории с наибольшей вероятностью ожидаются те запасы руд, которые по общей оценке района определены как невыявленные. Методика оценки изучаемой территории должна включать следующие операции.



1. Оценку невыявленных запасов главного полезного компонента:

а) составление фактического распределения запасов по классам содержаний по сумме отдельных разведочных выработок;

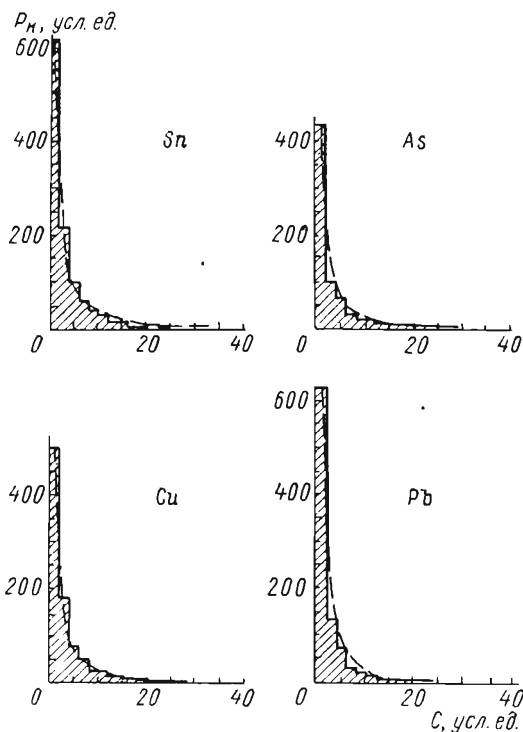


Рис. 38. Оценка оловорудного региона.

Усл. обозначения см. на рис. 33.

б) уточнение уравнения теоретического распределения по описанной выше методике;

в) определение невыявленных запасов по классам содержаний и общих запасов при разном бортовом содержании.

2. Оценку невыявленных запасов каждого элемента-спутника:

а) составление фактического распределения по классам содержаний для каждого элемента-спутника;

б) вычисление теоретического уравнения распределения запасов;

в) вычисление общего количества невыявленных запасов по каждому элементу.

3. Определение закономерностей пространственного распределения на объектах рудного района:

а) вычисление средней геохимической характеристики каждого рудного объекта;

б) нанесение вычисленных характеристик на схему района;

в) выделение частей территории, характеризующихся обогащением тем или иным спутником.

4. Выделение на схеме участков, перспективных для выявления запасов элемента-спутника.

В описываемом примере по обычной методике были построены фактические распределения запасов руды по классам содержаний олова, мышьяка, меди и свинца (рис. 38). Эти элементы выбраны потому, что они являются обычными элементами-спутниками олова и разные объекты обогащены каким-либо одним элементом. Для геохимической характеристики объектов строились лучевые диаграммы. Для этого рассчитывались средние содержания элементов-спутников по каждому объекту. Содержания выражались относительно фонового, чтобы избежать подавляющего влияния малораспространенных элементов. Полученные величины наносились на схему пространственного расположения объектов по определенному для каждого элемента лучам, причем для большей наглядности — пропорционально запасам руды в каждом объекте (рис. 39). В результате отчетливо установлено, что в центральной части района, где выделяется пояс развития малых интрузий, объекты обогащены мышьяком, промышленная значимость таких объектов относительно невелика. Дальше выделяется полоса, где участки сильно обогащены медью, по промышлен-

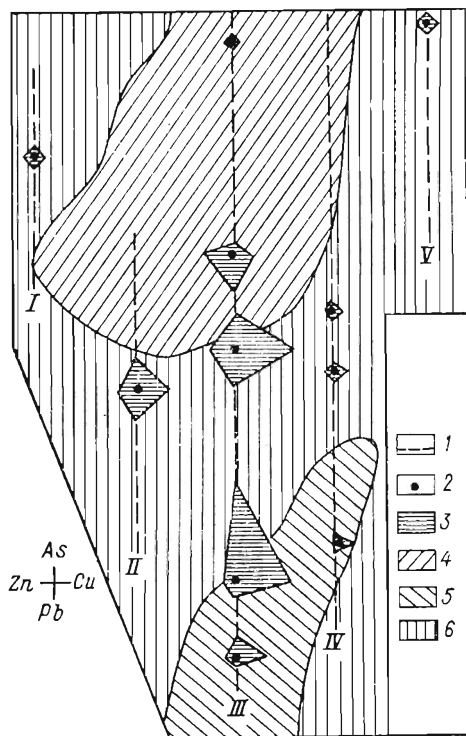


Рис. 39. Схема геохимической зональности оловорудного района.

1 — оловонесные структуры и их номера; 2 — месторождения и рудопроявления; 3 — геохимическая характеристика объекта; 4 — площади развития минерализации; 5 — олово-медно-мышьяковой, 6 — олово-медной полиметаллической.

ность таких объектов относительно невелика. Дальше выделяется полоса, где участки сильно обогащены медью, по промышлен-

ной значимости это очень важный тип месторождений. На наибольшем удалении, особенно в северной части района, в рудах преобладает свинец и цинк.

Распределения запасов рассчитаны по данным опробования отдельных горных выработок. Теоретические уравнения определены путем решения системы уравнений. Они имели вид:

$$\left. \begin{aligned} \text{для олова} \quad P_K &= \frac{615/K}{e^{0,05(K-1)}}, \\ \text{для мышьяка} \quad P_K &= \frac{438/K}{e^{0,06(K-1)}}, \\ \text{для меди} \quad P_K &= \frac{495/K}{e^{0,06(K-1)}}, \\ \text{для свинца} \quad P_K &= \frac{438/K}{e^{0,1(K-1)}}. \end{aligned} \right\} \quad (73)$$

Оценка запасов по классам содержаний олова показана в табл. 44.

Таблица 44

Невыявленные запасы олова по классам его содержаний, усл. ед.

Классы содержаний, усл. ед.	Рассчитанные по выработкам	Рассчитанные путем разложения
0,2—0,4	0	0
0,4—0,8	3	4
0,8—1,2	6	5
1,2—1,6	3	4
1,6—2,0	4	5
Суммарные	16	18

Как видно из табл. 44 на глубинах разведки можно ожидать выявления еще 15—20% от известных запасов, распределенных равномерно по всем классам содержаний. Для контроля было построено распределение запасов олова по классам содержаний методом разложения запасов, подсчитанных отдельно по каждому рудному полю. Фактическое распределение запасов олова в этом последнем случае дано на рис. 40. Близость результатов показывает правильность оценки каждым из этих способов. Правильность оценки методом разложения запасов подчеркивает возможность применения теоретической формулы при оценке отдельных рудных полей.

После расчета теоретических уравнений для распределения запасов по классам содержаний мышьяка, меди и свинца рас-

считаны суммарные невыявленные запасы руды для повышенных содержаний этих элементов. Они оказались для мышьяка 11, для меди 4, для свинца 13%. Естественно, что невыявленные запасы руды по каждому элементу-спутнику меньше, чем по олову, поскольку олово встречается совместно с каждым из спутников. Суммарных запасов по спутникам больше, чем по олову, поскольку все спутники встречаются совместно и можно говорить только о преобладании того или иного элемента. Наиболее перспективным для выявления новых запасов представляется тот тип месторождений, где совместно с оловом преобладают галенит и сфалерит.

Приведенные цифры свидетельствуют о перспективности обнаружения новых запасов руд, где олово присутствует совместно с мышьяком, т. е. в центральной части района. Однако эти запасы присутствуют в непромышленных или мелких по масштабу объектах, поскольку олово-мышьяковых промышленных рудных тел в районе не отмечено, несмотря на высокую степень изученности, а важный промышленный тип, где олову сопутствуют медь и мышьяк вместе, по проделанной оценке разведан наиболее полно (невыявленные запасы по меди минимальные).

Этот пример показывает, что наиболее надежна термодинамическая оценка районов с равномерной степенью разведки месторождений. При этом, используя описываемую методику оценки в комплексе с иными (например, геохимическими) данными, можно не только говорить о количестве невыявленных запасов, но и выделять перспективные участки.

Подобные же расчеты, проведенные для одного рудного поля (район с оловорудной минерализацией), позволяют не только оценить невыявленное оруденение, но и определить его тип и глубину эрозионного среза. Для решения этих задач рассматривалось распределение по классам содержаний запасов олова, свинца и меди. Последние два элемента были выбраны

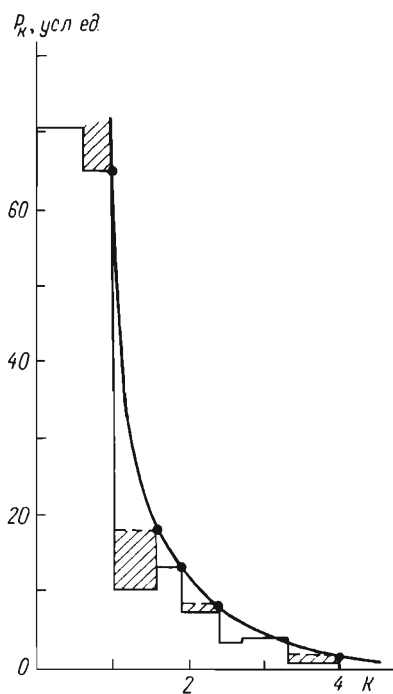


Рис. 40. Оценка оловорудного района.  
Усл. обозначения см. на рис. 33.

как характеризующие разный тип проявлений олова и разную глубину эрозионного среза. Для рассматриваемого рудного поля характерно двухъярусное геологическое строение. Нижнюю часть разреза слагают осадочные отложения юрского возраста, верхнюю — средние эффузивы мелового возраста. Для месторождений района характерна приуроченность олово-медной минерализации к юрским породам и олово-полиметаллической — к меловым эффузивам. Невыявленные запасы оценивались по отдельным выработкам с учетом площади их влияния. После расчетов было установлено, что обнаруженные запасы составляют менее 1/3 запасов олова. При этом не выявлены богатые, бедные и главным образом средние руды (табл. 45). Распределение запасов руды по классам содержания меди и свинца свидетельствует, что в невыявленных рудах олову должен сопутствовать свинец, т. е. оруденение сосредоточено в верхнем структурном этаже (табл. 46). Из перспективных руд по классам со-

Таблица 45

Невыявленные запасы для оловорудного поля

Классы руд	Олово		Медь		Свинец	
	усл. ед.	%	усл. ед.	%	усл. ед.	%
Бедные	19	190	10	58	24	340
Средние	7	700	3	75	5	125
Богатые	2	200	0	0	1	25
Суммарные	28	215	13	36	30	214

Оценка потенциальной

Интервал содержания, усл. ед.	Олово					Интервал содержания, усл. ед.	Фактические запасы, усл. ед.
	Фактические запасы, усл. ед.	Среднезвешенное содержание	Приведенное содержание	Приведенные запасы	Теоретические запасы		
1—14,5	2323	4	1	22	107	0—40	2377
14,6—29	657	24	6	6	16	41—80	525
29,1—43,5	148	40	9	1	8	81—120	482
43,6—58	336	52	12	3	5	121—160	99
58,1—72,5			15		4	161—200	109
72,6—87,0	39	84	20		2	201—240	42
87,1—101,5	142	89	21	1	2	241—280	87
101,6—116,0	132	109	25	1	2	281—320	48
116,1—130,5			29		1	321—360	46
130,6—145	105	138	32	1	1	361—400	70

держаний свинца должны преобладать бедные руды, что с учетом данных о зональности оруденения свидетельствует о среднем эрозионном срезе рудных тел, причем следует ожидать не слепое, а вскрытое в значительной степени оруденение в меловых эффузивных породах.

Рассмотренный пример, как и предыдущий, показывает перспективность оценки не только по главному полезному компоненту, но и по его элементам-спутникам. Такая оценка позволяет делать заключение о возможном типе невыявленного оруденения и его пространственном положении. В качестве примера оценки потенциальной рудоносности рудных полей сложного геологического строения рассматриваются два рудных поля на Северо-Востоке СССР.

В геологическом строении первого рудного поля, представленного оруденением жильного типа, принимает участие толща терригенных пород раннемелового возраста, разделенного по преобладанию песчаников и сланцев на 5 толщ. Эти толщи сложены в крупную пологую антиклиналь субмеридионального направления, в ядерную часть которой внедрились массивы гранитоидов. В приконтактной части массивов терригенные породы ороговикованы, причем от контакта степень метаморфизма постепенно убывает и роговики сменяются узловатыми, а те в свою очередь пятнистыми сланцами. Интрузивные породы представлены гранодиоритами и гранитами, образующими 3 массива, разделенные на современном эрозионном срезе полосами роговиков. Эти массивы, вероятно, представляют собой единую интрузию и сливаются на глубине.

В восточном направлении интрузия сначала полого, а потом под более крутым углом погружается под вмещающие ее терри-

Таблица 46

рудоносности оловорудного поля

Медь				Свинец					
Среднезвешенное содержание	Приведенное содержание	Приведенные запасы	Теоретические запасы	Интервал содержания, усл. ед.	Фактические запасы, усл. ед.	Среднезвешенное содержание	Приведенное содержание	Приведенные запасы	Теоретические запасы
9	1	36	107	1—27	2669	9	1	24	107
52	6	8	16	28—65	528	54	6	5	13
95	11	7	7	56—83	51	68	8	1	11
145	16	2	4	84—111	66	87	10	1	7
172	19	2	3	112—139	177	134	15	2	4
232	25	1	2	140—167	123	163	19	1	3
259	28	1	1	168—195	109	176	20	1	2
289	31	1	1	196—223	63	212	24	1	2
324	35	1	1	224—251	80	242	28	1	1
380	41	1	1	252—279	113	266	31	1	1

генные образования, которые перекрыты наносами мощностью десятки метров.

Жильные фации интрузии представлены дайками гранодиорит-порфиров, развитыми преимущественно в эндоконтактах; штоками и дайками лейкократовых мелкозернистых гранитов и гранит-порфиров, дайками аплитов и лампрофиров. Завершается формирование интрузии образованием кварцевых жил и прожилков. В послейнтрузивный этап сформировались хлорит-кварцевые, турмалино-кварцевые, турмалино-хлорит-кварцевые и другие гидротермальные жилы с частичным оруденением.

Большую роль в формировании структуры района играет тектоника. Здесь отмечаются разломы различных направлений: меридионального, северо-западного, северо-восточного и широтного. В формировании оруденения основную роль играли разломы меридионального направления. Устанавливается, что главная масса жил приурочена к сопровождающим их трещинам. Локализуются рудные жилы преимущественно в зоне эндоконтакта массива и более редко во вмещающих породах. Последние концентрируются более часто к западу от массива. Падение их обычно также к западу, т. е. в сторону от интрузива, в то время как жилы, расположенные в гранитах, имеют чаще восточное падение. Жилы западной части имеют более сложную морфологию; относительно небольшая оловоносность их резко уменьшается с глубиной. Жилы восточной части месторождения имеют большую протяженность по простиранию и падению и характеризуются постоянством содержания олова.

Жилы образовались в основном метасоматическим путем, реже путем заполнения открытых трещин. Околожильные изменения выразились в окварцевании и серицитизации, а также безритунизации в контактах кварц-турмалиновых жил с касситеритом и сульфидами, хлоритизации вдоль кварц-сульфидных жил с пиритом, галенитом и сфалеритом. На месторождении развиты жилы простые и сложные. Простые жилы обычно имеют длину от 50 до 500 реже 700 м, прослеживаются по падению до 250—300 м при мощности 1,0 м. Сложные жилы состоят из основной, которая сопровождается целой серией сопутствующих ей параллельных прожилков с богатой и разнообразной минерализацией. Мощность их меняется от 2 до 10 м. Кроме рассмотренных жил на месторождении изредка отмечаются минерализованные зоны и линейные штокверки.

Для количественной оценки не выявленных горноразведочными и эксплуатационными работами запасов олова на этом типе месторождений собранный материал по запасам (в условных единицах) и содержаниям был сгруппирован в порядке возрастания содержания олова в интервале от 0,1 до 3%. Каждый класс содержаний охватывал 0,1% (табл. 47), по сгруппированным данным построена гистограмма распределения запасов руды в зависимости от содержания олова в них (рис. 41).

Зависимость запасов руд от содержания в них олова

Интервал содержаний, %	Запасы, усл. ед.		Интервал содержаний, %	Запасы, усл. ед.	
	фактические	теоретические		фактические	теоретические
0,1—0,2	15,746	15,746	1,8—1,9	0,349	0,492
0,2—0,3	4,163	4,518	1,9—2,0	0,328	0,467
0,3—0,4	2,864	3,378	2,0—2,1	0,313	0,435
0,4—0,5	2,174	2,512	2,1—2,2	0,309	0,401
0,5—0,6	1,686	1,988	2,2—2,3	0,208	0,395
0,6—0,7	1,367	1,680	2,3—2,4	0,185	0,286
0,7—0,8	1,066	1,431	2,4—2,5	0,158	0,271
0,8—0,9	1,029	1,241	2,5—2,6	0,136	0,247
0,9—1,0	0,866	1,111	2,6—2,7	0,129	0,235
1,0—1,1	0,777	0,991	2,7—2,8	0,086	0,226
1,1—1,2	0,732	0,892	2,8—2,9	0,077	0,216
1,2—1,3	0,658	0,825	2,9—3,0	0,067	0,206
1,3—1,4	0,552	0,754	3,0—3,1	0,058	0,197
1,4—1,5	0,502	0,692			
1,5—1,6	0,571	0,651			
1,6—1,7	0,542	0,548	Σ	38,071	43,544
1,7—1,8	0,373	0,512			

Для расчетов кривой использовалась теоретическая формула, которая после расчетов коэффициентов имеет вид

$$P_K = \frac{15,746/K}{e^{0,76(K-1)^{0,09}}} \quad (74)$$

По этой формуле рассчитана и построена теоретическая кривая (рис. 41), одна из точек совпала с точкой на гистограмме фактического распределения (0,15%), а все остальные легли выше.

Анализируя приведенные расчеты, устанавливаем, что не выявлено около 5,673 усл. ед. запасов руды или 15% от фактически разведанных. Сравнивая фактические и теоретические запасы по классам содержаний, определяем, что наибольшее количество невыявленных запасов руды лежит в пределах содержаний в них олова от 0,1 до 1,0%. При более высоких содержаниях олова запасы резко падают.

Второе рудное поле охватывает ряд месторождений штокверкового типа. В геологическом строении его участвует однообразная песчано-сланцевая толща позднетриасового возраста, разделенная по составу на 3 части. Эти толщи смяты в изоклинальные складки северо-западного простирания и метаморфизованы под действием невскрытых интрузий. На поверхности интрузивные породы отмечаются лишь дайками лампрофиров, которые довольно широко распространены, и кварцевыми жила-



ми. Породы, слагающие рудное поле, рассечены многочисленными трещинами меридионального простирания. На участках измененных пород эти трещины послужили рудовмещающими структурами.

Рудные тела месторождений обычно представлены интенсивно трещиноватыми, брекчированными, окварцованными и минерализованными песчано-глинистыми сланцами, пронизанными густой сетью тонких рудных прожилков меридионального и

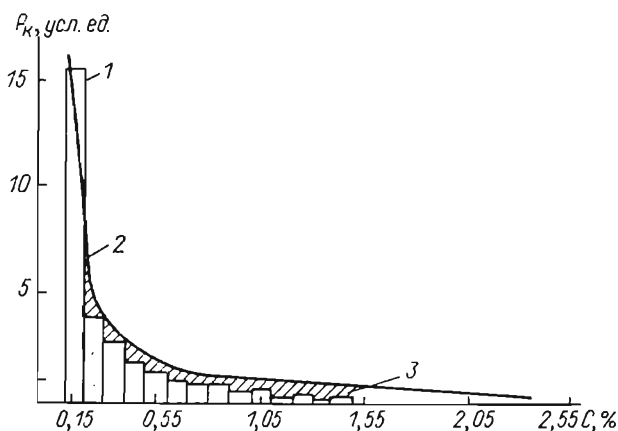


Рис. 41. График распределения запасов руды в зависимости от содержания  $C$  в них олова.

1 — гистограмма фактического распределения; 2 — кривая теоретического распределения; 3 — перспективные запасы руды.

субмеридионального простирания. Реже встречаются орудененные кварцевые жилы и минерализованные зоны дробления.

Изменения вмещающих пород заключались в окварцевании, турмалинизации, обогащении сульфидами (пирротином и пиритом), а также хлоритизации и биотизации. Интересно отметить, что максимальное количество пирротина концентрируется в участках, наиболее обогащенных рудными прожилками кварц-касситерит-сульфидного состава. За пределами промышленных контуров штокерка пирротин встречается в очень небольших количествах, а часто и вовсе отсутствует. По минералогическому составу и количественным соотношениям главных минералов руды делятся на два типа:

- а) касситерито-кварцевые с сульфидами,
- б) касситерито-кварцевые.

На месторождениях развита зона окисления, достигающая глубины 30 м. Для штокеркового типа месторождений запасы

рассчитывались в интервале содержания олова от 0,1 до 1,7%. Классы содержания для группировки брались 0,1% (табл. 48).

Таблица 43

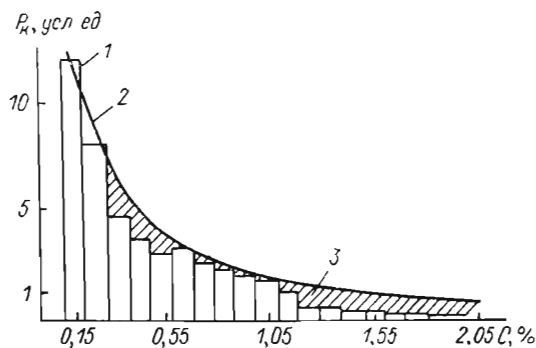
Зависимость запасов руд от содержания в них олова (штокверки)

Интервал содержания, %	Запасы руд, усл. ед.		Интервал содержания, %	Запасы руд, усл. ед.	
	фактические (после разложения)	теоретические (вычисленные)		фактические (после разложения)	теоретические (вычисленные)
0,1—0,2	11,81	11,81	1,1—1,2	1,21	1,82
0,2—0,3	8,74	8,91	1,2—1,3	1,14	1,68
0,3—0,4	4,76	6,44	1,3—1,4	1,103	1,525
0,4—0,5	3,80	4,80	1,4—1,5	0,065	1,407
0,5—0,6	3,30	3,87	1,5—1,6	0,051	1,201
0,6—0,7	3,31	3,31	1,6—1,7	0,047	1,112
0,7—0,8	2,78	2,84			
0,8—0,9	2,32	2,49			
0,9—1,0	2,14	2,26			
1,0—1,1	2,05	2,05			
			Σ	48,621	57,523

В связи с тем что для данного типа месторождения основные промышленные категории руд имеют средние содержания олова, лежащие в пределах 0,3—0,5% (для разных месторождений), здесь был применен прием теоретического разложения

Рис. 42. График распределения запасов руды по классам содержания в них олова.

1 — гистограмма фактического распределения (после разложения по классам); 2 — кривая теоретического распределения; 3 — перспективные запасы руд.



фактических запасов по выбранным классам содержаний. Эта операция проведена так, чтобы с использованием теоретических формул и приемов средневзвешенные и суммарные запасы (теоретические) были равны фактическим или близки к ним.

Теоретическая кривая рассчитана по формуле и нанесена на гистограмму фактического распределения. Анализируя рис. 42, приходим к выводу, что для месторождений штоквер-

кового типа запасы руд — 10,781 усл. ед. Это составляет 23% от фактически подсчитанных после геологоразведочных работ. Из них значительная доля, до 20%, лежит в пределах промышленных категорий. Приведенные примеры показывают, что оценить потенциальную рудоносность территории по изложенной методике просто и, безусловно, целесообразно на всех стадиях поисков и разведки в комплексе с иными поисковыми методами. Результаты оценки этих территорий необходимо учитывать при проектировании дальнейших работ.

#### **§ 15. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРАКТИКЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ**

Практическое применение результативных формул, основанных на закономерностях трещинообразования, по целому ряду причин имело весьма ограниченное распространение, авторы использовали лишь минимум из опыта Забайкалья, Приморья и Чукотки. Одновременно привлечена обобщающая статья по крайнему Северо-Востоку. Общая результативность геологопоисковых работ повышается, если кроме энергии рудообразования используются в качестве критерия перспективной рудоносности и закономерности трещинообразования.

Материалы по Забайкалью собрал, обработал и обобщил Д. Н. Сафронов. Именно он рассмотрел соответствие практических данных выведенным теоретическим зависимостям. В качестве геологического объекта выбран полиметаллический пояс Восточного Забайкалья и на месторождениях его проведена экспериментальная проверка.

Восточное Забайкалье является старейшим горнорудным районом страны. В пределах полиметаллического пояса этого района, имеющего площадь около 35 тыс. км<sup>2</sup>, известно свыше 500 рудопроявлений и месторождений. Все полиметаллические месторождения района в первом приближении можно рассматривать как однотипные гидротермальные образования. Они объединяются единством генезиса, четкой связью с определенной тектоникой и юрским интрузивным комплексом, практической одновременностью образования (поздняя юра), единым минералогическим составом руд и однородными (в первом приближении) условиями локализации во вмещающих породах района — в карбонатных и песчано-сланцевых толщах и эффузивах. Абсолютное большинство рудных тел характеризуется плоской трещинной формой, согласной с рудоконтролирующими тектоническими структурами.

Д. Н. Сафронов в качестве исходных взял три формулы (60), (62), (63), соавтором выводов которых он же и являлся, и дал их интегральное выражение:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sum_{l_n}^{l_{n+1}} N}{\sum_{l_{\min}}^{l_{\max}} N} &= \frac{l/l_n - l/l_{n+1}}{l/l_{\min} - l/l_{\max}}; \\ \frac{\sum_{l_n}^{l_{n+1}} P}{\sum_{l_{\min}}^{l_{\max}} P} &= \frac{l^2_{n+1} - l^2_n}{l^2_{\max} - l^2_{\min}}; \\ \frac{\sum_{l_n}^{l_{n+1}} P}{\sum_{l_{\min}}^{l_{\max}} P} &= \frac{l^3_{n+1} - l^3_n}{l^3_{\max} - l^3_{\min}}, \end{aligned} \right\} \quad (75)$$

где  $\sum_{l_n}^{l_{n+1}} N$  — количество рудных тел в классе линейных размеров от  $l_n$  до  $l_{n+1}$ , причем  $l_{n+1} > l_n$ ;  $\sum_{l_n}^{l_{n+1}} P$  — суммарные запасы руды в этих рудных телах;  $\sum_{l_{\min}}^{l_{\max}} N$  — общее количество рудных тел во всей совокупности размеров от  $l_{\min}$  до  $l_{\max}$ ;  $\sum_{l_{\min}}^{l_{\max}} P$  — суммарные запасы руды в этих пределах.

Геологическая информация по месторождениям дает достаточно точный запас руд и металлов и приближенные цифры по средним линейным размерам рудных объектов. Располагая данными о запасах руды  $P$  в рудных телах подобной формы, можно вычислить их условные средние линейные размеры:

$$\left. \begin{aligned} l_{\text{усл}} &= \sqrt[3]{P} = \beta_1 l; \\ l_{\text{усл}} &= \sqrt[4]{P} = \beta_2 l, \end{aligned} \right\} \quad (76)$$

где  $l_{\text{усл}}$  — условный средний размер залежей для линейной и квадратичной мощности;  $\beta_1, \beta_2$  — постоянные коэффициенты.

При использовании  $l_{\text{усл}}$  в формулах (75) константы в относительном выражении исчезают.

Таким образом, Д. Н. Сафронов выдвинул гипотезу: вероятными формулами, аппроксимирующими распределения числа рудных тел различного масштаба в полиметаллическом поясе Восточного Забайкалья и суммарные запасы руды в них (их суммарные объемы), будут выражения (75); при этом в качестве аргумента распределений можно использовать условные линейные размеры, вычисляемые по формулам (76).

Гипотетические распределения эмпирически проверены на материалах о добыче руд из 186 месторождений района в прошлом. Фактические данные статистически обработаны в классах крупности добычи по отдельным месторождениям. Считали, что каждое месторождение было представлено одним рудным телом. Классы подсчета фактических данных были: от 1 до 16,

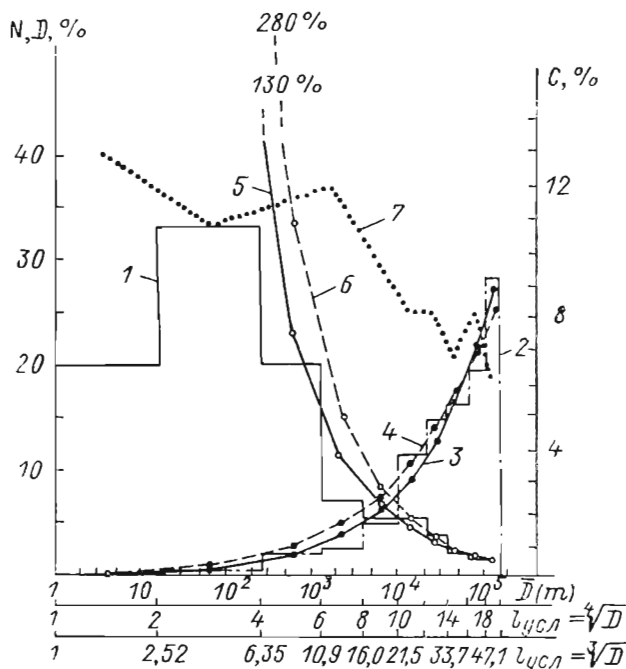


Рис. 43. Распределение количества месторождений и суммарной добычи руды по сводке 1944 г. (по Д. Н. Сафронову).

Гистограммы: 1 — фактического количества месторождений, 2 — фактической добычи руды; расчетные кривые добычи: 3 — для зависимости  $V=A1^4$ , 4 — для зависимости  $V=AP$ ; 5, 6 — расчетные кривые количества месторождений, соответствующие кривым 3 и 4; 7 — кривая средних содержаний свинца в руде.

от 16 до 256, от 256 до 1300 и т. д., вплоть до 16 000 т, так что условные размеры границ классов для зависимости  $V=A1^4$  составляли 1, 2, 4, 6, 8, ..., 20, а соответствующие размеры для зависимости  $V=A1^3$  были 1; 2,52; 6,35; 10,9; 16, ..., 54,2. Гистограммы фактических распределений добычи руды и численности рудных объектов в классах приведены на рис. 43. Расчетные кривые добычи (и пропорциональных ей запасов), вычисленные по формулам (75), совмещены с фактическими простым наложением. Расчетные же кривые численности предварительно приводились к масштабу фактической гистограммы, при котором все 186 рудных тел были приняты за 100%.

Из рис. 43 видно, что наиболее значительные расхождения фактических и расчетных численностей месторождений наблюдаются в области малых условных линейных размеров. В области же больших условных размеров, как показало использование

критерия согласия Пирсона  $\chi^2$ , для  $10 \leq l_{\text{усл}} = \sqrt[4]{\overline{P}} \leq 20$  (т. е. для половины оси условных размеров) с вероятностью 0,90—0,95 расхождения можно считать случайными. Расхождение кривых численности в области малых условных линейных размеров легко можно объяснить тем, что далеко не все из мелких рудных тел в районе присутствуют в нашей частной выборке. Заметим, что по статистике в период разработки выбранных для исследования рудных тел в XVIII—XIX в. было известно около 500 месторождений. Кривые 5, 6 на рис. 43 представляют граничные распределения теоретических зависимостей численности. Согласие фактического распределения добычи руды с расчетными кривыми 3 и 4 достаточно хорошее. Заметим, что соответствующее исследование показало снижение средних содержаний свинца в руде по мере роста добычи (запасов) в рудных телах (см. кривую 7).

Аналогичным образом сопоставлены фактические и теоретические кривые 87 рудных тел из 28 месторождений с учтенными в настоящее время запасами. В целом по результатам сопоставления можно сказать, что тенденция роста суммарных запасов руд при уменьшении количества рудных тел, сопряженном с ростом размеров залежей, на фактических гистограммах выдерживается достаточно четко. В отдельных классах подсчета на гистограммах распределения фактических запасов и количества рудных залежей установлены местные отклонения от теоретических кривых, что позволило высказать обоснованное предположение о наличии необнаруженных залежей с неучтенными запасами. В последующем это предположение было подтверждено разведочными работами.

В Комсомольском районе Приморья С. С. Мещеряков наряду с оценкой рудных перспектив по энергии рудообразования произвел параллельную оценку запасов по числу рудных тел различной длины по простиранию. На рис. 44 приведены результаты этой оценки, откуда следует, что зависимость запасов от длины рудных тел для рассматриваемого района оказалась линейной. Еще не выявленными на момент оценки (1970 г.) могут считаться около 30% запасов руд в телах средних и мелких размеров. Подобная цифра получена и при использовании закономерностей энергии рудообразования.

При использовании закономерностей трещинообразования для оценки в одном из рудных полей Чукотки были собраны соответствующие материалы, сведенные в табл. 49.

В интервале 650—700 м 7 жил, следует ожидать наличия жил еще большей длины по простиранию, однако в табл. 49 их

нет. К аналогичному выводу приводит и рассмотрение более верхних (над интервалом 650—700 м) строчек, вплоть до интервала 400—450 м. Это обстоятельство не позволяет сделать обоснованные выводы и вынуждает ограничиваться лишь более или менее правдоподобными предположениями.

Во-первых, поскольку рассматриваемая система жил образует усеченную (строго по плоскости жил в интервале 650—700 м) пирамиду, правомочно предположение о том, что жилы длиной  $l > 700$  м или эродированы, или по тем или иным причинам

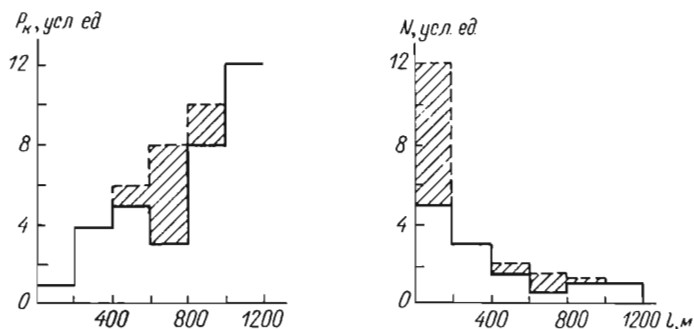


Рис. 44. Распределение объемных запасов руды и количества рудных тел по классам их длин.

Заштрихованы перспективные области. (По С. С. Мещерякову).

(необнаружения, недоучета и др.) в статистике не отражены. Так как трудно предположить, что эрозия проявилась выборочно (уничтожила полностью только все большие тела), то вправду думать о наличии жил длиной более чем 700 м.

Во-вторых, используя в качестве основы обратную квадратическую зависимость количества жил от их длины по простирающую (в качестве фактических материалов 6 последних строчек

Таблица 49

Размеры промышленных рудных тел и их численность на рудном месторождении Чукотки

Интервалы длин жил, м	Численность, шт.	Интервалы длин жил, м	Численность, шт.	Интервалы длин жил, м	Численность, шт.
0—50	126	250—300	19	500—550	6
50—100	64	300—350	15	550—600	8
100—150	42	350—400	10	600—650	6
150—200	37	400—450	12	650—700	7
200—250	27	450—500	10		
				Σ	389

табл. 49), легко получаем, что если теоретическая зависимость верна, то наибольшей должна быть рудная жила длиной около 1500 м. Естественно, что одновременно существуют и более мелкие образования с размерами  $1500 \geq l \geq 700$  м.

В-третьих, интервал рудных жил во всех пределах  $1500 \geq l \geq 700$  м согласно вышеприведенной табл. 49 можно ориентировочно отнести к интервалу  $L \geq l \geq 0,5L$ , содержащему в себе 6,66% жил системы, несущих не менее 75% запасов всей системы. Нет сомнений, что если какая-то часть этих жильных тел и связанных с ними запасов эродирована, то часть жил и запасов реально существует и либо не обнаружена, либо просто не учтена.

Приведенный пример хорошо иллюстрирует необходимость строгого статистического учета количества и размеров обнаруженных жил (равно как и связанных с ними запасов и содержаний в рудах) для того, чтобы можно было применять для тех или иных оценочных работ закономерности энергии рудо- и трещинообразования.

В заключение приведем основные выводы, следующие из статьи Б. Б. Евангулова, Ю. М. Арского, Ю. В. Лира [30], посвященной рассматриваемой нами теме. В своей статье, посвященной анализу распределения запасов по рудным районам, месторождениям и телам различных размеров в оловорудных районах СССР, авторы утверждают, что, приняв за основную часть промышленных запасов 75% от всех учтенных (рис. 45), имеем следующие зависимости для рудных районов.

Количество месторождений	Районы исследования			
	А	Б	В	Г
Учтенные промышленные . . . . .	10	17	28	6
Главные, содержащие 75% всех запасов района	2	5	8	2
Главные по отношению ко всем промышленным, % . . . . .	20	30	35	33

Таким образом, получим, что в балансе запасов рудного олова в изученных районах определяющую роль играет весьма ограниченное число (в пределах 20—35%) крупных (главных) месторождений. Анализ распределения запасов в оловорудных месторождениях по отдельным рудным телам приводит авторов к результатам, изложенным в табл. 50.

Видим, что основная масса (75%) промышленных запасов олова сосредоточена в немногочисленных рудных телах, приуроченных к тектоническим трещинам скалывания, представляющим «скелет» структуры рудного поля. Анализ фактического материала, относящегося к распределению промышленных запасов оловянных руд внутри плоскости главных рудных тел, показал, что выявленные закономерности оловорудных районов и месторождений, проявляющиеся в приуроченности главных запасов (75%) к ограниченному числу главных месторождений



и рудных тел, имеют место и в этом случае: запасы главных рудных тел сосредоточены на относительно небольшой площади (порядка 40%) рудных залежей.

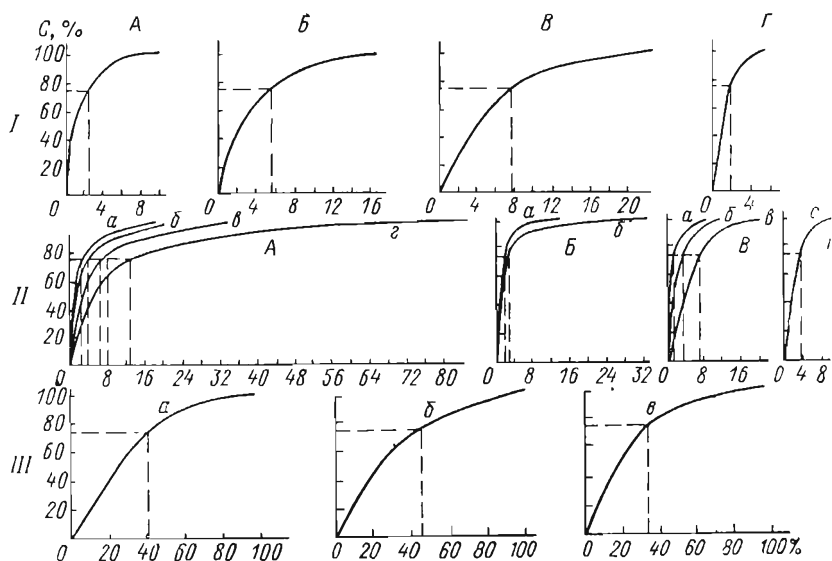


Рис. 45. Кривые концентрации запасов.

I — оловорудный район; II — месторождения олова; III — рудные тела; А—Г — районы исследования; а—в — месторождения.

Таблица 50

Распределение запасов по рудным телам в месторождениях оловорудных районов

Район	Промышленные месторождения	Количество учтенных промышленных рудных тел	Количество рудных тел, содержащих 75% всех запасов	Главные рудные тела, % от общего количества промышленных
А	а	19	4	21
	б	21	7	33
	в	33	8	24
	г	87	12	14
Б	а	33	3	9
	б	14	3	21
В	а	21	7	33
	б	9	2	22
	в	11	4	36
Г	а	10	3	30

Следует подчеркнуть, что это наблюдение авторов находит объяснение в кристаллохимических особенностях формирования собственно руд, приводящих к неравномерному распределению рудных минералов, хотя бы и выпадающих из однородного маточного многокомпонентного раствора. Мы считаем, что эти цифры завышены и это завышение состоит в прямой связи с неполнотой статистики. Очевидно, не учтены рудные тела малых размеров, число которых весьма велико.

В заключение раздела заметим, что материал достаточно убедительно иллюстрирует ту основную мысль, что генетически родственные рудные тела составляют закономерную систему, в которой главные запасы сосредоточены в малом количестве рудных тел.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении необходимо подчеркнуть, что основной целью работы являлось установление основных математических закономерностей, которые связывают запасы руд металлов с их содержаниями в рудах; эти закономерности используются для решения практических задач по оценке перспектив рудоносности тех или иных земных участков. Эта основная цель достигалась путем учета и принятия ряда следующих фактов, допущений и ограничений.

1. Все химические элементы, слагающие верхние оболочки Земли, находятся во взаимосмешении и классифицируются на две основные группы: *породообразующие*, слагающие массивы горных пород, включающие в себя небольшое их число (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg), но обладающие подавляющей массой (для коры 98,69% ее массы), и *рудообразующие*, многочисленные, но обладающие небольшой массой (в коре на долю главных рудообразователей Cu, Pb, Zn, Sn, W, Mo, Ni, Co, U, Th приходится всего 0,03% ее массы).

2. В земной коре сосуществуют два вида проявления рудообразующих элементов: *рассеянное* в любых геологических объектах и *концентрированное* в специфических образованиях (в месторождениях). Отношение масс металлов, сосредоточенных в рудных месторождениях, к массам тех же металлов, рассеянных в породах, крайне незначительное и составляет 0,02—0,05%.

3. Состояние геолого-геохимической изученности верхних геосфер Земли, вплоть до верхов мантии, позволяет утверждать, что здесь нет каких-либо постоянно существующих и обогащенных рудными элементами образований (рудных магм, рудных расплавов и т. п.), которые можно было бы считать за поставщиков рудного материала в месторождения. Их и не может быть, ибо при имевших место в истории Земли неоднократных переплавлениях подобные образования (даже если они и существовали) должны были бы в результате самодиффузии рассеяться в массе существенно породообразующих элементов.

4. При этих обстоятельствах единственно возможным остается принять, что между рассеянием рудообразующих элемен-

тов в породах (в породообразующих магмах) и концентрациями тех же элементов в земной коре (рудными месторождениями) существует прямая генетическая связь, осуществляющаяся по схеме: рассеянное состояние → концентрация.

5. Самопроизвольное возникновение рудных месторождений внутри и за счет всеобщего рассеяния рудообразующих элементов невозможно.

6. Будем называть рудообразующей природную энергию Земли, в результате воздействия которой внутри и за счет всеобщего рассеяния рудообразующих элементов возникают их концентрации — рудные месторождения.

7. Математический аппарат современной термодинамики и ее законы принципиально позволяют решить с доведением до числа две основные задачи, касающиеся расчета энергии рудообразования:

а) расход энергии рудообразования на создание единицы объема руды заданной кондиции;

б) природный расход энергии рудообразования на создание всех руд данной кондиции.

Простым делением вторых цифр на первые, очевидно, получим дифференцированные запасы металла для различных случаев содержания его в рудах.

8. Однако окончательное и точное решение этих термодинамических задач требует знания целой серии термодинамических параметров веществ, вовлекаемых в процесс рудообразования (внутренней энергии, энтропии, теплоемкостей и т. п.), как для состояния геохимического рассеяния, так и для различных степеней концентрации. Однако всего этого нет, как нет еще и термодинамики геохимических процессов, одной из основных задач которой и является определение подобных параметров.

9. Решения упомянутых задач принято искать при использовании законов термодинамики идеальных процессов и веществ. Основанием для выбора явилось соображение, что и термодинамика в целом начиналась с этого, однако смогла дать принципиально правильные решения всей совокупности термодинамических задач.

10. При подобном выборе круг используемых расчетных параметров и закономерностей сокращается, он сводится к необходимости знания начальных, конечных координат процесса, энтропийной термодинамической функции и закона ее изменения, определяющего расход энергии.

11. При соответствующих расчетах расхода энергии рудообразования на создание единицы объема руды принималось:

а) за исходные координаты процесса — параметры состояния родоначальной (гранитоидной) магмы;

б) за конечные координаты процесса — параметры руд соответствующих кондиций;

в) за меру затраты энергии рудообразования — изменения энтропийных функций элементов, вовлеченных в процесс рудообразования, определяемые изменением концентрации этих элементов в руде по сравнению с их концентрациями в родоначальной магме;

г) за процесс, определяющий общие условия рудообразования, — постмагматический гидротермальный процесс.

12. Количества энергии рудообразования, расходуемые природой на создание всех руд данной кондиции, определялись согласно закону Л. Больцмана, справедливому для любого по масштабам, но замкнутого в себе энергетического очага.

13. Дифференцированные запасы для любого металла и для руд любых кондиций определялись как частное от деления суммарной энергии рудообразования, расходуемой природой на создание руд данных кондиций (по Л. Больцману), на расход энергии рудообразования, необходимой для создания единицы объема руды (после пересчета на единицу массы руды, металла) данной кондиции (по термодинамике идеальных процессов).

14. Металлами, для которых были рассчитаны по вышеизложенной схеме дифференцированные запасы для всех возможных кондиций руд, явились:

а) олово и золото в рудно-кварцевых месторождениях как типичные представители группы элементов, имеющих «длинный ряд» кларков концентрации в рудах;

б) медь в прожилково-вкрапленных порфириновых рудах как представитель группы элементов, имеющих «средний ряд» кларков концентрации в рудах;

в) железо в скарновых магнетитовых рудах как представитель группы элементов, имеющих «короткий ряд» кларков концентрации в рудах.

Для всех этих элементов были рассчитаны и построены кривые дифференцированных запасов металла в рудах различных кондиций и по этим материалам рассчитаны плотности и средние запасы в расчете на 1 кларк по практически важным интервальным рудным грациям в общем балансе запасов металла.

15. Полученные теоретические материалы используются для практических работ;

а) результаты расчетов энергии образования единицы объема руды (ореола) применяются для изображения в едином энергетическом показателе многокомпонентных геологических и геохимических образований;

б) результаты расчетов по дифференцированным запасам руд служат для предварительной оценки перспектив рудоносности территорий, при этом используется минимум накопленных практических данных по изучаемым территориям.

16. Рассмотрены основы оценки перспективных рудных запасов, базирующиеся на особенностях деформации горных пород.

Эти особенности отчетливо наблюдаются в породах до глубины первого десятка километров, т. е. в области глубин интенсивного рудообразования.

17. Главной особенностью пород в указанных пределах глубин является неравномерное распределение внутренних напряжений. Оказалось, что в любой глубинной точке плоскостная эпюра внутренних напряжений в отсутствие стрессовых нагрузок имеет не круговую, а эллиптическую форму. При этом большая ось эпюры направлена вертикально и соответствует полному горному давлению, определяемому весом вышележащих пород, а малая ось — горизонтально (горизонтальная ось равняется в среднем 0,5 вертикальной).

18. Металлоносный гидротермальный очаг образуется при дифференциальной кристаллизации родоначального (гранитоидного) массива по схеме Пфанна: массив находится на глубине под полным действием горного давления. Это давление, естественно, передается и гидротермальному очагу. Если в твердых породах это давление действует односторонне по вертикали, то очаг, заполненный газодонным веществом, преобразовывает это одностороннее давление по закону Паскаля во всестороннее. Под воздействием этого давления и происходит разрыв горных пород, при этом преимущественно вертикального направления, поскольку в горизонтальном направлении противодействие минимальное.

19. Мощность трещины пропорциональна линейной длине ее или квадрату линейной длины. В практике, очевидно, при этих условиях следует ожидать, что мощность новообразующейся трещины будет пропорциональна линейной длине ее, взятой в степени, средней между 1 и 2.

20. Легко показать, что в результате трещинообразования возникают закономерные системы трещин в виде пирамид, в основании которых находится много мелких месторождений, содержащих небольшие части суммарных запасов системы, а в вершинах пирамид — крупные единичные месторождения, несущие в себе большие запасы.

21. Теоретические выводы по энергии рудо- и трещинообразования были проверены на ряде практических материалов и показана их геологическая полезность и значимость:

а) экономичность и наглядность изображения многокомпонентных геохимических результативных данных при картировании площадей;

б) экономичность и высокая наглядность выражения полевых геохимических материалов в значениях суммарной энергии ореолообразования;

в) результативность провизорных оценок по закономерностям энергии рудо-ореолообразования еще не вскрытых запасов руд разных металлов в недрах;

г) сопоставимость теоретических расчетных и глобальных практических статистических цифр по добыче (взяты данные по меди за 80 лет и показано, что расхождения составляют  $-14,5\% + 12\%$  по отдельным интервалам содержаний и близки к нулю по сумме всех интервалов, аналогичные сведения были получены по золоту);

д) возможность оценок еще не вскрытых запасов руд на основе закономерных соотношений численностей рудных залежей различной длины по простиранию.

Вместе с тем данная работа объективно вскрывает следующий ряд задач, которые требуют серьезных исследований.

1. Создание основ геохимической термодинамики для определения всевозможных геохимических параметров земных веществ в состоянии их природного рассеяния и концентраций.

2. Осуществление широкой практической проверки выведенных соотношений запасы — содержания для различных металлов, их руд и районов проявления. То же для распределения запасов в системе рудных тел по залежам различной длины по простиранию.

3. Дополнительные теоретические и практические исследования распределения металлов по различным градациям содержаний их в рудах (с учетом забалансовых руд) в отдельно взятых рудных телах различных месторождений.

4. Детальная разработка вопросов распределения рудных запасов месторождений в телах различных размеров с использованием при этом теории гидродинамического разрыва пластов и массивов горных пород.

Содержания элементов в литосфере и в главнейших типах изверженных пород

Элемент	Атомная масса	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	Атомные доли
Литосфера					
O	16,00	46,6	1308	81,75	$60,56 \cdot 10^{-2}$
Si	28,09	27,72	776	27,62	$20,46 \cdot 10^{-2}$
Fe	55,85	5,00	140	2,51	$1,856 \cdot 10^{-2}$
Al	26,98	8,13	228	8,46	$6,265 \cdot 10^{-2}$
Ca	40,08	3,63	102	2,55	$1,890 \cdot 10^{-2}$
Na	22,99	2,83	75	3,26	$2,415 \cdot 10^{-2}$
K	39,10	2,59	72,5	1,85	$1,370 \cdot 10^{-2}$
Mg	24,32	2,09	58,5	2,41	$1,785 \cdot 10^{-2}$
Σ		98,59	2760,0	130,41	$96,601 \cdot 10^{-2}$
Ti	47,90	0,44	12,3	0,2570	$1,904 \cdot 10^{-3}$
H	1,008	0,14	3,9	3,8700	$2,865 \cdot 10^{-2}$
P	30,98	0,12	3,4	0,1097	$8,13 \cdot 10^{-4}$
Mn	54,94	0,10	2,8	0,0519	$3,84 \cdot 10^{-4}$
Σ		0,80	22,4	4,2886	$3,1751 \cdot 10^{-2}$
S	32,07	0,052	1,45	0,0452	$3,35 \cdot 10^{-4}$
C	12,01	0,032	0,90	0,0749	$5,54 \cdot 10^{-4}$
Cl	35,46	0,034	0,88	0,0248	$1,836 \cdot 10^{-4}$
Rb	85,48	0,031	0,87	0,0102	$7,56 \cdot 10^{-5}$
F	19,00	0,030	0,84	0,0442	$3,27 \cdot 10^{-4}$
Sr	87,63	0,030	0,84	0,00958	$7,10 \cdot 10^{-5}$
Ba	137,36	0,025	0,70	0,00509	$3,77 \cdot 10^{-5}$
Cr	52,01	0,020	0,56	0,01075	$7,97 \cdot 10^{-5}$
Zr	91,22	0,022	0,63	0,0069	$5,04 \cdot 10^{-5}$
V	50,95	0,015	0,42	0,0082	$6,10 \cdot 10^{-5}$
Zn	65,38	0,0132	0,37	0,0056	$4,20 \cdot 10^{-5}$
Σ		0,3042	8,46	0,2454	$0,1817 \cdot 10^{-2}$



Элемент	Атомная масса	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	Атомные доли
Ni	58,69	$8 \cdot 10^{-3}$	0,224	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$
Cu	63,54	$7 \cdot 10^{-3}$	0,196	$3,08 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-5}$
W	183,92	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,193	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$7,78 \cdot 10^{-6}$
Li	6,94	$6,5 \cdot 10^{-3}$	0,182	$26,26 \cdot 10^{-3}$	$1,945 \cdot 10^{-4}$
N	14,01	$4,6 \cdot 10^{-3}$	0,129	$9,21 \cdot 10^{-3}$	$6,82 \cdot 10^{-5}$
Ce	140,13	$4,6 \cdot 10^{-3}$	0,129	$9,21 \cdot 10^{-4}$	$6,82 \cdot 10^{-6}$
Sn	118,70	$4 \cdot 10^{-3}$	0,112	$9,45 \cdot 10^{-4}$	$7,00 \cdot 10^{-6}$
Y	88,92	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,078	$8,83 \cdot 10^{-4}$	$6,54 \cdot 10^{-6}$
Nd	144,27	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,067	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$3,43 \cdot 10^{-6}$
Nb	92,91	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,067	$7,22 \cdot 10^{-4}$	$5,35 \cdot 10^{-6}$
Co	58,94	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,064	$10,95 \cdot 10^{-4}$	$8,12 \cdot 10^{-6}$
La	138,92	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,050	$3,60 \cdot 10^{-4}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$
Pb	207,21	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,045	$2,17 \cdot 10^{-4}$	$1,606 \cdot 10^{-6}$
Ga	69,72	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,042	$6,03 \cdot 10^{-4}$	$4,46 \cdot 10^{-6}$
Mo	95,95	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,042	$4,375 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-6}$
Th	232,04	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,034	$1,464 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$
Σ		$59,1 \cdot 10^{-3}$	1,654	0,0502	$0,0372 \cdot 10^{-2}$
Cs	132,91	$7 \cdot 10^{-4}$	0,0196	$1,478 \cdot 10^{-4}$	$1,092 \cdot 10^{-6}$
Ge	72,60	$7 \cdot 10^{-4}$	0,0196	$2,700 \cdot 10^{-4}$	$2,000 \cdot 10^{-6}$
Be	9,01	$6 \cdot 10^{-4}$	0,0168	$18,660 \cdot 10^{-4}$	$1,382 \cdot 10^{-5}$
Sm	150,43	$6,5 \cdot 10^{-4}$	0,0182	$1,210 \cdot 10^{-4}$	$8,98 \cdot 10^{-7}$
Gd	156,90	$6,4 \cdot 10^{-4}$	0,0179	$1,142 \cdot 10^{-4}$	$8,47 \cdot 10^{-7}$
Pr	140,92	$5,5 \cdot 10^{-4}$	0,0154	$1,093 \cdot 10^{-4}$	$8,10 \cdot 10^{-7}$
Sc	44,96	$5 \cdot 10^{-4}$	0,0140	$3,121 \cdot 10^{-4}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$
As	74,91	$5 \cdot 10^{-4}$	0,0140	$1,871 \cdot 10^{-4}$	$1,385 \cdot 10^{-6}$
Hf	178,60	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,0126	$0,706 \cdot 10^{-4}$	$5,23 \cdot 10^{-7}$
Dy	162,46	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,0126	$0,777 \cdot 10^{-4}$	$5,76 \cdot 10^{-7}$
U	238,07	$4 \cdot 10^{-4}$	0,0112	$0,470 \cdot 10^{-4}$	$3,48 \cdot 10^{-7}$
V	10,82	$3 \cdot 10^{-4}$	0,0084	$7,765 \cdot 10^{-4}$	$5,76 \cdot 10^{-6}$
Yb	173,04	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,0075	$0,438 \cdot 10^{-4}$	$3,25 \cdot 10^{-7}$
Er	167,26	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,0070	$0,418 \cdot 10^{-4}$	$3,10 \cdot 10^{-7}$
Ta	180,95	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,0059	$0,326 \cdot 10^{-4}$	$2,415 \cdot 10^{-7}$
Br	79,92	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,0045	$0,563 \cdot 10^{-4}$	$4,17 \cdot 10^{-7}$
Ho	164,94	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,0034	$0,206 \cdot 10^{-4}$	$1,525 \cdot 10^{-7}$
Eu	152,00	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,0031	$0,204 \cdot 10^{-4}$	$1,511 \cdot 10^{-7}$
Sb	121,76	$1 \cdot 10^{-4}$	0,0028	$0,230 \cdot 10^{-4}$	$1,705 \cdot 10^{-7}$
Σ		$76,6 \cdot 10^{-4}$	0,2145	$4,34 \cdot 10^{-3}$	$0,00321 \cdot 10^{-2}$
Tb	158,93	$9 \cdot 10^{-5}$	$252 \cdot 10^{-5}$	$1,586 \cdot 10^{-5}$	$1,174 \cdot 10^{-7}$
Lu	174,99	$8 \cdot 10^{-5}$	$224 \cdot 10^{-5}$	$2,280 \cdot 10^{-5}$	$9,48 \cdot 10^{-8}$
Tl	204,39	$6 \cdot 10^{-5}$	$168 \cdot 10^{-5}$	$0,822 \cdot 10^{-5}$	$6,085 \cdot 10^{-8}$
Hg	200,61	$5 \cdot 10^{-5}$	$140 \cdot 10^{-5}$	$0,698 \cdot 10^{-5}$	$5,17 \cdot 10^{-8}$
I	126,91	$3 \cdot 10^{-5}$	$84 \cdot 10^{-5}$	$0,662 \cdot 10^{-5}$	$4,90 \cdot 10^{-8}$
Bi	209,00	$2 \cdot 10^{-5}$	$56 \cdot 10^{-5}$	$0,268 \cdot 10^{-5}$	$1,985 \cdot 10^{-8}$
Tm	168,94	$2 \cdot 10^{-5}$	$56 \cdot 10^{-5}$	$0,332 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-8}$
Cd	112,41	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$42 \cdot 10^{-5}$	$0,374 \cdot 10^{-5}$	$2,77 \cdot 10^{-8}$
Ag	107,88	$1 \cdot 10^{-5}$	$28 \cdot 10^{-5}$	$0,260 \cdot 10^{-5}$	$1,925 \cdot 10^{-8}$
In	114,76	$1 \cdot 10^{-5}$	$28 \cdot 10^{-5}$	$0,244 \cdot 10^{-5}$	$1,808 \cdot 10^{-8}$
Se	78,96	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$25,2 \cdot 10^{-5}$	$0,320 \cdot 10^{-5}$	$2,37 \cdot 10^{-8}$
Σ		$39,4 \cdot 10^{-5}$	$11 \cdot 10^{-3}$	$7,846 \cdot 10^{-5}$	—

Элемент	Атомная масса	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	Атомные доли
Pd	106,70	$10 \cdot 10^{-7}$	$280 \cdot 10^{-7}$	$2,625 \cdot 10^{-7}$	$1,944 \cdot 10^{-9}$
Pt	195,23	$5 \cdot 10^{-7}$	$140 \cdot 10^{-7}$	$0,717 \cdot 10^{-7}$	$5,31 \cdot 10^{-10}$
Au	197,00	$5 \cdot 10^{-7}$	$140 \cdot 10^{-7}$	$0,711 \cdot 10^{-7}$	$5,27 \cdot 10^{-10}$
Te	127,61	$2 \cdot 10^{-7}$	$56 \cdot 10^{-7}$	$0,439 \cdot 10^{-7}$	$3,25 \cdot 10^{-10}$
Rh	102,91	$1 \cdot 10^{-7}$	$28 \cdot 10^{-7}$	$0,272 \cdot 10^{-7}$	$2,015 \cdot 10^{-10}$
Re	186,31	$1 \cdot 10^{-7}$	$28 \cdot 10^{-7}$	$0,150 \cdot 10^{-7}$	$1,111 \cdot 10^{-10}$
Ir	192,20	$1 \cdot 10^{-7}$	$28 \cdot 10^{-7}$	$0,146 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-11}$
Os	190,20	$1 \cdot 10^{-7}$	$28 \cdot 10^{-7}$	$0,147 \cdot 10^{-7}$	$1,086 \cdot 10^{-11}$
Ru	101,10	$1 \cdot 10^{-7}$	$28 \cdot 10^{-7}$	$0,278 \cdot 10^{-7}$	$2,060 \cdot 10^{-11}$
Σ		$27 \cdot 10^{-7}$	$7,56 \cdot 10^{-5}$	$5,49 \cdot 10^{-7}$	—
Σ		99,76	2792,7	135,0	$99,998 \cdot 10^{-2}$
Граниты					
O	16,00	48,7	1305,2	81,58	$62,10 \cdot 10^{-2}$
Si	28,09	32,3	865,5	30,80	$23,40 \cdot 10^{-2}$
Al	26,98	7,7	206,4	7,63	$5,80 \cdot 10^{-2}$
Fe	55,85	2,7	72,4	1,29	$9,86 \cdot 10^{-3}$
Ca	40,08	1,58	42,3	1,05	$8,02 \cdot 10^{-3}$
Na	22,99	2,77	74,2	3,23	$2,44 \cdot 10^{-2}$
K	39,10	3,34	89,5	2,29	$1,73 \cdot 10^{-2}$
Mg	24,32	0,56	15,0	0,617	$4,72 \cdot 10^{-3}$
Σ		99,65	2670,50	128,487	$97,73 \cdot 10^{-2}$
Ti	47,90	0,23	6,20	0,1290	$9,86 \cdot 10^{-4}$
H	1,008	0,09	2,41	2,3910	$1,83 \cdot 10^{-4}$
P	30,98	0,07	1,87	0,0605	$4,62 \cdot 10^{-4}$
Mn	54,94	0,06	1,61	0,0297	$2,27 \cdot 10^{-4}$
Σ		0,45	12,09	2,6102	$2 \cdot 10^{-2}$
S	32,07	$4 \cdot 10^{-2}$	1,07	$3,33 \cdot 10^{-2}$	$2,54 \cdot 10^{-4}$
C	12,01	$3 \cdot 10^{-2}$	0,80	$6,66 \cdot 10^{-2}$	$5,09 \cdot 10^{-4}$
Cl	35,46	$2,4 \cdot 10^{-2}$	0,64	$1,80 \cdot 10^{-2}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$
Rb	85,48	$2 \cdot 10^{-2}$	0,54	$6,32 \cdot 10^{-3}$	$4,83 \cdot 10^{-5}$
F	19,00	$8 \cdot 10^{-2}$	2,14	$11,3 \cdot 10^{-2}$	$8,64 \cdot 10^{-4}$
Sr	87,63	$3 \cdot 10^{-2}$	0,80	$9,13 \cdot 10^{-3}$	$6,98 \cdot 10^{-5}$
Ba	137,36	$8,3 \cdot 10^{-2}$	2,22	$1,62 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$
Zr	91,22	$2 \cdot 10^{-2}$	0,54	$5,92 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-5}$
Cr	52,01	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,067	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$9,86 \cdot 10^{-6}$
V	50,95	$4 \cdot 10^{-3}$	0,107	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-5}$
Zn	65,38	$6 \cdot 10^{-3}$	0,161	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^{-5}$
Σ		0,3395	9,085	0,27433	$2,10 \cdot 10^{-3}$

Элемент	Атомная масса	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	Атомные доли
Ni	58,69	$0,08 \cdot 10^{-2}$	0,0214	$0,0365 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-6}$
Cu	63,54	$0,2 \cdot 10^{-2}$	0,054	$0,085 \cdot 10^{-2}$	$6,50 \cdot 10^{-6}$
W	183,92	$0,015 \cdot 10^{-2}$	0,00420	$0,002 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-7}$
Li	6,94	$0,4 \cdot 10^{-2}$	0,107	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$
N	14,01	$0,2 \cdot 10^{-2}$	0,054	$0,385 \cdot 10^{-2}$	$2,94 \cdot 10^{-6}$
Ce	140,13	$1 \cdot 10^{-2}$	0,27	$0,193 \cdot 10^{-2}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$
Sn	118,70	$0,03 \cdot 10^{-2}$	0,008	$0,0067 \cdot 10^{-2}$	$5,17 \cdot 10^{-7}$
Y	88,92	$0,34 \cdot 10^{-2}$	0,091	$0,102 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$
Nd	144,27	$0,46 \cdot 10^{-2}$	0,123	$0,0853 \cdot 10^{-2}$	$6,52 \cdot 10^{-6}$
Nb	92,91	$0,2 \cdot 10^{-2}$	0,054	$0,0581 \cdot 10^{-2}$	$4,44 \cdot 10^{-6}$
Co	58,94	$0,05 \cdot 10^{-2}$	0,0134	$0,0227 \cdot 10^{-2}$	$1,73 \cdot 10^{-6}$
La	138,92	$0,6 \cdot 10^{-2}$	0,161	$0,116 \cdot 10^{-2}$	$8,87 \cdot 10^{-6}$
Pb	207,21	$0,2 \cdot 10^{-2}$	0,054	$0,0261 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$
Ga	69,72	$0,2 \cdot 10^{-2}$	0,054	$0,0774 \cdot 10^{-2}$	$5,92 \cdot 10^{-6}$
Mo	95,95	$0,01 \cdot 10^{-2}$	0,0026	$0,0027 \cdot 10^{-2}$	$2,13 \cdot 10^{-7}$
Th	232,05	$0,18 \cdot 10^{-2}$	0,048	$0,0207 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-6}$
Σ		$4,14 \cdot 10^{-2}$	1,1127	$2,76 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-4}$
Cs	132,91	$5 \cdot 10^{-4}$	0,0134	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$7,72 \cdot 10^{-7}$
Ge	72,60	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,0037	$5,16 \cdot 10^{-5}$	$3,94 \cdot 10^{-7}$
Be	9,01	$5,5 \cdot 10^{-4}$	0,0147	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-5}$
Sm	150,43	$9 \cdot 10^{-4}$	0,0241	$24,1 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$
Gd	156,90	$9 \cdot 10^{-4}$	0,0241	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$
Pr	140,92	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,032	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$1,73 \cdot 10^{-6}$
Sc	44,96	$3 \cdot 10^{-4}$	0,00804	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-6}$
As	74,91	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,0042	$5,61 \cdot 10^{-5}$	$4,29 \cdot 10^{-7}$
Hf	178,60	$1 \cdot 10^{-4}$	0,00268	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$
Dy	162,46	$6,7 \cdot 10^{-4}$	0,0179	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$8,41 \cdot 10^{-7}$
U	238,07	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,00938	$3,94 \cdot 10^{-5}$	$3,01 \cdot 10^{-7}$
B	10,82	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,04	$3,70 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$
Yb	173,04	$4 \cdot 10^{-4}$	0,0107	$6,18 \cdot 10^{-5}$	$4,72 \cdot 10^{-7}$
Er	167,20	$4 \cdot 10^{-4}$	0,0107	$6,40 \cdot 10^{-5}$	$4,89 \cdot 10^{-7}$
Ta	180,95	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,00938	$5,18 \cdot 10^{-5}$	$3,96 \cdot 10^{-7}$
Br	79,92	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,00456	$5,70 \cdot 10^{-5}$	$4,36 \cdot 10^{-7}$
Ho	164,94	$2 \cdot 10^{-4}$	0,00536	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$2,48 \cdot 10^{-7}$
Eu	152,00	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,0042	$2,76 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-7}$
Sb	121,76	$2,6 \cdot 10^{-5}$	0,00069	$5,67 \cdot 10^{-6}$	$4,33 \cdot 10^{-8}$
Σ		$9,956 \cdot 10^{-3}$	0,23984	$6,72 \cdot 10^{-3}$	$0,5134 \cdot 10^{-4}$
Tb	158,93	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$4,21 \cdot 10^{-5}$	$3,22 \cdot 10^{-7}$
Lu	174,99	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,68 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$
Tl	204,39	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-7}$
Hg	200,61	$8 \cdot 10^{-6}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$8,18 \cdot 10^{-9}$
I	126,91	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$8,43 \cdot 10^{-6}$	$6,44 \cdot 10^{-8}$
Bi	209,00	$1 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-7}$	$9,86 \cdot 10^{-10}$
Tm	168,94	$3 \cdot 10^{-5}$	$8,04 \cdot 10^{-4}$	$4,76 \cdot 10^{-6}$	$3,64 \cdot 10^{-8}$
Cd	112,41	$1 \cdot 10^{-5}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-6}$	$1,82 \cdot 10^{-8}$
Ag	107,88	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-6}$	$9,48 \cdot 10^{-9}$
In	114,76	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$6,01 \cdot 10^{-6}$	$4,59 \cdot 10^{-8}$
Se	78,96	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^{-8}$
Σ		$6,25 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-7}$

Элемент	Атомная масса	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	Атомные доли
Pd	106,70	$1 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-7}$	$1,93 \cdot 10^{-9}$
Pt	195,23	$(5 \cdot 10^{-7})$	$(140 \cdot 10^{-7})$	$(7,17 \cdot 10^{-8})$	$(5,31 \cdot 10^{-10})$
Au	197,00	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$6,09 \cdot 10^{-8}$	$4,65 \cdot 10^{-10}$
Te	127,61	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,35 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$
Rh	102,91	$1 \cdot 10^{-7}$	$28 \cdot 10^{-7}$	$2,72 \cdot 10^{-8}$	$2,015 \cdot 10^{-10}$
Re	186,31	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$8,18 \cdot 10^{-11}$
Ir	192,20	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-8}$	$6,68 \cdot 10^{-9}$
Os	190,20	$1 \cdot 10^{-7}$	$2,68 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^{-8}$	$1,08 \cdot 10^{-10}$
Ru	101,10	$1 \cdot 10^{-7}$	$2,68 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-8}$	$2,02 \cdot 10^{-10}$
Σ		$3 \cdot 10^{-6}$	$83 \cdot 10^{-5}$	$5,79 \cdot 10^{-7}$	$10,38 \cdot 10^{-9}$
Σ		100,49	2693,0	131,3	$99,732 \cdot 10^{-2}$
Диориты					
O	16,00	46,00	1334,0	83,40	$60,54 \cdot 10^{-2}$
Si	28,09	26,00	754,0	26,84	$19,48 \cdot 10^{-2}$
Al	26,98	8,65	256,5	9,52	$6,91 \cdot 10^{-2}$
Fe	55,85	5,85	169,5	3,04	$2,21 \cdot 10^{-2}$
Ca	40,08	4,65	135,0	3,36	$2,44 \cdot 10^{-2}$
Na	22,99	3,00	87,0	3,78	$2,74 \cdot 10^{-2}$
K	39,10	2,30	67,0	1,71	$1,24 \cdot 10^{-2}$
Mg	24,32	2,18	63,0	2,59	$1,88 \cdot 10^{-2}$
Σ		98,63	2866,0	134,24	$97,44 \cdot 10^{-2}$
Ti	47,90	0,80	23,20	0,4850	$3,52 \cdot 10^{-3}$
H	1,008	0,09	2,61	2,5900	$1,88 \cdot 10^{-2}$
P	30,98	0,16	4,64	0,1496	$1,085 \cdot 10^{-3}$
Mn	54,94	0,12	3,48	0,0634	$4,59 \cdot 10^{-4}$
Σ		1,17	33,93	3,2880	$2,386 \cdot 10^{-2}$
S	32,07	$2 \cdot 10^{-2}$	0,580	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$
C	12,01	$2 \cdot 10^{-2}$	0,580	$4,82 \cdot 10^{-2}$	$3,50 \cdot 10^{-4}$
Cl	35,46	$1 \cdot 10^{-2}$	0,290	$8,18 \cdot 10^{-3}$	$5,94 \cdot 10^{-5}$
Rb	85,48	$1 \cdot 10^{-2}$	0,290	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$2,47 \cdot 10^{-5}$
F	19,00	$5 \cdot 10^{-2}$	1,450	$7,63 \cdot 10^{-2}$	$5,54 \cdot 10^{-4}$
Sr	87,63	$8 \cdot 10^{-2}$	2,320	$2,65 \cdot 10^{-2}$	$1,924 \cdot 10^{-4}$
Ba	137,36	$6,5 \cdot 10^{-2}$	1,885	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$9,96 \cdot 10^{-5}$
Zr	91,22	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,754	$8,26 \cdot 10^{-3}$	$6,00 \cdot 10^{-5}$
Cr	52,01	$5 \cdot 10^{-3}$	0,145	$2,78 \cdot 10^{-3}$	$2,018 \cdot 10^{-5}$
V	50,95	$1 \cdot 10^{-2}$	0,290	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$4,13 \cdot 10^{-5}$
Zn	65,38	$7,2 \cdot 10^{-3}$	0,209	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-5}$
Σ		0,3032	8,793	0,2143	$1,556 \cdot 10^{-3}$

Элемент	Атомная масса	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	Атомные доли
Ni	58,69	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$15,94 \cdot 10^{-2}$	$2,72 \cdot 10^{-3}$	$1,975 \cdot 10^{-5}$
Cu	63,54	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$10,15 \cdot 10^{-2}$	$1,595 \cdot 10^{-3}$	$1,157 \cdot 10^{-5}$
W	183,54	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,575 \cdot 10^{-6}$	$1,143 \cdot 10^{-7}$
Li	6,94	$2 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-2}$	$8,37 \cdot 10^{-3}$	$6,07 \cdot 10^{-5}$
N	14,01	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$6,37 \cdot 10^{-2}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$
Ce	140,13	$(7,25 \cdot 10^{-3})$	$(21,01 \cdot 10^{-2})$	$(1,496 \cdot 10^{-3})$	$(1,084 \cdot 10^{-5})$
Sn	118,70	$(2,25 \cdot 10^{-4})$	$(6,5 \cdot 10^{-3})$	$(5,48 \cdot 10^{-5})$	$(3,982 \cdot 10^{-7})$
Y	88,92	$(2,7 \cdot 10^{-3})$	$(7,83 \cdot 10^{-2})$	$(8,82 \cdot 10^{-4})$	$(6,395 \cdot 10^{-6})$
Nd	144,27	$(3,3 \cdot 10^{-3})$	$(9,58 \cdot 10^{-2})$	$(6,63 \cdot 10^{-4})$	$(4,815 \cdot 10^{-6})$
Nb	92,91	$2 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$4,54 \cdot 10^{-6}$
Co	58,94	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,90 \cdot 10^{-2}$	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$3,58 \cdot 10^{-6}$
La	138,92	$(4,35 \cdot 10^{-3})$	$(12,60 \cdot 10^{-2})$	$(9,08 \cdot 10^{-4})$	$(6,58 \cdot 10^{-6})$
Pb	207,21	$1,50 \cdot 10^{-3}$	$4,35 \cdot 10^{-2}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$1,525 \cdot 10^{-6}$
Ca	69,72	$2 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-2}$	$8,32 \cdot 10^{-4}$	$6,04 \cdot 10^{-6}$
Mo	95,95	$9 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,71 \cdot 10^{-5}$	$1,965 \cdot 10^{-7}$
Th	232,05	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-2}$	$8,74 \cdot 10^{-5}$	$6,55 \cdot 10^{-7}$
Σ		$3,84 \cdot 10^{-2}$	1,1135	$2,352 \cdot 10^{-2}$	$1,706 \cdot 10^{-4}$
Cs	132,91	$(3 \cdot 10^{-4})$	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$6,55 \cdot 10^{-5}$	$4,75 \cdot 10^{-7}$
Ge	72,60	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,35 \cdot 10^{-3}$	$5,98 \cdot 10^{-5}$	$4,34 \cdot 10^{-7}$
Be	9,01	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,22 \cdot 10^{-3}$	$5,78 \cdot 10^{-4}$	$4,20 \cdot 10^{-6}$
Sm	150,43	$(7 \cdot 10^{-4})$	$2,03 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$9,79 \cdot 10^{-7}$
Gd	156,90	$(7 \cdot 10^{-4})$	$(2,03 \cdot 10^{-2})$	$(1,29 \cdot 10^{-4})$	$(9,37 \cdot 10^{-7})$
Pr	140,92	$(8 \cdot 10^{-4})$	$(2,35 \cdot 10^{-2})$	$(1,65 \cdot 10^{-4})$	$(1,195 \cdot 10^{-6})$
Sc	44,96	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$7,25 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$1,167 \cdot 10^{-6}$
As	74,91	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$6,95 \cdot 10^{-3}$	$9,30 \cdot 10^{-5}$	$6,75 \cdot 10^{-7}$
Hf	178,60	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$1,174 \cdot 10^{-7}$
Dy	162,46	$(4,35 \cdot 10^{-4})$	$(1,26 \cdot 10^{-2})$	$(8,77 \cdot 10^{-5})$	$6,36 \cdot 10^{-7}$
U	238,07	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,22 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-5}$	$1,588 \cdot 10^{-7}$
B	10,82	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,35 \cdot 10^{-2}$	$4,01 \cdot 10^{-3}$	$2,91 \cdot 10^{-5}$
Yb	173,04	$(3 \cdot 10^{-4})$	$(8,7 \cdot 10^{-3})$	$(5,02 \cdot 10^{-5})$	$3,645 \cdot 10^{-7}$
Er	167,20	$(3 \cdot 10^{-4})$	$(8,7 \cdot 10^{-3})$	$(5,20 \cdot 10^{-5})$	$3,77 \cdot 10^{-7}$
Ta	180,95	$(7 \cdot 10^{-5})$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$8,13 \cdot 10^{-8}$
Br	79,92	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$1,184 \cdot 10^{-6}$
Ho	164,94	$(1,5 \cdot 10^{-4})$	$(4,35 \cdot 10^{-3})$	$2,64 \cdot 10^{-5}$	$1,915 \cdot 10^{-7}$
Eu	152,00	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,37 \cdot 10^{-5}$	$1,717 \cdot 10^{-7}$
Sb	121,76	$2 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$4,76 \cdot 10^{-6}$	$3,455 \cdot 10^{-8}$
Σ		$6,95 \cdot 10^{-3}$	$20,15 \cdot 10^{-2}$	$5,85 \cdot 10^{-3}$	$4,248 \cdot 10^{-5}$
Tb	158,93	$(1,6 \cdot 10^{-4})$	$(4,64 \cdot 10^{-3})$	$(2,92 \cdot 10^{-5})$	$(2,115 \cdot 10^{-7})$
Lu	174,99	$(8 \cdot 10^{-5})$	$(2,32 \cdot 10^{-3})$	$(2,32 \cdot 10^{-5})$	$(1,680 \cdot 10^{-7})$
Tl	204,39	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$7,10 \cdot 10^{-6}$	$5,155 \cdot 10^{-8}$
Hg	200,59	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$(2,47 \cdot 10^{-4})$	$(1,23 \cdot 10^{-6})$	$(8,95 \cdot 10^{-9})$
I	126,91	$3 \cdot 10^{-5}$	$(8,7 \cdot 10^{-4})$	$6,86 \cdot 10^{-6}$	$4,98 \cdot 10^{-8}$
Bi	209,00	$1 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-7}$	$1,006 \cdot 10^{-9}$
Tm	168,94	$(2,5 \cdot 10^{-5})$	$7,25 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-8}$
Gd	112,41	$(1,45 \cdot 10^{-5})$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-6}$	$2,72 \cdot 10^{-8}$
Ag	107,88	$7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-6}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$
In	114,76	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$6,10 \cdot 10^{-6}$	$4,42 \cdot 10^{-8}$
Se	74,96	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$1,84 \cdot 10^{-6}$	$1,335 \cdot 10^{-8}$
Σ		$4,05 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$8,56 \cdot 10^{-5}$	$6,202 \cdot 10^{-7}$

Элемент	Атомная масса	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	Атомные доли
Pd	106,70	$1,45 \cdot 10^{-6}$	$(4,21 \cdot 10^{-5})$	$(3,95 \cdot 10^{-7})$	$(2,865 \cdot 10^{-9})$
Pt	195,23	$(5,2 \cdot 10^{-6})$	$(1,51 \cdot 10^{-4})$	$(7,73 \cdot 10^{-7})$	$(5,615 \cdot 10^{-9})$
Au	197,00	$4,25 \cdot 10^{-7}$	$(1,23 \cdot 10^{-5})$	$(6,25 \cdot 10^{-8})$	$(4,54 \cdot 10^{-10})$
Te	127,61	$1 \cdot 10^{-7}$	$(2,9 \cdot 10^{-6})$	$(2,27 \cdot 10^{-8})$	$(1,645 \cdot 10^{-10})$
Rh	102,91	$1,45 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$4,07 \cdot 10^{-8}$	$2,96 \cdot 10^{-10}$
Re	186,31	$6,9 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$7,77 \cdot 10^{-11}$
Ir	192,20	$6 \cdot 10^{-7}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$9,05 \cdot 10^{-7}$	$6,56 \cdot 10^{-9}$
Os	190,02	$1 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$
Ru	101,10	$1,45 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$4,16 \cdot 10^{-7}$	$3,02 \cdot 10^{-9}$
Σ		$16 \cdot 10^{-6}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$		
Σ		100,15	2910,1	137,772	$100 \cdot 10^{-2}$
Базальты					
O	16,00	43,5	1332,4	82,7	$57,00 \cdot 10^{-2}$
Si	28,09	24,0	729,6	25,9	$17,80 \cdot 10^{-2}$
Al	26,98	8,76	266,2	9,9	$6,8 \cdot 10^{-2}$
Fe	55,85	8,56	260,2	4,67	$3,21 \cdot 10^{-2}$
Ca	40,08	6,72	214,2	5,35	$3,76 \cdot 10^{-2}$
Na	22,99	1,94	58,97	2,56	$1,79 \cdot 10^{-2}$
K	39,10	0,83	25,23	0,647	$4,51 \cdot 10^{-3}$
Mg	24,32	4,5	136,8	5,63	$3,94 \cdot 10^{-2}$
Σ		98,81	3023,7	137,357	$94,75 \cdot 10^{-2}$
Ti	47,90	0,9	27,36	0,572	$4,02 \cdot 10^{-3}$
H	1,008	0,18	5,472	5,44	$3,7 \cdot 10^{-2}$
P	30,98	0,14	4,256	0,138	$9,7 \cdot 10^{-4}$
Mn	54,94	0,2	5,08	0,111	$6,88 \cdot 10^{-4}$
Σ		1,42	42,17	6,26	$4,3 \cdot 10^{-2}$
S	32,07	0,03	0,912	$2,844 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
C	12,01	$1 \cdot 10^{-2}$	0,304	$2,53 \cdot 10^{-2}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$
Cl	35,46	$5 \cdot 10^{-3}$	0,152	$4,28 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Rb	85,48	$4,5 \cdot 10^{-3}$	0,1368	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
F	19,00	$3,7 \cdot 10^{-2}$	1,124	$5,93 \cdot 10^{-2}$	$4,16 \cdot 10^{-4}$
Sr	87,63	$4,4 \cdot 10^{-2}$	1,337	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$
Ba	137,36	$3 \cdot 10^{-2}$	0,912	$6,64 \cdot 10^{-3}$	$4,67 \cdot 10^{-5}$
Zr	91,22	$1 \cdot 10^{-2}$	0,304	$3,34 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-5}$
Cr	52,01	$2 \cdot 10^{-2}$	0,608	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$8,23 \cdot 10^{-5}$
V	50,95	$2 \cdot 10^{-2}$	0,608	$1,194 \cdot 10^{-2}$	$8,38 \cdot 10^{-5}$
Zn	65,38	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0,395	$6,05 \cdot 10^{-3}$	$4,25 \cdot 10^{-5}$
Σ		0,2235	6,792	0,1738	$1,21 \cdot 10^{-3}$

Элемент	Атомная масса	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	Атомные доли
Ni	58,69	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$48,6 \cdot 10^{-2}$	$8,29 \cdot 10^{-3}$	$5,82 \cdot 10^{-5}$
Cu	63,54	$1 \cdot 10^{-2}$	$30,4 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$3,56 \cdot 10^{-5}$
W	183,92	$1 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-2}$	$1,655 \cdot 10^{-6}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$
Li	6,94	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,56 \cdot 10^{-2}$	$6,57 \cdot 10^{-3}$	$4,61 \cdot 10^{-5}$
N	14,01	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$5,47 \cdot 10^{-2}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$2,74 \cdot 10^{-5}$
Ce	140,13	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$13,68 \cdot 10^{-2}$	$9,72 \cdot 10^{-4}$	$6,84 \cdot 10^{-6}$
Sn	118,70	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,56 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$
Y	88,92	$2 \cdot 10^{-3}$	$6,08 \cdot 10^{-3}$	$6,87 \cdot 10^{-4}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$
Nd	144,27	$2 \cdot 10^{-3}$	$6,08 \cdot 10^{-2}$	$4,22 \cdot 10^{-4}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$
Nb	92,91	$2 \cdot 10^{-3}$	$6,08 \cdot 10^{-2}$	$6,56 \cdot 10^{-4}$	$4,61 \cdot 10^{-6}$
Co	58,94	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$13,68 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$
La	138,92	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$8,20 \cdot 10^{-2}$	$5,93 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-6}$
Pb	207,21	$8 \cdot 10^{-4}$	$2,43 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$8,23 \cdot 10^{-7}$
Ga	69,72	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$5,47 \cdot 10^{-2}$	$7,85 \cdot 10^{-4}$	$5,52 \cdot 10^{-6}$
Mo	95,95	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$4,44 \cdot 10^{-5}$	$3,12 \cdot 10^{-7}$
Th	232,05	$3 \cdot 10^{-4}$	$9,12 \cdot 10^{-3}$	$3,93 \cdot 10^{-5}$	$2,74 \cdot 10^{-7}$
Σ		$5,729 \cdot 10^{-2}$	1,474	$3,02 \cdot 10^{-2}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$
Cs	132,91	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-7}$
Ge	72,61	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$4,35 \cdot 10^{-7}$
Be	9,01	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$9,85 \cdot 10^{-7}$
Sm	150,43	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$
Gd	156,90	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$
Pr	140,92	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$8,59 \cdot 10^{-5}$	$6,03 \cdot 10^{-7}$
Sc	44,96	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$7,29 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$
As	74,91	$2 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$8,14 \cdot 10^{-5}$	$5,72 \cdot 10^{-7}$
Hf	178,60	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-7}$
Dy	162,46	$2 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$3,74 \cdot 10^{-5}$	$2,63 \cdot 10^{-7}$
U	238,07	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$6,39 \cdot 10^{-6}$	$4,48 \cdot 10^{-8}$
B	10,82	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$9,97 \cdot 10^{-6}$
Yb	173,04	$2 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-7}$
Er	167,20	$2 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$3,63 \cdot 10^{-5}$	$2,55 \cdot 10^{-7}$
Ta	180,95	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$8,04 \cdot 10^{-6}$	$5,64 \cdot 10^{-8}$
Br	79,92	$3 \cdot 10^{-4}$	$9,12 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$
Ho	164,94	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-7}$
Eu	152,00	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
Sb	121,76	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$
Σ		$6,288 \cdot 10^{-3}$	$18,7 \cdot 10^{-2}$	0,00395	$2,77 \cdot 10^{-6}$
Tb	158,93	$8 \cdot 10^{-5}$	$2,43 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$
Lu	174,99	$6 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$
Tl	204,39	$2 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$2,97 \cdot 10^{-6}$	$2,09 \cdot 10^{-8}$
Hg	200,61	$9 \cdot 10^{-6}$	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$1,362 \cdot 10^{-6}$	$9,56 \cdot 10^{-9}$
I	126,91	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$
Bi	209,00	$7 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$7,04 \cdot 10^{-10}$
Tm	168,94	$2 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$3,62 \cdot 10^{-6}$	$2,45 \cdot 10^{-8}$
Cd	112,41	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$5,77 \cdot 10^{-4}$	$5,15 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-8}$
Ag	107,88	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$2,86 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$
In	114,76	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$4,47 \cdot 10^{-6}$	$3,14 \cdot 10^{-8}$
Se	78,96	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$
Σ		$2,95 \cdot 10^{-4}$	$8,98 \cdot 10^{-3}$	$6,02 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-7}$

Продолжение приложения 1

Элемент	Атомная масса	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	Атомные доли
Pd	106,70	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$5,35 \cdot 10^{-7}$	$3,76 \cdot 10^{-9}$
Pt	195,23	$1 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-8}$
Au	197,00	$4 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$4,28 \cdot 10^{-10}$
Te	127,01	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,39 \cdot 10^{-8}$	$1,68 \cdot 10^{-10}$
Rh	102,91	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$5,77 \cdot 10^{-6}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$	$1,27 \cdot 10^{-11}$
Re	186,31	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,125 \cdot 10^{-9}$	$7,85 \cdot 10^{-11}$
Ir	192,20	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$1,84 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-8}$
Os	190,20	$2 \cdot 10^{-6}$	$6,08 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
Ru	101,10	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$5,77 \cdot 10^{-6}$	$5,72 \cdot 10^{-8}$	$3,94 \cdot 10^{-11}$
Σ		$2,68 \cdot 10^{-5}$	$8,14 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$3,04 \cdot 10^{-8}$
Σ		100,52	3074,2	143,8	$99,2 \cdot 10^{-2}$

Примечания. 1. Таблица составлена по данным Б. Мэзона (1956 г.) для литосферы и А. П. Виноградова (1962 г.) для отдельных изверженных пород. 2. Плотность пород принята согласно различным авторам (округленно) для литосферы в целом — 2790; для гранитов 2700; для диоритов 2900; для базальта 3050; для перидотитов 3550 г/дм<sup>3</sup>.



## О ПРАВОАСИММЕТРИЧНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЗАПАСОВ «МАЛЫХ» МЕТАЛЛОВ В ОТДЕЛЬНО ВЗЯТЫХ РУДНЫХ ТЕЛАХ И МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

В § 10 приведены доказательства правоасимметричного распределения запасов «малых» металлов внутри отдельно взятых рудных тел и месторождений этих металлов. Эти доказательства, по существу, построены на обычных химических и кристаллизационных представлениях и, необходимо признать, имеют некоторые слабые стороны. Это и побудило искать дополнительные, более универсальные доказательства рассматриваемой проблемы. В поисках таких доказательств авторы обратились к достижениям химической науки в последние два десятилетия. Одним из основных источников помимо перечисленных в списке использованной литературы явился труд Ю. А. Макашева и В. М. Замяткиной «Соединения в квадратных скобках». Л., «Химия», 1976. 216 с.

Основываясь прежде всего на этом источнике и используя не столько конкретные факты, непосредственно касающиеся рассматриваемого вопроса (их ничтожно мало), сколько общие, достигнуты результаты и твердо наметившиеся тенденции развития химических наук на базе координационной комплексной теории и квантово-механических закономерностей, удалось изыскать ряд доказательных положений.

Известно, что в современной химии широким распространением пользуются взгляды Вернера, в основе которых лежат координационная теория и представления о пространственном строении химических соединений. Подобные соединения получили общее название комплексных. Подытоживая все известное об этих соединениях, можно заключить, что координационные стереохимические комплексы:

- 1) составляют весьма широкую, уходящую за пределы валентных, далеко еще не исчерпанную область химических соединений часто с необычными компонентами и свойствами. Здесь прежде всего имеются в виду комплексные соединения, содержащие инертные газы и состоящие из ряда молекул более простых веществ, каждая из которых способна существовать самостоятельно;
- 2) включают в себя большую группу весьма прочных соединений всех металлов с разными лигандами, устойчивых в широком интервале давлений и температур, притом насыщенных металлами в различной степени. Здесь в первую очередь имеются в виду кроме простейших металлических комплексов более сложные соединения (многоядерные соединения, включающие в себя несколько «центральных» атомов, особенно свойственные октаэдрическим аммиакатам и аминам металлов; внутрикомплексные соединения, многие из которых способны существовать в парообразном состоянии без изменений; соединения с макромолекулярными лигандами, обладающие полимерными многоатомными молекулами; соединения с макроциклическими лигандами, образующие особо устойчивые комплексы, с высокой молекулярной массой; наконец, открытые в самое последнее время разнообразные сверхкомплексные

соединения, в которых в качестве лигандов выступают более простые вернеровские комплексы). Вся эта группа соединений в совокупности может обеспечить устойчивое металлическое комплексное образование с любым сколько угодно высоким удельным содержанием металла;

3) содержат в себе многие соединения, обладающие способностью сохранять свои особенности внутренней структуры и состава в паровой (газообразной) фазе и диссоциировать при переходе в жидкую. Здесь имеются в виду в первую очередь так называемые хелатные («клешневидные») комплексные соединения, в которых центральный металлический ион как бы зажат между лигандами; в качестве последних чаще всего в этом случае выступают этилендиамин и аммиакааты.

В настоящее время все существующие гипотезы постмагматического и в первую очередь гидротермального рудообразования в химической части безоговорочно принимают некоторые положения координационно-комплексной теории соединений. Это сразу избавляет от двух трудностей, с которыми сталкивались прежние гипотезы.

1. Исчезает необходимость связывать образование рудоносных растворов-расплавов с растворимостью известных рудных и жильных минералов и возникают широкие возможности использовать в этих целях многообразный мир комплексных соединений.

2. Снимается вопрос о непомерных объемах воды, необходимых для рудопереноса в виде растворенных собственных минералов, и об ее источниках, связанный с весьма низкой растворимостью этих минералов. Как известно, растворимость металлов в комплексных соединениях во много раз (до десятков — сотен тысяч раз) выше растворимости их в виде минералов.

Следует подчеркнуть, что эти положения в большей мере являются логическими построениями на базе успехов смежной химической науки, нежели опираются на опытные данные, непосредственно полученные при условиях рудопереноса ( $T = 700 \div 400^\circ \text{C}$ ;  $p = n \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$ ).

В связи со всем изложенным возникает законный вопрос: а что мешает распространить на рудоносный раствор-расплав все особенности, которые характерны для комплексных растворов-расплавов, и в частности особенность возникновения и осуществления в газообразной фазе соединений различной насыщенности металлами, подобно перечисленным в п. 2 комплексным соединениям, в особенности «сверхкомплексным»? По мнению авторов, никаких препятствий к этому нет, и положительное полное решение этого вопроса не будет иметь более слабые основания, чем это имело место при частичном решении. В соответствии с этим авторы принимают, что при становлении рудоносной гидротермы в газообразную фазу ее существования ( $600\text{—}800^\circ \text{C}$ ) возникают и далее сосуществуют комплексные и сверхкомплексные соединения, несущие в себе различные удельные количества металла (в расчете на единицу объема рудоносной субстанции) от минимальных и до максимальных возможных для данных условий. Иными словами, подобный комплексный флюид вполне может быть уподоблен газовой смеси, в которой роль отдельных компонентов играют однородные комплексы.

Закономерностями, управляющими возникновением подобных «квантовых» образований являются, с одной стороны, закон Больцмана и, с другой — термодинамический расход энергии на создание единицы объема рудоносного образования.

При постепенном падении температуры от  $600\text{—}800^\circ \text{C}$  и до температуры ниже критической ( $374^\circ \text{C}$ ) металлоносные комплексы диссоциируют в водной среде, происходит реакция минералообразования и рудная нагрузка гидротермы выпадает в осадок, где совместно с непрерывно высаживающимся кварцем (по Г. Д. Холланду) создает разнообразные по содержанию руды. С принятием подобной схемы рудоотложения отпадает ряд трудностей, которые иначе требуют специального пояснения. Так, отпадают какие-либо термодинамические сомнения, поскольку весь процесс управляется основными термодинамическими закономерностями; рудообразование приобретает закономерный универсальный для всех металлов характер и исчезает необходимость какого-либо приспособления его к индивидуальным качествам отдельных металлов;

становится понятным, почему максимум рудоотложения приходится на интервал температуры от 400°С и ниже, поскольку именно с этой температуры возникает устойчивая водная фаза; не вызывает удивления факт хаотического распределения металла в рудном теле при закономерном количественном распределении проб (запасов) по содержаниям, поскольку, как бы ни были перемешаны отдельные комплексные соединения друг с другом, их количественные соотношения оказываются определенными законом их возникновения. Так как закон распределения содержаний запасов в рудообразующем флюиде задается формулами Больцмана, что в совокупности приводит к правоасимметричной кривой распределения запасов в функции от содержания, то и в руде, очевидно, должны проявиться эти закономерности. Таким образом, можно считать достаточно теоретически обоснованным вывод о том, что в отдельно взятом постагматическом рудном теле или месторождении распределение запасов в функции от содержания носит правоасимметричный характер и может аппроксимироваться выведенными теоретическими кривыми.

Естественно, что каждый химический элемент, входящий в состав руды, в процессе образования рудоносного флюида и его переноса принимает наиболее свойственную форму его существования в комплексном соединении. Этому благоприятствуют предельно большое количество сосуществующих в рудоносной субстанции элементов и обычно долгое время существования этой субстанции. Эти наиболее свойственные формы существования будут постепенно достигнуты. Однако в настоящее время не накоплено экспериментально проверенных данных, касающихся этого вопроса в условиях реальных температур и давлений, существующих в рудоносном флюиде, по отношению к большинству рудообразователей. Это и составляет одну из главных задач экспериментального рудообразования. Тем не менее для отдельных элементов, в том числе рассмотренных выше, некоторые данные можно привести.

Этилендиамин меди  $[\text{Cu}(\text{H}_4\text{C}_2 \cdot 2\text{NH}_2)]$  представляет собой одно из многочисленных комплексных соединений этого металла. Соединение принадлежит к числу хелатов и поэтому является особо прочным. Обладает способностью создавать многоядерные и сверхкомплексы, характеризуемые высокой насыщенностью металлом. Устойчиво в газовой фазе (вероятно, именно в виде этого соединения или ему подобных аммиакатов и аминатов) медь существует и переносится в надкритических условиях. Сравнительный анализ теоретической и практических кривых распределения запасов в функции содержания (§ 9) показал практически полное их совпадение.

Олово, по данным В. Л. Барсукова, участвует в рудогенезе в виде комплекса  $[\text{Sn}(\text{OH}, \text{F})_6]$ , способного создавать многоядерные комплексы. Не лишено оснований и предложение о вхождении олова в одно из многочисленных полигалогенидных комплексных соединений, характеризующихся тем, что центральным ионом в них является галогенид-ион  $\text{X}^-$ , а лигандами — молекулы галогенов с металлом; эти соединения способны создавать полимеры с металлами. Так или иначе, олово существует и переносится во флюиде в виде многоатомных металлических комплексов. Имеющиеся материалы позволяют предполагать правоасимметричность кривой «запасы—содержание».

Для золота имеется очень мало материалов по его поведению в рудоносном флюиде. Однако общие соображения позволяют предполагать схожесть его поведения там с другими металлами. Интересно отметить, что на практике кривая распределения «запасы — содержание» подобна теоретической.

Железо, по-видимому, переносится в виде хлоридных комплексов; теоретическая кривая «запасы — содержание» отвечает его практической кривой.

Итак, задача распределения запасов в отдельно взятом рудном теле и месторождении уверенно решается с позиций координационно-комплексной теории химических соединений и однозначно приводит к заключению о правоасимметричном характере распределения запасов металла в зависимости от его содержания в рудах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аранга Р. Состояние медной промышленности. Ч. 2.— «Реф. журн. Геология», 1958, № 5, с. 153—154.
2. Барнс Х. Л., Чаманский Г. К. Растворимость и перенос рудных минералов.— В кн.: Геохимия гидротерм. рудн. месторождений. М., «Мир», 1970, с. 286—324. (Сер. Науки о Земле).
3. Барсуков В. Л. Основные черты геохимии олова. М., «Наука», 1974. 148 с.
4. Барт Т. Теоретическая петрология. М., ИЛ, 1956. 414 с.
5. Белевцев Я. Н., Коваль В. Б., Николаенко В. И. Современные проблемы эндогенного рудообразования. Киев, «Наукова думка», 1972. 232 с.
6. Бельчанская Л. Н., Максимова В. П. Особенности эндогенных и экзогенных геохимических ореолов сульфидно-касситеритовых месторождений Якутии.— В кн.: Литогеохимические методы при поисках скрытого оруденения. М., 1972, с. 37—38. (Ин-т АН СССР минералогии, геохимии и кристаллохимии руд элементов.)
7. Бетехтин А. Г. Курс минералогии. Изд. 2. М., Госгеолтехиздат, 1956. 558 с.
8. Борель Э. Вероятность и достоверность. М., «Наука», 1969. 112 с.
9. Вахрушев В. А. Минералогические, геохимические и генетические типы контактово-метасоматических железных руд месторождений Алтае-Саянской области. М., «Наука», 1965. 291 с.
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969. 576 с.
11. Вернадский В. И. История минералов земной коры. Т. 2. Л., Изд-во АН СССР, 1923—1936. 562 с.
12. Вернадский В. И. Парагенезис химических элементов в земной коре.— В кн.: Избранные сочинения. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1954, с. 395—410.
13. Вернадский В. И. Очерки геохимии.— В кн.: Избранные сочинения. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1954, с. 7—394.
14. Вернадский В. И. О рассеянии химических элементов.— В кн.: Избранные сочинения. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1954, с. 519—527.
15. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М., Изд-во АН СССР, 1950. 235 с.
16. Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры.— «Геохимия», 1962, № 7, с. 555—565.
17. Воронов П. С. В глубины планеты. Проект верхней мантии Земли. Л., 1969. 22 с. (Геогр. о-во СССР.)
18. Вукалович М. П., Новиков И. И. Термодинамика. М., «Машиностроение», 1972. 672 с.
19. Гаврусевич Б. А. Основы общей геохимии. М., «Недра», 1968. 328 с.
20. Гаррелс Р. М., Крайст Ч. Л. Растворы, минералы, равновесия. М., «Мир», 1968. 368 с.
21. Генезис эндогенных рудных месторождений. М., «Недра», 1968. 719 с. Авт.: В. И. Смирнов, М. Н. Годлевский, В. Д. Никитин и др.

22. *Геология, минералогия и геохимия Комсомольского района*. М., «Наука», 1971. 335 с. Авт.: Е. П. Раткевич, В. Я. Асманов, Ю. И. Бакулин и др.
23. *Григорян С. В., Федотова Г. Э., Беспалов Н. И.* О перспективах рудоносности восточного фланга Курусайского рудного поля (по данным геохимического опробования).— «Геохим. методы при поисках и разведке руд. месторождений», 1968, вып. 1, с. 4—26.
24. *Григорян С. В., Федотова Г. Э., Дегтярев В. С.* Геохимические поиски слепого полиметаллического оруденения в Курусайском рудном поле.— «Геохим. методы при поисках и разведке руд. месторождений», вып. 1. М., «Недра», 1968, с. 27—59.
25. *Гринберг А. А.* Введение в химию комплексных соединений. Л., «Химия», 1971. 631 с.
26. *Гудалин Г. Г., Ковалев Ф. Н.* Оценка месторождений при поисках и разведках, вып. 6 (медь). М., Госгеолтехиздат, 1957. 157 с.
27. *Дана Э. С.* Описательная минералогия. Справочник. Л.— М., Госгеолтехиздат, 1937. 423 с.
28. *Дей К., Селбин Д.* Теоретическая неорганическая химия. М., «Химия», 1969. 432 с.
29. *Домарев В. С.* О метаморфогенном рудообразовании.— «Сов. геология», 1967, № 4, с. 6—17.
30. *Евангулов Б. Б., Арский Ю. М., Лир Ю. В.* Закономерности концентрации промышленных запасов в оловорудных районах, месторождениях и рудных телах.— «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1967, т. 2, вып. 2, с. 122—128.
31. *Желтов Ю. П.* Гидравлический разрыв пласта. Обзор зарубежной практики. Л., Госгостехиздат, 1957. 76 с.
32. *Желтов Ю. П.* Деформация горных пород. Л., «Недра», 1966. 197 с.
33. *Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А.* Физическая химия. М., «Металлургия», 1964. 676 с.
34. *Захарченко А. И.* Минералообразующие растворы и генезис кварцевых жил. М., Госгеолтехиздат, 1955. 106 с.
35. *Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д.* Элементы прикладной математики. М., «Наука», 1967. 648 с.
36. *Иванов Н. П., Мещеряков С. С.* Примеры оценки потенциальной рудоносности рудных районов.— «Методика и техника разведки», 1973, № 89, с. 24—29.
37. *Использование первичных ореолов при геологической съемке масштаба 1 : 50 000.*— «Геохим. методы при поисках и разведке руд. месторождений», 1971, вып. 3, с. 39—64. Авт.: С. В. Григорян, Г. Г. Гулиев, В. И. Морозов, Р. Г. Оганесян.
38. *Керн Р., Вайсброд Е. А.* Основы термодинамики для минералогов, петрографов и геологов. М., «Мир», 1966. 279 с.
39. *Киреев В. А.* Курс физической химии. Изд. 3. М., «Химия», 1975. 775 с.
40. *Кормилицын В. С.* Мезозойские рудные формации Забайкалья.— Автореф. докт. дис. Л., 1969. 56 с. (Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-т.)
41. *Котляр В. Н.* Основы теории рудообразования. Общий курс месторождений полезных ископаемых. М., «Недра», 1970. 464 с.
42. *Красников В. И.* Основы рациональной методики поисков рудных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1959. 411 с.
43. *Краткий справочник физико-химических величин*. Л., «Химия», 1970. 200 с.
44. *Краускопф К. В.* Горные породы как источник металлоносных флюидов.— В кн.: Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М., «Мир», 1970, с. 11—39. (Сер. Науки о Земле.)
45. *Курс месторождений твердых полезных ископаемых*. Л., «Недра», 1975. 632 с. Авт.: П. М. Татариннов, А. Е. Карякин, А. С. Голиков и др.
46. *Магнетогидродинамический метод получения электроэнергии*. Вып. 3. М., «Энергия», 1972. 360 с.
47. *Матерон Ж.* Основы прикладной геостатистики. М., «Мир», 1968. 408 с. (Сер. Науки о Земле.)

48. Мельник Ю. П. Справочник термодинамических констант для анализа условий образования железных руд. Киев, «Наукова думка», 1972. 196 с.
49. Мещеряков С. С., Бок И. И. Использование первичных ореолов при оценке оловорудных объектов.— В кн.: Геохимические методы при поисках месторождений олова, вольфрама, ртути. Владивосток, 1975, с. 44—45.
50. Мещеряков С. С., Рыбакова Т. Г. Использование параметров первичных ореолов при оценке и разведке оловорудных объектов.— «Методика и техника разведки», 1975, № 95, с. 38—41.
51. Некрасов В. В. Курс общей химии. М., Госхимиздат, 1952. 971 с.
52. Ноздрев В. Ф. Курс термодинамики. М., «Высш. школа», 1961. 252 с.
53. Овчинников Л. Н., Григорян С. В. Закономерности состава и строения первичных геохимических ореолов сульфидных месторождений.— В кн.: Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Иркутск, 1970, с. 3—36.
54. Оловодобывающая промышленность Боливии.— «Науч.-техн. информация МГ и ОН СССР», 1962, бюл. № 2. М., Госгеолтехиздат, с. 87—89.
55. Опыт поисков эндогенного оруденения по первичным ореолам в Рудном Карамазаре.— В кн.: Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Иркутск, 1970, с. 161—197. Авт.: С. В. Григорян, Н. И. Беспалов, М. А. Зубов и др.
56. Оценка рудопроявлений олова. Л., ОНТИ ВИТР, 1975. 35 с. Авт.: С. С. Мещеряков, Н. А. Пишпарева, Т. Г. Рыбакова и др.
57. Пелиссонье А. О распределении меди, добываемой на Земле.— В кн.: Распространенность элементов в земной коре. Под ред. Л. Аренса, М., «Мир», 1972, с. 242—251.
58. Петров В. П., Лизунов Н. В. Содержания микроэлементов в уральских огнеупорных глинах.— «Вопр. минералогии, геохимии, петрографии». М., Изд-во АН СССР, 1946, с. 431—445.
59. Пфанн В. Зонная плавка. М., «Мир», 1970. 368 с.
60. Радушкевич Л. В. Курс статистической физики. М., «Просвещение», 1966. 420 с.
61. Разуковский Н. К. Логарифмически нормальный закон распределения вещества и его свойства.— «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1948, т. 20, с. 105—121.
62. Рингвуд А. Э., Грин Д. Х. Экспериментальное изучение перехода габбро в эклогит и некоторые геофизические выводы.— В кн.: Петрология верхней мантии. М., 1968, «Мир», с. 78—117.
63. Рудные месторождения СССР (в 3 томах). Т. 1. М., «Недра», 1974. 328 с.
64. Румер Ю. Б., Рывкин М. Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М., «Наука», 1972. 400 с.
65. Савельев И. В. Курс общей физики. М., «Наука», 1973, т. 1. 512 с. Т. 2. 432 с.
66. Сауков А. А. Геохимия. М., Госгеолтехиздат, 1951. 383 с.
67. Сафронов Д. Н. Пример распределения рудных запасов в полиметаллических месторождениях.— «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1966, т. 50, вып. 2, с. 106—112.
68. Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., Всесоюз. науч.-исслед. ин-т методики и техники разведки, 1962. Ч. 1. 145 с.; Ч. 2. 165 с.
69. Сафронов Н. И. Основные термодинамические закономерности при изучении энергии рудообразования.— «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1966, т. 50, вып. 2, с. 17—31.
70. Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., «Недра», 1971. 216 с.
71. Сафронов Н. И., Сафронов Д. Н. О вероятных закономерностях распределения запасов металлов в земной коре.— «Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та методики и техники разведки», 1964, № 44, с. 61—91.
72. Сафронов Н. И., Ланн М. А., Мещеряков С. С. Научные основы поисков глубокозалегающих месторождений.— В кн.: Научные основы геохимиче-

ских методов поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Иркутск, 1970, с. 37—78.

73. Смирнов В. И. Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. М., Моск. гос. ун-т, 1954, 546 с.

74. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. М., «Недра», 1969, 687 с.

75. Смит Г. Ф. Физическая геохимия. М., «Недра», 1968, 476 с.

76. Смольянинов Н. А. Практическое руководство по минералогии. М., Госгеолтехиздат, 1955, 431 с.

77. Соловов А. П., Гаранин А. В., Анапченко А. Д. Математическая обработка геохимических данных при геологосъемочных работах.— В кн.: Геохимические методы при поисках и разведке рудных месторождений. М., «Недра», 1971, с. 102—116.

78. Судовиков Н. Г. Метаморфогенное рудообразование.— «Сов. геология», 1965, № 1, с. 105—119.

79. Телеснин Р. В. Молекулярная физика. М., «Высш. школа», 1973, 360 с.

80. Ферман А. Е. Геохимия. Избранные труды. М., Изд-во АН СССР, 1955—1958. Т. 3. 798 с. Т. 4. 588 с.

81. Хелгесон Г. К. Комплексообразование в гидротермальных растворах. М., «Мир», 1967, 184 с.

82. Холланд Г. Д. Жильные минералы в гидротермальных месторождениях.— «Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М., «Мир», 1970, с. 325—366. (Сер. Науки о Земле.)

83. Шамбадаль П. Развитие и приложения понятия энтропия. М., «Наука», 1967, 280 с.

84. Эмануэль Н. М., Кнорре Д. С. Курс химической кинетики. Изд. 3. М., «Высш. школа», 1974, 400 с.

85. Энгельс Ф. Диалектика природы. М., Госполитиздат, 1952, 328 с.

86. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М., «Наука», 1974, 942 с.

87. Allais M. Méthode d'évaluation des perspectives économique de la recherche minière sur des grandes espaces. Application au Sahara Algerien.— Rev. de l'industrie mineral. recherche minière, spec. I—R, janvier, 1956, p. 329—382.

88. Bates R. C. Application of statistical analysis to exploration for uranium of the Colorado Plateau.— Econom. Geol., 1959, vol. 54, № 3, p. 449—466.

89. Blondel F. Les lois statistique de la répartition géographique des production minière.— Rev. de l'industrie mineral. recherche minière, spec. I—R, janvier, 1956, p. 319—327.

90. Krige D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwaters Rand.— Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 1951, vol. 52, № 6, p. 119—139.

91. Lasky S. G. How tonnage and grade relation help predict ores reserves.— Engng. Mining Journ., April, 1950, p. 81—89.

92. Mason B. Principles of Geochemistry. Ed. 2. N.-Y., 1933, 276 p.

93. Rankama K., Sahama T. Geochemistry. Ed. 2. Chicago, 1955, 631 p.

94. Slichter L. B. The need of a new philosophy of prospecting.— Mining Engng., 1960, vol. 12, № 6, p. 570—577.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Глава I. Основные геолого-геохимические предпосылки . . . . .	6
§ 1. Краткие сведения об особенностях физического и химического строения Земли . . . . .	—
§ 2. Особенности поведения рудообразующих элементов в литосфере . . . . .	11
§ 3. Генетические связи между всеобщим рассеянием рудообразующих элементов и их глубинными концентрациями . . . . .	16
§ 4. Гидротермальный класс глубинных месторождений и его характеристика . . . . .	19
Глава II. Основные сведения по термодинамике и расчет энергии рудообразования . . . . .	26
§ 5. Общие сведения из термодинамики и физико-химии . . . . .	—
§ 6. Энергия рудообразования, геолого-энергетическая схема ее проявления, обобщенные условия и принципы ее расчета . . . . .	38
§ 7. Основы расчета энергии рудообразования, необходимой на создание единицы объема гидротермальной руды заданной кондиции . . . . .	46
§ 8. Структура энергетического очага по Л. Больцману . . . . .	57
§ 9. Расчет дифференцированных запасов металлов в зависимости от их содержаний в рудах . . . . .	60
§ 10. Возможности использования закономерностей распределения металла в отдельно взятых рудных телах . . . . .	90
§ 11. Основы расчета перспективных запасов руд в месторождениях, образованных системой рудных тел . . . . .	106
Глава III. Результаты использования теории в практике геологических работ . . . . .	118
§ 12. Энергия рудообразования при геохимическом картировании . . . . .	120
§ 13. Расчет энергии рудообразования для характеристики руд сложного состава и комплексных ореолов . . . . .	127
§ 14. Использование распределения региональных запасов для оценки рудных перспектив территорий . . . . .	158
§ 15. Примеры использования в практике закономерностей трещинообразования . . . . .	186
Заключение . . . . .	194
Приложение 1. Содержания элементов в литосфере и в главнейших типах изверженных пород . . . . .	199
Приложение 2. О правоасимметричном распределении запасов «малых» металлов в отдельно взятых рудных телах и месторождениях . . . . .	208
Список литературы . . . . .	211



ИБ № 2208

НИКОЛАЙ ИЛЬИЧ САФРОНОВ  
СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ МЕЩЕРЯКОВ  
НИКОЛАЙ ПАВЛОВИЧ ИВАНОВ

**ЭНЕРГИЯ РУДООБРАЗОВАНИЯ  
И ПОИСКИ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Редактор издательства *Э. К. Андрюкина*. Переплет художника *Ю. И. Прошлецова*.  
Технический редактор *Н. П. Старостина*. Корректор *Н. Д. Баримова*.

Сдано в набор 11.11.77. Подписано в печать 20.03.78. М-25791.  
Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Печ. л. 13<sup>1/2</sup>. Уч.-изд. л. 14,57. Тираж 1500 экз. Заказ 733/461. Цена 2 р. 50 к.

Издательство «Недра», Ленинградское отделение. 193171, Ленинград, С-171,  
ул. Фарфоровская, 12.  
Ленинградская картографическая фабрика объединения «Аэрогеология».