

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР



ВИТР

**РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ  
ПРИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТАХ  
[методические рекомендации]**



ЛЕНИНГРАД 1976

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР

Научно-производственное объединение "Геотехника"

---

Всесоюзный научно-исследовательский институт  
методики и техники разведки (ВИТР)

УДК 550.84:519

РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ  
ПРИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТАХ  
(методические рекомендации)

777/

Ленинград  
ОНТИ ВИТР  
1976



Составлены Всесоюзным научно-исследовательским институтом методики и техники разведки и изданы в соответствии с планом издания литературы ВИТР

Составители: Н.И.Сафронов, С.С.Мещеряков

Научный редактор Н.И.Марочкин

УДК 550.84:519

Расчет энергии рудообразования при поисково-оценочных работах (методические рекомендации). Составители: Сафронов Н.И., Мещеряков С.С. Л., ОНТИ ВИТР, 1976, 90 стр.

Возникновение в земной коре месторождений полезных ископаемых на фоне и за счет всеобщего рассеяния элементов происходит путем разделения и перемещения земного вещества с обязательной затратой соответствующего вида и количества энергии, подчиняющейся определенным математическим закономерностям, связывающим запасы руд месторождений с содержаниями в этих рудах ведущих (находящихся в промышленных концентрациях) рудных элементов. В качестве основы указанных закономерностей использованы законы термодинамики о взаимосвязях и взаимопревращениях энергии. Эти законы и представления об энергии рудообразования используются в целях перспективной оценки отдельных рудных объектов, рудных районов и полей и более крупных металлоносных территорий.

В работе приведены результаты применения расчетов энергии рудообразования в практике геологических работ.

Таблиц - 32. Рисунков - 20.

## И. В в е д е н и е

И.1. Одной из основных целей геологической службы является обеспечение горнодобывающей (и, следовательно, металлургической) промышленности запасами соответствующих руд в недрах. Поэтому масштабы ежегодного прироста запасов, следуя закономерностям управляющим развитием металлургии, непрерывно возрастают.

В связи с этим и трудности, с которыми приходится сталкиваться при решении геологоразведочных задач, нарастают пропорционально масштабам требуемых запасов, поскольку год от года все заметнее истощаются запасы легко обнаруживаемых руд, и прирост запасов приходится покрывать за счет руд более трудно обнаруживаемых и находящихся на больших глубинах.

И.2. На ближайшие 20-30 лет, как это следует из рассмотрения всех возможных источников восполнения запасов, в качестве генерального необходимо рассматривать месторождения современных кондиций, но залегающие на глубинах ниже освоенного ныне горизонта, который можно определить в среднем в 400-500 м, хотя местами (Витватерсранд, Колар, Минас Жераес) он уже достигает 3000-3500 м. Таким образом устанавливается верхняя цифра. Нижнюю цифру допустимо считать 900-1000 м, когда мощность слоя, подлежащего опосредованному и разведке, определяется цифрой 500 м. Это такой слой земной коры, который по опыту многолетней эксплуатации недр вышележащего слоя такой же мощности должен в полной мере обеспечить потребности металлургии в высококачественном сырье на ближайшие два-три десятилетия.

И.3. Однако поиски и разведка месторождений, расположенных ниже освоенного слоя земной коры, сопряжены со значительными трудностями в связи с отсутствием разработанных (уверенных) наземных и воздушных поисковых признаков для руд, залегающих на таких глубинах, и повышением сложности бурения глубоких скважин. Все это без коренного усовершенствования методики геологоразведочных работ для этих повышенных глубин должно будет резко увеличить стоимость поисков и разведки в расчете на 1 т сырья.

Поэтому основной задачей работников геологической службы страны в настоящее время является осуществление мероприятий, которые способствовали бы ослаблению неблагоприятного влияния глубинности при разведке месторождений полезных ископаемых. В этом отношении намечаются три пути:

а. Снижение объемов дорогостоящих поисково-разведочных работ и, в частности, бурения на I т разведанного сырья путем комплексного проведения этих работ с широким привлечением скважинных геофизических, физико-химических и геохимических методов.

б. Снижение стоимости единицы буровых работ путем исключительно использования алмазного бурения в его самых современных вариантах исполнения.

в. Достижение максимальной информативности в результате проведения геологоразведочных работ при минимальном расходе их объемов.

I.4. Не касаясь деталей, отметим, что предполагается значительное увеличение эффективности от использования физико- и химико-математических методов. Обещающим в этом отношении представляется использование математических закономерностей, связывающих запасы руд с содержаниями в этих рудах ведущих рудных элементов.

В связи с этим возможно в качестве основы использовать термодинамику - точную науку о взаимопереходах, взаимосвязях и взаимопревращениях энергии, подчиняющихся строгим количественным закономерностям. Основанием к выбору именно термодинамики служат следующие простые соображения. На самом деле, какие бы месторождения полезных ископаемых мы ни взяли, их возникновение 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 немислимы без затрат соответствующих видов и количеств энергии, а последняя и является предметом изучения в термодинамике.

I.5. Эти именно соображения и послужили основаниями к проведению в ВИГРе первоначальных исследований в изложенном выше направлении. Результаты этих исследований показали, что, следуя по пути использования понятия "энергия рудообразования" и основных термодинамических закономерностей, действительно удается приблизиться к пониманию взаимосвязей "запасы руды - содержание металлов в рудах" и, более того, вывести соответствующие математические выражения, характеризующие эти взаимосвязи. В сборе и обработке материалов помимо составителей большое участие принимали Н.П.Иванов, И.И.Бок, И.В.Касьянова, А.Г.Винс, М.В.Вознесенская.

## 2. Общие положения

2.1. Земля как физическое тело имеет своеобразную форму, именуемую геоидом. С достаточной степенью приближения геоид может быть уподоблен эллипсоиду вращения с осями: полярной, равной 12713,7 км, и экваториальной - 12756,6 км, при среднем радиусе 6371,0 км; сплюснутость 1/298. Объем земли равняется 1083 млрд. км<sup>3</sup>, масса - 5.98·10<sup>24</sup> г, средняя плотность 5,517 г/см<sup>3</sup>. Поверхность земли равна примерно 510 млн./км<sup>2</sup>, из которых на долю суши приходится около 149 млн.км<sup>2</sup>, а на водную поверхность морей и океанов 361 млн.км<sup>2</sup>.

2.2. Общепринято представление о трехслойном внутреннем строении Земли: внутреннее ядро, мантия и двухэтажная кора. Кора в свою очередь перекрыта двумя однородными оболочками гидро- и атмосферами и, кроме того, гетерогенной биосферой, захватывающей верхний этаж коры, всю гидросферу и частично тропосферу.

2.3. Данные по химическому составу оболочек Земли приведены в табл. I.

Таблица I

Геоосферы	Масса		Элементы геосферы			
	в долях Земли, %	в долях верхнего этажа коры, %	главные		второстепенные	
			Число элементов и их наименование	Сумма кларков, вес. %	Число элементов	Сумма кларков, вес. %
Биосфера	-	9,4 · 10 <sup>-5</sup>	11 (C, O, N, H, Ca, S, P, Na, K, Cl, Mg)	99,69	81	0,31
Атмосфера	-	0,028	3 (N, O, Ar)	99,80	89	0,20
Гидросфера	0,01	6,46	5 (O, H, Cl, Na, Mg)	99,77	87	0,22
К Гранитоидный этаж		93,51	8 (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg)	98,69	84	1,31
Р Базальтовый этаж	0,15	-	7 (O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na)	97,98	85	2,54
М Верхний горизонт верхней мантии		-	6 (O, Mg, Si, Fe, Al, Ca)	98,23	86	1,83
Н Нижние горизонты мантии	67,0	-	8 (O, Fe, Si, Mg, S, Ca, Ni, Al)	97,05	84	2,95
И						
Я						

2.4. Основными выводами из данных о химическом строении Земли являются:

а. При использовании надлежащих средств и методов исследования в любой пробе любого геологического образования всегда устанавливается присутствие всех элементов периодической системы Менделеева в свойственных этим элементам содержаниях. Созданные на основе обработки громадного количества подобных геохимических проб таблицы средних содержаний элементов – иначе таблицы кларков элементов по геосферам, должны рассматриваться не как абстрактные средние математического уравнения, а как статистически верно отображающие реальные содержания элементов в этих геосферах, служа неоспоримым фактическим доказательством повсеместного рассеянного распространения всех элементов в природе – иначе закона Кларка–Вернадского.

б. Средние содержания отдельных элементов (иначе их кларки) распределены в геосферах крайне неравномерно. В то время как ограниченное меньшинство их практически целиком составляет массу соответствующих геосфер, подавляющее большинство элементов, включая все главные рудообразующие, присутствует в тех же геосферах в совершенно ничтожных содержаниях, определяемых тысячными, десятитысячными и еще меньшими долями весовых процентов.

в. Главнейшие рудообразующие металлические элементы, такие как медь, свинец, цинк, никель, кобальт, олово, вольфрам, молибден, уран, торий, благородные металлы представлены в Земле, особенно в верхних ее геосферах в ничтожных содержаниях, так что суммы табличных кларков этих элементов не поднимаются выше первых сотых долей весовых процентов. Одновременно в этих геосферах такие металлы как железо и алюминий играют роль важных породообразователей. Только начиная с мантии и глубже железо начинает выступать в роли рудообразователя и одновременно несколько повышается такое же значение никеля.

г. Лишь в самом верхнем гранитоидном слое Земли установлены местные концентрации – месторождения многих элементов рудообразователей, однако, как увидим ниже, довольно редкие и даже суммарно не играющие какой-либо заметной роли в общем балансе запасов металлов в Земле. В других каменных оболочках Земли признаков подобных концентраций не установлено.

2.5. Химические элементы в Земле проявляются, во-первых, или в явной форме, в виде собственных минералов, т.е. определенных природных химических соединений, подчиняющихся стехиометрическим отношениям и обычно окристаллизованных, или же в неявном, скрытом виде тех или иных примесей в минералах чуждого состава, без того чтобы создавать собственные минералы. Во-вторых, независимо от того, про-

является ли элемент в явном минеральном или в неявном скрытом виде, он одновременно может находиться либо в состоянии повсеместного рассеяния, с однообразными (низкими для рудообразующих элементов) содержаниями (кларками), либо в состоянии концентрации на локальных участках с содержаниями, выделяющимися положительно на фоне всеобщего рассеяния.

2.6. Совершенно аналогично геологическим понятиям "первичные" и "вторичные" минералы в геохимическом рассеянии рационально различать первичное и вторичное рассеяния. Под первичным, иначе первично-конституциональным, или сингенетичным рассеянием понимается рассеяние, возникающее в носителях (породах, минералах, иных геологических продуктах) одновременно и параллельно с их становлением и являющееся их неотрывной частью. Именно первично-конституциональное рассеяние определяет кларки элементов и является тем неизбежным фоном, на котором осуществляются любые геохимические исследования; происхождение этого класса рассеяния стоит в прямой и непосредственной связи с изначальным перемешиванием элементов при расплавлении Земли.

Вторично-наложенным (эпигенетичным) рассеянием называется такое, которое возникает в носителях после их образования (и первичного рассеяния в них). К этому подклассу всеобщего рассеяния относятся имеющие первостепенное поисковое значение первичные и вторичные ореолы месторождений и их потоки рассеяния. Удельный вес этого рассеяния мал и определяется всего  $\sim 10^{-2}\%$  от масс сингенетичного рассеяния.

Принято называть концентрированным такое существование элемента в литосфере, когда содержания его превосходят региональные или местные кларки (с учетом их неизбежных флюктуаций). В качестве показателя степени концентрации А.Е.Ферсманом введено очень удобное понятие кларка концентрации. Под этим понимается отношение содержания данного элемента в данном геологическом материале к региональному или местному кларку того же элемента в том же материале.

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, тогда как для кремния (в кварцевых жилах) кларк концентрации равен 1,6; для алюминия в бокситах - 4; для железа - 14-15 и т.д.

2.7. Для рудообразующих элементов - да и не только для них - рассеянное состояние является более общим, чем концентрированное. Рудные месторождения и сопровождающие их ореолы представляют собой хотя и резкие, но чрезвычайно редкие положительные аномалии внутри всеобщего поля геохимического рассеяния.

Помимо этого, из количественных подсчетов видно, что первично-конституциональное рассеяние может представлять собой неисчерпаемый резерв для образования рудных месторождений любого класса.

Какими бы по происхождению ни являлись рудные месторождения (концентрации), все они образовались позже того, как в определенной мере консолидировалась литосфера в целом с присущим ей внутренним первично-конституциональным запасом рассеянных рудообразующих элементов.

Судя по наблюдаемым геологическим условиям залегания, в частности по взаимоотношениям с вмещающими и окружающими их горными породами, рудные месторождения в целом образовались позже образования литосферы (и первично-конституционального рассеяния рудообразующих элементов в ней).

При таком положении естественно предположение, что рудные месторождения в земной коре образуются за счет глубинных источников, несущих изначально концентрированные массы рудообразующих элементов. Однако такое предположение не находит каких-либо геохимических подтверждений. Так, если бы оно было верно, то многочисленные геохимические исследования самой коры, верха мантии планеты и метеоритов, должны были бы принести хоть какие-нибудь свидетельства в его пользу, хотя бы подобные железо-никелевым метеоритам, свидетельствующим о возможном нахождении в недрах Земли консолидированных источников этих элементов. Однако ничего подобного в отношении большинства металлов - меди, свинца, цинка, олова, вольфрама, молибдена и т.п. - не установлено. Кроме того, (хотя бы по отношению к земной коре), такое предположение противоречит весьма правдоподобным высказываниям А.А.Саукова о переплавлении, по крайней мере, верхов Земли, когда в результате взаимодиффузии должно было произойти всеобщее смешение элементов. Таким образом, все имеющиеся геологические материалы говорят об изначальном рассеянии всех рудообразующих элементов. В этом же случае неизбежно принять, что глубинные рудные месторождения в коре образуются за счет последующего концентрирования тем или иным путем рудообразующего вещества, первоначально рассеянного в геологических образованиях коры (и мантии).

2.8. На всем земном шаре устанавливается: территориальная близость большинства рудных месторождений к массивам изверженных пород; выборочная приуроченность месторождений определенных металлов к определенным семействам магматических пород; первично-зональное, закономерно-универсальное расположение многих гидротермальных месторождений вокруг определенных массивов изверженных пород; частая тесная связь месторождений с дайковыми сериями, а последних с интрузивами; 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 с одной стороны, а с другой — может быть привлечено 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.

2.9. Сведения о рудоносных гидротермальных растворах позволяют сформулировать нужные для дальнейшего хода изложения важные выводы:

а. Температура на всех стадиях процесса формирования рудоносных гидротерм вплоть до их отделения от очага их возникновения (образования) меняется в весьма ограниченной степени (порядка  $100^{\circ}$ ). Это позволяет считать рассматриваемый процесс изотермическим.

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

в. Формирование собственно рудоносных комплексных гидротерм происходит на фоне ионных гидротерм Пфанна. Очевидно, как правило, образующиеся на этой стадии комплексные гидротермы должны быть "засорены" отдельными, внекомплексными ионами. Весьма правдоподобно предположить, что окончательная очистка комплексных (нейтральных) соединений от ионных примесей происходит на этапе подъема гидротермы после ее отделения от очага под воздействием магнито-гидродинамического эффекта, возникающего в результате взаимодействия земного магнитного поля и находящихся в движении положительных и отрицательных электрических зарядов — ионов.

г. Возникновение полиминеральных руд, характер и закономерности распределения в них минералов и элементов и т.п. является следстви-

ями закономерностей, управляющих кристаллизацией многокомпонентных растворов, введенных в кристаллизационную камеру.

д. Освобождение рудной камеры от растворителя – воды осуществляется вероятнее всего путем инфильтрации.

е. Возникновение многокомпонентного зонального ореола с отходом в его верхние горизонты галоидов, являющихся основой комплексов, но не способных к широкому минералообразованию в глубинных условиях, происходит параллельно с формированием рудного тела.

ж. Остывание очага рудоотложения происходит до температуры (и давления), соответствующей глубине рудоотложения.

### 3. Термодинамические обоснования расчетов энергии рудообразования

#### 3.1. К понятию об энергии рудообразования ведут два пути.

Первый путь использует повседневный горно-обогатительный опыт. Допустим, что имеется обогатительная фабрика, вырабатывающая стандартизированный концентрат определенной кондиции (например, касситеритовый со стандартным содержанием по олову – 40%). Допустим далее, что на фабрику поставляются однотипные кварц-касситеритовые руды, но различных содержаний по олову – богатые, рядовые и бедные, и что они обрабатываются на фабрике до однотипного 40%-ого концентрата раздельно. Не требуется каких-либо доказательств для утверждения, что изготовление однородного концентрата из руд разных содержаний потребует на фабрике различных затрат энергии – меньших, если руды богатые, и больших, если руды рядовые и тем более бедные.

Второй путь предполагает использование общих закономерностей физики. Так, французский математик Э.Борель, разбирая вопрос о вероятности тех или иных случайных событий, пришел к выводу, что некоторым из них совершенно неправомерно приписывать – как это иногда делают – хотя бы ничтожную, но конечную вероятность, а надо прямо говорить об их невозможности осуществления, об их нулевой вероятности, об их невероятности как прямой противоположности достоверности. В качестве примера подобных невероятных событий он приводит случай самопроизвольного разделения воды и вина после их смешения. Самое смешение не потребует никакой энергии, произойдет самопроизвольно под влиянием самодиффузии; смесь же этих ингредиентов никогда самопроизвольно на чистую воду и чистое вино не разделится. Конечно, подвергнув указанную смесь дистилляции, возможно разделить ингредиенты, но это потребует затрат энергии и тем больших, чем сильнее разведение вина водой. Это видно хотя бы из того, что чем больше в смеси воды, тем большее количество тепла (при тепловой возгонке винного

спирта) должно быть затрачено попутно на нагрев воды.

3.2. Как уже отмечалось, литосфера представляет собой твердую смесь, в которой роль "растворителя" может быть приписана восьми элементной минеральной основе, а "растворенного" вещества — совокупности рудообразующих элементов. Самопроизвольная (согласно Э.Борелю) сегрегация "растворенного" вещества, его обособление в виде концентраций — месторождений — рудообразующих элементов внутри литосферы — есть событие невероятное ни при каких условиях; тем не менее опыт учит, что подобные сегрегации в литосфере существуют. И это, по вышеизложенному, может иметь место только в результате вмешательства энергии, внешней по отношению к разделяемой смеси.

Будем называть природную энергию, в результате воздействия которой внутри и за счет всеобщего рассеяния рудообразующих элементов возникают их концентрации — рудные месторождения, — энергией рудообразования. Эта энергия проявляется в форме работы сил физической (например, тяготения), химической (например, реакций взаимодействия) и физико-химической (например, сорбции, электрохимии) природы, как правило, в их сложном взаимодействии и взаимопроникновении. Поэтому, в частных случаях, трудно бывает однозначно установить даже совокупность действовавших агентов рудообразования, но тем не менее неоспоримым является факт их энергетической сущности, ибо в противном случае процессы рудообразования пришлось бы среди других земных процессов, вынести за скобки как противоречащие установленным на Земле законам. Этого же не позволяет сделать весь процесс развития и накопленный на этом пути опыт.

3.3. Процесс рудообразования есть процесс энергетический, хотя и не всегда детализуемый далее в своих звеньях. Однако последнее обстоятельство не играет существенной роли, 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 происходящие процессы рудообразования с энергетической точки зрения. При этом, в очень большом числе случаев, для этого оказывается достаточным знать лишь начальные и конечные состояния систем. Ниже эти вопросы и разобраны в объемах, необходимых в практике энергетических расчетов, применительно к постмагматическим месторождениям гидротермального генезиса, обладающим многими универсальными особенностями.

3.4. Весь процесс гидротермального рудообразования может быть разбит на четыре последовательных взаимосвязанных, но разных по своему влиянию на рудный процесс, этапа.

I этап. Возникновение бассейна (внедрением, переплавлением и т.п.) кислой гранитоидной магмы. Согласно Барту, условия в бассейне (до начала кристаллизации) следующие: глубина от поверхности Земли — не менее 4 км; давление — не менее 1000 атмосфер; температура — не ниже 800°C (1073°K); химический состав — силикатный, многокомпонентный, ионный расплав, содержащий в себе примеси рудообразующих элементов (в общей сложности порядка 1,3%) и связанную воду порядка 3% по массе. Для последующих этапов магматический бассейн является источником воды, рудообразующих элементов и энергии.

II этап. Должен считаться с момента начала кристаллизации магматического бассейна (температура по Барту порядка 800°C) и заканчиваться в момент отделения рудоносных гидротермальных растворов от родоначального магматического бассейна (по Барту — температура отделения порядка 600°C); наиболее вероятная средняя температура этапа — порядка 700°C (973 — 1000°K). В течение второго этапа гидротермальный процесс проходит две стадии:

а. На первой стадии в результате постоянного падения температуры происходит дифференциальная кристаллизация магмы с возникновением, в конце концов, гранитоидного массива и Пфаннывского ионного гидротермального раствора, в какой-то мере обогащенного рудообразующими элементами.

б. На второй стадии, в обстановке продолжающейся дифференциальной кристаллизации, при медленном падении температуры и таком же повышении давления в сужающейся гидротермальной камере, Пфаннывский ионный раствор медленно трансформируется в ассоциированное, практически нейтральное комплексное образование.

Последний процесс — переход беспорядочного ионного раствора в упорядоченный комплексный, характеризующийся высокой организацией по своей внутренней структуре, определяемой многоатомными стехиометрическими соединениями рудообразующих металлов, позволяет утверждать на основе общих термодинамических соображений, что при этом происходит обязательное потребление (рудообразующей) энергии.

III этап. Захватывает промежуток времени от момента отщепления гидротермального раствора от родоначального очага и до момента достижения им камеры рудоотложения. На этом этапе происходит непрерывный подъем гидротермального раствора от родоначального очага и до камеры рудоотложения, причем в условиях непрерывного же падения как температуры (от 700°C (~1000°K) в очаге и до температуры на-

чала рудоотложения 400–100°C в камере), так и давления (от 1000 атмосфер в очаге и нескольких сотен атмосфер в камере). С точки зрения энергетической на этапе происходит потребление механической энергии на подъем раствора и потеря внутренней энергии вследствие неизбежного охлаждения при подъеме. Вместе с тем, по-видимому, имеет место весьма важный процесс магнитогидродинамического очищения комплексного раствора от остатков ионизированных частиц, в результате чего получается повышение концентрации комплексных частиц. На это, конечно, расходуется какая-то часть энергии, которая и должна быть учтена соответствующим образом.

IV этап. Является завершающим рудообразование и совершается непосредственно в рудообразующей камере при температурах, вероятнее всего, 400–100°C (673–373°K) и давлениях, отвечающих вертикальной координате камеры рудообразования. 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, главным образом, реагируют с кислородом и серой, и образующиеся при этом соединения выпадают в осадок, давая начало образованию рудных и жильных сульфидных и окисных минералов. Растворитель – вода инфильтруется в боковые породы без остатка, а элементы – лиганды (в основном галогиды, в массе своей не способные к образованию минералов в глубинных условиях), а равно как 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 происходит непрерывное расходование ранее запасенной внутренней энергии при естественном охлаждении от 700 до 400–100°C и на образование первичных ореолов рассеяния.

Из вышеприведенного следует, что энергия и материал для рудообразования поступают на первом этапе, а само расходование их имеет место на втором и частично на третьем этапах. Этапы четвертый и частично третий с точки зрения потребления вещества и энергии рудообразования значения не имеют. На самом деле – 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 образование ореолов происходит за счет внутренней энергии.

Таким образом, в дальнейшем задача расчета расходования энергии рудообразования может быть разрешена путем анализа процесса, имеющего место на втором и частично третьем этапах.

Вместе с тем, заметим, что наиболее вероятным моментом рождения гидротермального рудообразующего раствора, моментом, определяющим все дальнейшее развитие событий, является преобразование диссоциированного, сравнительно разведенного Пфанновского ионного гидротермального раствора в ассоциированный, концентрированный, комплексный, собственно рудоносный гидротермальный раствор. Это преобразование, как об этом можно судить, происходит на вполне определенной стадии развития магматического бассейна и требует для своего осуществления затраты энергии, прежде всего на преодоление сил диссоциации, всегда направленных во вне исследуемой системы. Так как все остальные сопровождающие рудообразование процессы идут с выделением энергии, то очевидно, что вся поглощаемая энергия и 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 самых богатых, придерживаясь при этом определенных одинаковых условий, то в итоге может быть выведена и функциональная зависимость между расходованием энергии рудообразования и содержаниями металлов в рудах. Если далее использовать закономерности, установленные Больцманом для распределения уровней энергии внутри любого энергетического очага, то совсем не трудно перейти и к функциональной зависимости запасов руд от содержания металла в рудах.

3.5. Для полного решения поставленной задачи нет всех необходимых термодинамических данных и необходимо искать специфических путей. Одним из этих путей может явиться использование косвенных способов расчета, основанных на применении закона Гесса, закона зависимости энтропии от координат  $T$ ,  $P$  и  $V$ -точки процесса и других, применяемых в возникающих случаях, термодинамических закономерностей.

Как известно, сущность закона Гесса состоит в утверждении, что теплотехимический эффект реакции, входящий в расчет энергии рудообразования, определяется только характером исходных и конечных продуктов ее и не зависит от путей прохождения реакции. В нашем случае исходным материалом оказывается родоначальный гранитоид, а конечным — руды различных содержаний металла.

Следующим ограничительным условием является допущение об идеальных свойствах растворов и веществ, участвующих в реакциях, с тем, чтобы можно было использовать термодинамические законы идеальных газов, справедливые в полной мере и для разведенных растворов.

Это возможно, поскольку гидротермальный рудообразующий раствор на самом деле является ассоциированным с ионной силой, близкой к нулю, и в связи с этим, с коэффициентом термодинамической активности близким к единице, что сильно сближает этот раствор с идеальным и позволяет подчинить его закономерностям идеальных растворов.

Система, для которой производится расчет, может вполне рассматриваться как закрытая, близкая к изолированной, поскольку до отщепления рудоносной, уже "готовой" гидротермы обмен веществом не происходит, а потерей энергии можно пренебречь.

3.6. Возникновение рудообразующего гидротермального раствора внутри родоначальной Пфанновской гидротермы может рассматриваться как следствие ряда реакций, в результате которых в единице объема реакционного пространства число атомов одного сорта - собственно рудообразующих - растет, их "атмосфера" сжимается, тогда как других "петрогенных" - уменьшается, их "атмосфера" разрежается. При этом процесс совершается метасоматически, (атом за атом). Можно высказать предположение, что реакциями, способствующими сжатию атмосферы рудообразующих элементов, будут реакции комплексообразования, а способствующими, наоборот, их разрежению - эффекты вытеснения металлоносными комплексами петрогенных ионов и их же окончательное удаление из уже движущегося гидротермального раствора под влиянием магнитогидродинамического эффекта.

Число "К", используемое при конкретных расчетах в соответствующих формулах и показывающее число раз сжатия или разрежения "атмосферы" того или иного элемента в единице объема рудоносной гидротермы относительно его содержания в рассеянии в родоначальной магме, иначе кларк концентрации, берется как отношение количества грамм-атомов элементов в конкретной руде к числу грамм-атомов этого элемента в родоначальной магме. Число "К" должно быть всегда больше единицы, а поэтому при разрежении необходимо брать обратную величину.

Процесс рудообразования принимается изотермическим для идеальных условий.

При указанных условиях для расчета воспользуемся общим выражением для определения максимальной работы:

$$\Delta F = \Delta U - T\Delta S, \quad (I)$$

где  $\Delta F$  - приращение изохорно-изотермического потенциала, равное совершенной максимальной работе;  $\Delta U$  - приращение внутренней энергии;  $T$  - абсолютная температура;  $\Delta S$  - приращение энтропии.

Расчет ведется на 1 г/атом (г·моль) вещества.

В предположении идеальных свойств веществ и процесса, участвующих в реакции,  $\Delta U = 0$ , поскольку при этих условиях все свойства, в частности теплоемкости, одинаковы. Следовательно,

$$\Delta F = -T \Delta S. \quad (2)$$

Из формулы ясно видно, что, если приращение энтропии имеет знак минус, внешняя работа положительна и совершается над системой - и наоборот.

Определить величину  $\Delta S$  для случая изотермического увеличения или уменьшения содержания элемента в единице объема, иначе сжатия или разрежения его "атмосферы" в единице объема в  $K$  раз, можно по формуле (для идеальных условий)

$$\begin{aligned} \Delta S &= R \ln \frac{C}{C_0} = R \ln K \quad (\text{для сжатия}); \\ \Delta S &= R \ln \frac{C_0}{C} = R \ln K \quad (\text{для разрежения}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R$  - универсальная газовая постоянная, равная  $1,987 \text{ кал/г} \cdot \text{атом} \cdot \text{град.} = 8,32 \cdot 10^7 \text{ эрг/г} \cdot \text{атом} \cdot \text{град.}$ ,  $C$  - начальное равномерное содержание данного элемента в единице объема, г·атом,  $C_0$  - конечное содержание того же элемента в единице объема, г·атом.

Приведенные расчетные формулы имеют в виду один данный элемент (или его соединение), единицу объема и  $1 \text{ г} \cdot \text{атом}$  (или  $1 \text{ г} \cdot \text{моль}$ ) вещества. Если в процесс вовлекается  $M_3 \text{ г} \cdot \text{атомов}$  (или  $\text{г} \cdot \text{молекул}$ ) вещества, этот множитель должен быть введен в соответствующую формулу.

3.7. Основная формула для определения затрат энергии на сжатие-разрежение "атмосферы" в рудоносной гидротерме в расчете на один элемент, на выбранную единицу объема и на  $M_3$  грамм·атомов вещества, вовлеченного в процесс (при условии идеального изотермического процесса), будет иметь вид

$$\Delta F = M_3 T \Delta S = M_3 T R \ln K. \quad (4)$$

В формуле учтена лишь чистая работа, расходуемая на сжатие-разрежение данного количества непосредственно исследуемого компонента  $M_3$ , безотносительно 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 на самом деле в реальных геологических условиях всюду существует "атмосфера" из 92 компонентов, каждый из которых присутствует в свойственной ему атомной концентрации. 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 или массы), будут систематически отличаться от вычисленных по формуле (4). 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.

Концентрация данного элемента в смеси может быть выражена через его атомную концентрацию  $C_a$ , понимая под этим долю атомов этого элемента, которую они составляют в общей смеси в единице объема,

$$C_a = \frac{\sum m_{э} \cdot \Gamma \cdot \text{атомов данного элемента}}{\sum m_{э} \cdot \Gamma \cdot \text{атомов всех элементов}} \quad (5)$$

Отсюда, естественно, следует, что, вводя понятие о коэффициенте полезного действия (к.п.д.), можно положить этот параметр пропорциональным  $C_a$ , причем, эта  $C_a$  должна быть отнесена 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.

Таким образом, для определения полной затраты энергии необходимо чистый расход энергии, исчисленный по выражению (4), разделить на к.п.д., величина которого пропорциональна атомному содержанию элемента при равновесии; коэффициенты пропорциональности принимаются равными единице:

$$\Delta F_{\text{полн}} = \frac{\Delta F_{\text{чист}}}{\text{к.п.д.}} = \frac{M_{э} \cdot T \cdot R \ln K}{C_a} \quad (6)$$

где  $C_a$  - атомное содержание элемента, равное при сжатию —

$$C_a = \frac{\sum m_{э} \cdot \Gamma \cdot \text{р}}{\sum m_{э} \cdot \Gamma \cdot \text{р}} = \frac{\text{число } \Gamma \cdot \text{атомов элемента в ед. объема гранитоида}}{\text{число } \Gamma \cdot \text{атомов всех элементов в ед. объема гранитоида}} \quad (7)$$

при разрежении —

$$C_a = \frac{\sum m_{э} \cdot \text{Р}}{\sum m_{э} \cdot \text{р}} = \frac{\text{число } \Gamma \cdot \text{атомов в ед. объема руды}}{\text{число } \Gamma \cdot \text{атомов всех элементов в ед. объема руды}}$$

Совершенно очевидно, что при сжатии  $M_{\text{э}} = M_{\text{э.гр}} K$ , а при разрежении  $M_{\text{э}} = M_{\text{э.р}} K$ , где  $M_{\text{э.гр}}$  и  $M_{\text{э.р}}$  - равновесные содержания элемента в г.атомах в единицах объема гранитоидов и руды, а  $K$  - кларки концентрации (при сжатии или разрежении). Подставляя значения  $M_{\text{э}}$  и  $C_{\text{а}}$  в общую формулу, получим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_{\text{полн}} &= \frac{\Delta F_{\text{чист}}}{\text{к.п.д.}} = \frac{M_{\text{э}}^{\text{TR}} \ln K}{C_{\text{а}}} = \frac{M_{\text{э.гр}}^{\text{KRT}} \ln K}{\frac{M_{\text{э.гр}}}{\sum M_{\text{э.гр}}}} = \sum M_{\text{э.гр}}^{\text{KTK}} \ln K; \\ \Delta F_{\text{полн}} &= \frac{\Delta F_{\text{чист}}}{\text{к.п.д.}} = \frac{M_{\text{э}}^{\text{TR}} \ln K}{C_{\text{а}}} = \frac{M_{\text{э.р}}^{\text{KRT}} \ln K}{\frac{M_{\text{э.р}}}{\sum M_{\text{э.р}}}} = \sum M_{\text{э.р}}^{\text{KTK}} \ln K. \end{aligned} \right\} (8)$$

Формально выражения как для случая сжатия, так и разрежения совершенно подобны.

Формула (8) дает возможность при заданном  $K$  рассчитать полную затрату рудообразующей энергии на один данный элемент в смеси и на выбранную единицу объема. При этом следует заметить, что поскольку реальными способностями рудообразования для различных элементов мы не располагаем, а отдавать предпочтение отдельным элементам нет оснований, то мы вынуждены коэффициенты рудообразования для всех элементов принимать одинаковыми, положив их для простоты равными единице. Далее, ограничивая себя относительными расчетами, вправе положить что:  $R$  - универсальная постоянная величина,  $T$  - петрологическая постоянная температура образования комплексного гидротермального рудоносного раствора порядка  $700^{\circ}\text{C}$  ( $973 = 1000^{\circ}\text{K}$ ) и  $\sum M_{\text{э}}$  - определяющее число грамм-атомов вещества в единице объема гранитоидов и большинства руд и равное по прямому расчету  $131,3 \pm (10-11)\%$  г.атомов/дц<sup>3</sup> - порознь равными также единице. Тогда окончательная расчетная формула для определения полной энергии, потребной для сжатия или разрежения "атмосферы" данного элемента в смеси в выбранной единице объема в  $K$  раз, предельно упрощается:

$$\Delta F_{\text{полн}} = K \ln K. \quad (9)$$

Полная затрата энергии рудообразования (орелообразования) в этом случае в расчете на единицу объема руды (орела) при числе  $n$  элементов участвующих в этих процессах составит:

$$E_{\text{полн}} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta F_{\text{полн}} = \sum_{i=1}^{i=n} K_i \ln K_i. \quad (10)$$

3.8. Приведем схему расчета и круг задач, с которыми мы встречаемся при использовании вышеуказанных формул (табл. 2).

Таблица 2

Схема расчета энергии рудо (орезоло)-образования

Элемент	Атомный вес	Геохимич. параметры фонового объекта			Геохимические параметры расчетного объекта				
		вес. %	г/дм <sup>3</sup>	$\frac{\text{г. атом}}{\text{дм}^3 \text{ г. а}}$	вес. %	г/дм <sup>3</sup>	$\frac{\text{г. атом}}{\text{дм}^3 \text{ (г. а)}}$	$K_i$	$K_i \ln K_i$
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O	16,0	48,7	5,2	81,98	$C_O$	$\Gamma_O$	$\Gamma_{AO}$	$K_O$	$K_O \ln K_O$
Si	28,09	32,3	865,2	30,80	$C_{Si}$	$\Gamma_{Si}$	$\Gamma_{ASi}$	$K_{Si}$	$K_{Si} \ln K_{Si}$
Al	26,98	7,7	206,4	7,63	$C_{Al}$	$\Gamma_{Al}$	$\Gamma_{AAl}$	$K_{Al}$	$K_{Al} \ln K_{Al}$
...									
Sn	118,70	$3x \cdot 10^{-4}$	$8,04x \cdot 10^{-3}$	$6,77x \cdot 10^{-5}$	$C_{Sn}$	$\Gamma_{Sn}$	$\Gamma_{ASn}$	$K_{Sn}$	$K_{Sn} \ln K_{Sn}$
...									
92	-	100,49	2693,0	131,3	100,0	2800	134,0	-	$\sum K_i \ln K_i$

Пояснения к таблице:

а. В графах 2, 3, 4 и 5 пишутся цифры из источников, характеризующих объект, выбранный в качестве фонового (гранитоиды, литосфера в целом, местные геологические образования). В данном примере в качестве фонового выбран гранит, его геохимические параметры даны по А.П.Виноградову.

б. В графы 6, 7, 8 заносятся параметры элементов расчетного объекта (исследуемого месторождения, рудопроявления, орезола), причем  $C_i$  берутся из данных химического анализа, а  $\Gamma_i$  и  $\Gamma_{Ai}$ , зная объемный вес объекта и  $C_i$ , специально вычисляются.

в. Данные в графе 9 характеризуют кларки концентрации  $K_i$  и определяются путем деления числа г.атомов данного элемента в единице объема расчетного объекта на число г.атомов того же элемента в такой же единице объема фонового объекта (родоначального гранитоида). Если при этом получается дробная величина меньше единицы - берется обратная величина этой дроби.

г. Данные в графе 10, характеризующие собой полную энергию рудообразования в расчете на один данный элемент и на единицу объема, получать удобнее всего путем считывания с предварительно составленного графика:  $K - K \ln K$ .

д. Сумма  $K_c \ln K_c$  представляет собой полную энергию рудообразования в условных единицах, необходимую для создания единицы объема руды (ореола) данного состава.

е. Основная расчетная формула (10) обладает определенной особенностью: если кларки концентрации (в зависимости от элемента) могут меняться в широких пределах (в сотни тысяч раз), то изменения чистой работы, определяемой  $\ln K_c$ , не превосходят при этом II-III раз.

Заметим, что если сумма г. атомов всех элементов в единице объема расчетного объекта будет заметно отличаться (не менее чем на 25%) от таковой цифры для объекта фонового, то в произведенный расчет необходимо ввести соответствующий поправочный коэффициент, или вести расчет по формуле (8), учитывающей это обстоятельство.

3.9. Можно наметить, по крайней мере, два конкретных случая, когда для их разъяснения необходимо и достаточно будет прибегнуть к расчетам энергии рудообразования единицы объема руды (ореола).

Первый случай имеет место, когда необходимо произвести сравнение в естественных показателях комплексных руд различных содержаний или просто разных руд различных металлов и их содержаний между собой. В качестве примера приведем график (рис. 1) расходования энергии

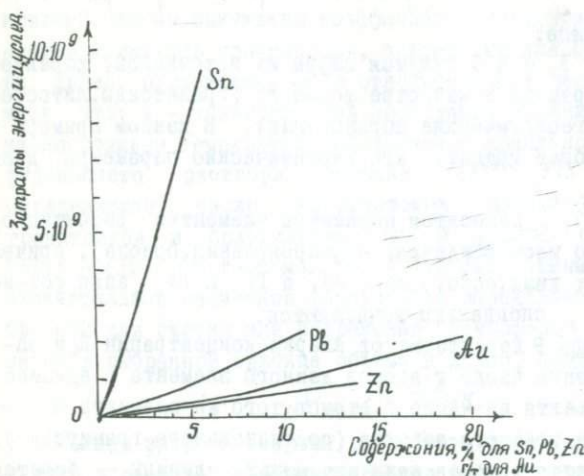


Рис. 1. График расходования энергии рудообразования кварцевых жил с галенитом, касситеритом, сфалеритом и золотом.

на руды с касситеритом, галенитом, со сфалеритом и с золотом. В качестве основы при расчете взята пустая (с кларковыми содержаниями сравниваемых металлов) кварцевая жила. Расчеты расходов рудообразующей энергии произведены в точном соответствии с приведенной выше схемой (см. табл. 2). Используя упомянутый

рис. 1, легко устанавли-

вать условия различных кварцевых руд, эквивалентных друг другу по энергии, затраченной природой на их образование: золото-кварцевая руда - 4г/т Au; галенит-кварцевая руда - 1,6% Pb; сфалерито-кварцевая руда - 4,2% Zn; касситерито-кварцевая руда - 0,25 Sn.

Во втором случае возникает необходимость выразить в едином показателе сумму индивидуально замеренных параметров; этот случай наблюдается, например, при требовании отобразить наглядным и простым способом данные исследования многоэлементных ореолов. Решение задачи, в таких случаях, осуществляется результатами анализа проб на содержания тех или иных элементов. Затем эти содержания выражаются в кларках концентрации относительно фона (гранитоидов, местного литосферы и т.п.) и вычисляется  $K_i \ln K_i$ , выражающая собой расход энергии рудообразования в расчете на один элемент и единицу объема в условных единицах. Суммируя эти отдельные величины, получаем полную энергию ореолообразования, израсходованную природой на все введенные в расчет ореольные элементы, при единице объема. При необходимости, комбинируя, можно определить полные энергии ореолообразования суммы привнесенных элементов, суммы элементов выноса и т.п. (рис. 2).

В заключение раздела заметим, что выполнение окончательного расчета величины  $K \ln K$  удобнее всего проводить по составленной заранее диаграмме, на которой по оси X откладываются величины  $K$ , а по оси Y — отвечающие им величины  $K \ln K$ . Диаграмма имеет вид, приведенный на рис. 3. Диаграмму рекомендуется строить в двух масштабах — крупном для значений  $K$  до 100 единиц и мелком — свыше 100.

Одно из преимуществ наличия диаграммы это возможность легкого отыскания  $K_{эф}$ , отвечающего любой полученной величине  $K_i \ln K_i$ . Эта операция необходима при исследовании сложных по составу руд — тантало-ниобиевых, свинцово-цинковых и т.п.; когда удобно ввести в рассмотрение вместо нескольких — один эффективный элемент, изменением концентрации которого достигается расчетный энергетический эффект.

При расчете энергии рудообразования по приведенной схеме теоретически предполагается использование данных по всем 92 элементам. На практике никогда не возникает необходимость в использовании всего числа элементов. В частности, обращается внимание на то, что содер-

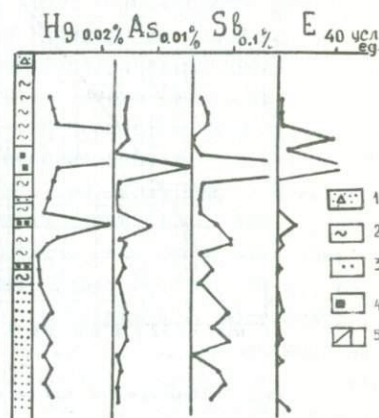


Рис. 2. График суммарной энергии рудообразования, построенный по содержаниям трех элементов.

1-рыхлые отложения; 2-кременистые породы; 3-песчаники; 4-вкрапленность сульфидов; 5-содержания элементов и значения энергии ореолообразования

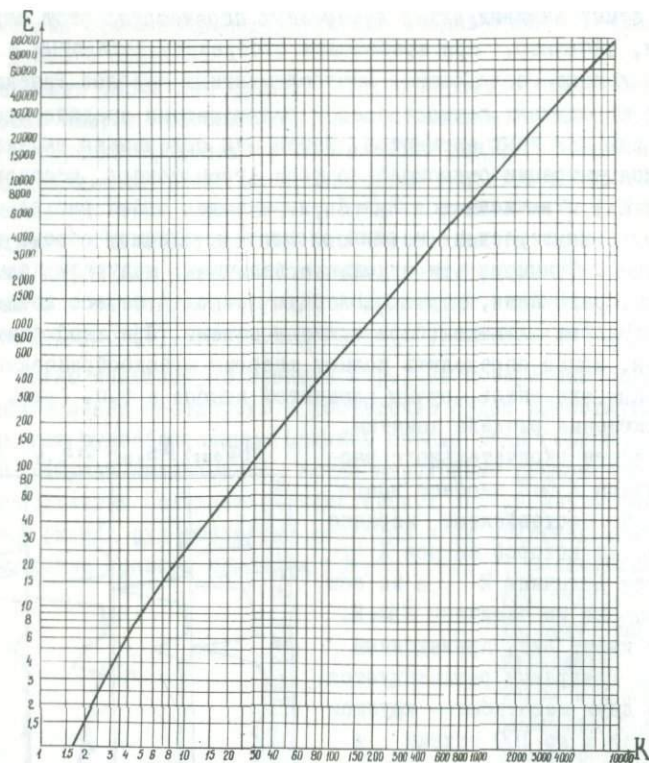


Рис. 3. Номограмма для расчетов  $E = K^2$  энергии рудообразования

жания большинства элементов-примесей либо практически не изменяются, либо изменяются несущественно во всем ряду - родоначальная порода (гранитоид) - рудный ряд возрастающих кондиций. Поэтому на практике расчет энергии рудообразования производится по ограниченному числу элементов, не превышающему 25-30. Далее, как оказалось, начиная с  $K \geq 300$  главнейшую роль в расчете приобретает главный рудный (ведущий) элемент. Поэтому взносами (паями) энергии рудообразования других элементов можно пренебречь.

3.10. Приведенные выше формулы обладают ограниченными возможностями. В частности, они имеют силу, когда требуется выразить в универсальных единицах энергии характеристики многокомпонентных геологических образований. Для целей же оценки запасов необходимо использовать особенности внутреннего строения энергетических очагов. Эти особенности были вскрыты Л.Большманом.

В свое время Л.Больцман ввел понятие о термодинамической вероятности состояния, процесса и т.п. Эту величину он обозначил  $W$  и понимал под нею количество способов (комплексий), которыми можно было бы обеспечить рассматриваемое состояние, процесс и т.п. Естественно, что  $W$  во всех случаях выражается величиной большей единицы и подчас достигает громадных значений. Используя некоторые параллели в поведении термодинамической вероятности  $W$  и энтропии  $S$  и основываясь на молекулярной теории вещества, Л.Больцман вывел математическую связь между энтропией и термодинамической вероятностью:

$$S = k \ln W \quad (II)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана;  $k = \frac{R}{N} = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/градус · I молекула;  $S$  - энтропия в кал/моль · градус;  $W$  - термодинамическая вероятность на 1 моль в комплексиях.

В природе абсолютно однородных процессов не существует, но всегда наблюдаются внутренние более или менее резко отличающиеся от средних параметров уклонения, иначе флуктуации. Подобное имеет место и в распределении интенсивностей энергии в едином энергетическом очаге, понимая под интенсивностью плотность энергии, т.е. количество энергии в выбранных энергетических единицах, заключенной в единице объема энергетического очага. При этом общие свойства энтропии позволяют утверждать, что чем интенсивнее уклонение (флуктуация) от значения, принятого за начальное, тем меньше значение энтропии подобного уклонения, тем меньше термодинамическая его вероятность и, следовательно, практическая возможность существования.

Допустим, что вводится в рассмотрение вся рудообразующая энергия, израсходованная природой на образование какого-либо одного металла. Естественно предположить, что внутри этой энергии будут отдельные её порции, различающиеся по интенсивности. Тогда можно написать

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots E_n, \quad (I2)$$

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 Больцмана позволяет предугадать количественные соотношения порций  $E_1, E_2, \dots E_n$ , имеющих различную заданную интенсивность. В указанных целях преобразуем формулу (II) и получим

$$W = \frac{S}{e^R} \quad (I3)$$

где  $W$  - термодинамическая вероятность процесса, состояния и т.п. в расчете на 1 усредненную молекулу;  $S$  и  $R$  - энтропия и универсальная газовая постоянная в расчете на 1 г.атом.

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

$$W_1 = e^{\frac{S_1}{R}}; \quad W_2 = e^{\frac{S_2}{R}}; \quad W_n = e^{\frac{S_n}{R}}. \quad (14)$$

Примем термодинамическую вероятность процесса возникновения наименее интенсивной флуктуации энергии  $E_1$  за  $I$ ; выразим в долях этой единицы термодинамические вероятности возникновения других порций интенсивностей  $E_2, E_3, \dots, E_n$ :

$$\frac{W_2}{W_1} = P_2 = \frac{e^{\frac{S_2}{R}}}{e^{\frac{S_1}{R}}} = e^{\frac{S_2 - S_1}{R}} = e^{\frac{\Delta S_2}{R}};$$

$$\frac{W_3}{W_1} = P_3 = \frac{e^{\frac{S_3}{R}}}{e^{\frac{S_1}{R}}} = e^{\frac{S_3 - S_1}{R}} = e^{\frac{\Delta S_3}{R}};$$

$$(15)$$

$$\frac{W_n}{W_1} = P_n = \frac{e^{\frac{S_n}{R}}}{e^{\frac{S_1}{R}}} = e^{\frac{S_n - S_1}{R}} = e^{\frac{\Delta S_n}{R}}.$$

Здесь  $P_2, P_3, \dots, P_n$  - 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.

Приращения энтропии  $\Delta S_i$  определяются в соответствии с расчетами энергии рудообразования единицы объема руды различной кондиции по К. Для этого случая имеем

$$\Delta S_i = -R \ln k_i. \quad (16)$$

Здесь перед выражением для  $\Delta S_i$  должен быть взят знак минус, поскольку энтропия каждого за  $E_i$  состояния меньше энтропии состояния  $E_1$ . Отсюда для общего члена  $2 \leq i \leq n$  будем иметь

$$P_i = e^{\frac{\Delta S_i}{R}} = e^{\frac{-R \ln k_i}{R}} = e^{-\ln k_i} = \frac{1}{k_i}. \quad (17)$$

Таким образом общая формула для  $E$  приобретает вид:

$$E = E_1 \left( 1 + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n} \right) = E_1 \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{k_n} \right). \quad (18)$$

Из формулы 18 следует, что порции энергии, выделяемые природой на образование руд разных кондиций, обратно пропорциональны кларкам концентрации главного металла в рудах, иначе чем выше концентрация данного элемента в руде (чем больше  $K$ ), тем меньшие количества рудообразующей энергии выделяет на это природа.

3.II. Эти материалы позволяют произвести расчет теоретических дифференциальных запасов металлов в зависимости от их содержаний в рудах по следующей формуле:

$$P_{K_i} = \frac{E_{K_i}}{\sum_{\text{полн}} K_i} = \frac{\frac{1}{K_i}}{\sum_{i=1}^{L_{\text{оп}}} K_i \ln K_i} = \frac{\text{Общий расход энергии на образование руд градации } K_i \text{ по Больцману}}{\text{Расход энергии на образование единицы объема руды градации } K_i \text{ (по термодинамике идеальных процессов)}} \cdot (19)$$

Здесь запасы руд данной градации  $K_i$  даются 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 в большом числе практических расчетов 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) и иногда во много раз. Поэтому, когда подобное имеет место, в формулу (19) для расчета общего количества энергии вместо  $K_i$  – кларка концентрации главного металла необходимо поставить  $K_{\text{эф}}$ , соответствующее расчетным затратам энергии на единицу объема и определяемое обратным путем по данным затратам энергии.

Ниже приведены результаты расчетов дифференциальных запасов применительно к металлам различных особенностей в смысле кларков концентрации – именно, обладающих длинными рядами (типа олова), средними рядами (типа меди) и короткими рядами (типа железа) кларков концентрации.

#### 4. Расчет дифференциальных запасов олова в кварцевых рудах

4.1. Касситерито-кварцевые руды являются важными в балансе запасов олова, что и послужило, наряду с длинным рядом кларков концентрации наблюдаемым здесь, основанием выбора их для типового расчета. При этом под касситерито-кварцевыми рудами (месторождениями) понимаются оловянные представители достаточно обширного класса поисково-разведочной классификации рудных месторождений акад. В.И. Смирнова, носящего собирательное название рудно-кварцевые месторождения. Среди этого класса известны, помимо оловянных, многочисленные золотые, вольфрамовые, молибденовые и др., 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% по объему и распределены в рудном теле чаще всего гнездами или в виде отдельных минеральных зерен. Рудные минералы в большинстве руд рассеяны и содержатся в них в пределах десятых долей первых процентов по массе. Таким образом, все поисково-разведочные особенности рудно-кварцевых месторождений обусловлены таковыми кварца (легко диагностируемые свалы, механические ореолы рассеяния, высокое электрическое сопротивление, пьезо-эффект и др.).

4.2. Все данные расчетов по касситерито-кварцевым рудам приведены в табл. 3 и 4, к которым необходимо сделать следующие пояснения:

а) Табл. 3 является исходной; все расчеты произведены согласно данным, приведенным в этой таблице и в соответствии с правилами, приведенными выше (см. табл. 2). Отмечается, что примеси малых элементов приняты такими, как и в исходном гранитоиде.

б) В табл. 4 вместо грамм-атомов приведены граммы олова в  $I_{дц}^3$ , что в данном случае вполне допустимо.

в) Хотя кларк концентрации олова в пустых кварцевых жилах равен единице и казалось бы затраты энергии рудообразования должны быть равны нулю, на самом деле они больше нуля. Указанное стоит в связи с одновременным преобразованием исходного гранитоида в жильный кварц рудных тел, на что затрачивается какая-то часть энергии. В связи с этим находится и то обстоятельство, что вероятности образования бедных рудных тел значительно ниже теоретических, исчисленных не по  $K$  олова, а по  $K$  эффективному (о чем было сказано выше).

г) Значения энергии рудообразования, израсходованной на создание единицы объема руды и  $K$  эффективного, отвечающего этим значениям, определены в результате соответствующих расчетов<sup>х</sup>.

<sup>х</sup> Эти расчеты во избежание громоздкости таблиц здесь не приводятся.

Таблица 3

Элементарные составы родоначальной (гранитоидной) породы и кварцевых руд олова различных кондиций, принятые к расчету

Объемная масса г/дц <sup>3</sup>	Содержания элементов, вес. %												элементов-примесей	Всего	
	O	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	Ti	H	C	Sn			
2680	48,7	32,3	7,7	2,7	Исходный недифференцированный материал (гранитоид)							0,03	$3 \cdot 10^{-4}$	0,49	100,49
		Производные кварцево-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	$3 \cdot 10^{-4}$	0,49	99,98	
2678	51,49	38,8	4,45	1,61	1,91	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,52	$3 \cdot 10^{-3}$	0,49	99,98	
2679	51,49	38,8	4,45	1,61	1,91	0,19	0,12	0,33	0,06	0,01	0,52	$3 \cdot 10^{-2}$	0,49	99,98	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
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	100,0	
6675	21,30	0,12	0,03	0,01	-	0,01	0,01	-	-	-	-	73,40	0,20	100,0	

Результаты расчетов энергии рудообразования и распределения дифференциальных запасов олова-металла по кварцево-касситеритовым рудам различных кларков концентрации

Объемная масса, г/дц <sup>3</sup>	Содержание олова			Расход энергии рудообразования в относительных единицах						Вероятность образования руд данного кларка концентрации $K_{ЭФ}$	Относительные запасы олова-металла в рудах данного кларка концентрации	
	в руде, вес. %	1 дц <sup>3</sup> , граммов	в дц <sup>3</sup> кларков концентрации	на 1 дц <sup>3</sup> руды			на 1 кларк = $8,04 \cdot 10^{-3}$ олова				по непосредственному расчету	приведенные к условной единице
				по формуле $E = \sum_{i=1}^n K_i \ln K_i$	по формуле $E = K_r \ln K_r$	$\frac{K_r \ln K_r}{\sum_{i=1}^n K_i \ln K_i} \%$	по формуле $\frac{\ln K_r}{K_r}$	по формуле $\frac{K_r \ln K_r}{K_r - \ln K_r}$	$\frac{\sum_{i=1}^n K_i \ln K_i}{\% K}$			
2600	$3 \cdot 10^{-4}$	$8,04 \cdot 10^{-3}$	1	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-
Исходный недифференцированный материал (гранитоид)												
Производные кварцево-касситеритовые руды различных содержаний олова												
2678	$3 \cdot 10^{-4}$	$8,04 \cdot 10^{-3}$	1	210,50	0,00	-	210,50	0,00	-	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$8,08 \cdot 10^{-5}$	782,00
2678	$3 \cdot 10^{-5}$	$8,04 \cdot 10^{-2}$	10	233,60	23,03	9,88	23,40	2,30	9,82	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$7,43 \cdot 10^{-4}$	6460,00
2679	$3 \cdot 10^{-2}$	$8,04 \cdot 10^{-1}$	100	671,00	460,52	68,70	6,71	4,61	68,70	$7,25 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	9400,00
2681	0,10	2,68	333	2270,00	1940,00	85,50	6,82	5,81	85,50	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$3,81 \cdot 10^{-4}$	3310,00
2685	0,30	8,04	1000	7118,50	6908,00	97,20	7,12	6,91	97,10	$9,62 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	1173,00
2692	0,59	16,08	2000	15412,60	15202,00	98,60	7,71	7,60	98,50	$5 \cdot 10^{-4}$	$6,48 \cdot 10^{-5}$	564,00
2707	1,49	40,20	5000	42795,00	42585,00	99,50	8,57	8,52	99,50	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-5}$	203,00
2740	3,00	82,20	10230	94710,00	94500,00	99,80	9,26	9,23	99,80	$9,78 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	91,70
2797	5,75	160,80	20000	198278,00	198068,00	100,00	9,92	9,91	100,00	$5 \cdot 10^{-5}$	$5,04 \cdot 10^{-6}$	43,80
2920	11,02	321,60	40000	424050,00	423840,00	100,00	10,55	10,60	100,40	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-6}$	20,50
2947	12,00	354,00	44000	469710,00	469500,00	100,00	10,68	10,69	100,00	$2,275 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-6}$	18,52
3167	20,33	643,20	80000	903410,00	903200,00	100,00	11,27	11,29	100,00	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-6}$	9,66
3658	35,18	1286,40	160000	1917510,00	1917300,00	100,00	11,98	11,98	100,00	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$5,22 \cdot 10^{-7}$	4,54
4058	43,50	1770,00	220150	2708500,00	2708290,00	100,00	12,30	12,30	100,00	$4,54 \cdot 10^{-6}$	$3,69 \cdot 10^{-7}$	3,21
4639	55,50	2572,00	320000	4056530,00	4056320,00	100,00	12,70	12,68	100,00	$3,125 \cdot 10^{-6}$	$2,46 \cdot 10^{-7}$	2,15
6675	78,40	5226,00	650000	8708250,00	8703500,00	100,00	13,40	13,38	100,00	$1,54 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$	1,00

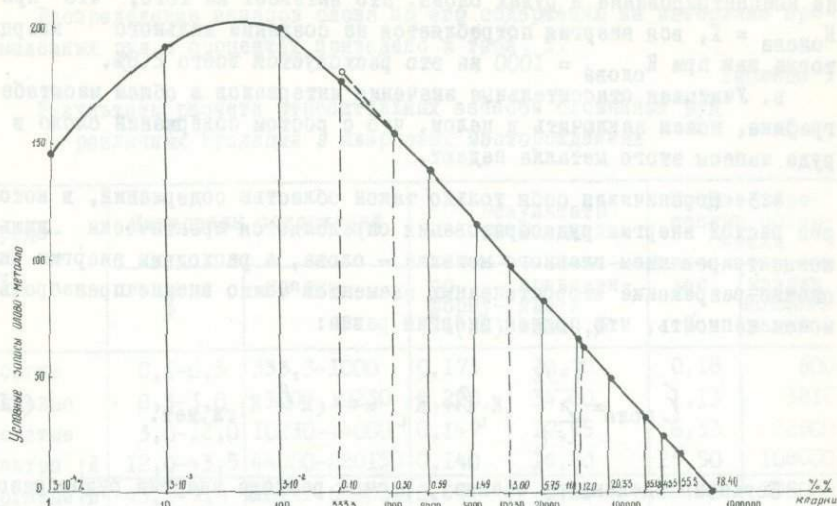


Рис. 4. Распределение олова в касситерито-кварцевых рудах в зависимости от содержания в них металла.

На рис. 4 в двойном логарифмическом масштабе приведен график дифференциальных запасов олова — металла в рудах, разных по содержанию в них олова, рассчитанный по формуле:

$$P_{\text{к.м.}} = \frac{I}{\frac{\sum K_i \phi_{\text{Sn}} K_i}{K_{\text{главного металла}}}} \quad (20)$$

Анализируя данное уравнение и отвечающие ему табл. 4 и график на рис. 4, приходим к следующим выводам:

а. График может быть разбит на две части: в пределах 1–100 кларков (концентрации) содержание и запасы олова растут, в то время как в пределах 100–650000 кларков — растет только содержание металла, а запасы падают.

б. Объяснение этого вытекает из анализа характера распределения энергии рудообразования по главному и второстепенным рудным элементам. Так, при малых содержаниях главного элемента энергия расходуется главным образом на второстепенные, а при больших его содержаниях — 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 — 100–650000 кларков — она потребляется главным образом

на концентрирование в рудах олова. Это вытекает из того, что при  $K_{\text{олова}} = 1$ , вся энергия потребляется на создание жильного кварца, тогда как при  $K_{\text{олова}} = 1000$  на это расходуется всего 2,8%.

в. Учитывая относительные значения интервалов в общем масштабе графика, можем заключить в целом, что с ростом содержаний олово в руде запасы этого металла падают.

4.3. Ограничивая себя 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 вполне пренебречь, можем написать, что полная энергия равна:

$$\xi_{\text{полн}} = \sum_{i=1}^{i=22} K_i \ln K_i = \infty (K \ln K)_{\text{гл.мет.}} \quad (21)$$

Согласно сделанному анализу, расчет расхода энергии рудообразования по этой формуле допустим с максимальной ошибкой не более 14,5% в интервале  $333,3 \leq K_{\text{гл.мет.}} \leq 650000$ ; в переводе на проценты в пределах  $0,1\% \leq K_{\text{гл.мет.}} \leq 78,4\%$  – т.е. по всей области практически интересных содержаний олова.

Учитывая формулу (21), можем написать для дифференцированных запасов ( $P_K$ ) в единицах объема:

$$P_K = \frac{\frac{I}{K}}{K \ln K}, \quad (22)$$

где  $K$  – кларк концентрации только главного металла.

Для перехода при расчете на металл обратим внимание, что количество его в единице объема при кларке концентрации в объеме  $K$  – пропорционально этой последней величине  $K_{\text{гл.мет.}}$ , причем коэффициентом пропорциональности является цена единицы кларка концентрации в граммах; она, при принятой относительной системе расчета, приравнивается единице.

Итак, при расчете на металл:

$$P_{\text{км}} = \frac{\frac{I}{K}}{\frac{K \ln K}{K}} = \frac{I}{K \ln K}, \quad (23)$$

где  $P_{\text{км}}$  – дифференциальный запас в расчете на олово, в относительных единицах.

Распределение запасов олова по его содержанию на интервале промышленных руд в процентах приведено в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчета относительных запасов оловянных руд различных градаций в кварцевых месторождениях

Града- ции руд	Интервалы содержаний		Результаты вычислений		Средне-взве- шенные содер- жания	
	весовые %	кларки	по форму- ле(22)	приведен- ные к един.,%	вес, %	кларки концент- раций
Убогие	0,1-0,3	333,3-1000	0,173	20,70	0,18	600
Рядовые	0,3-3,0	1000-10230	0,290	34,80	1,13	3810
Богатые	3,0-12,0	10230-44000	0,147	17,65	6,53	22900
Ультра	А 12,0-43,5 Б 43,5-78,4	44000-220150 220150-650000	0,140	16,80	25,50	108000
богатые			0,084	10,05	60,90	398000
Всего	0,1-78,4	333,3-650000	0,834	100,00	16,75	63800

К табл. 5 следует сделать пояснения: нижний предел руд 0,1% принят по условиям возможности применения расчетной формулы, а верхний — по содержанию олова в чистом касситерите (78,4%). Промежуточное содержание 43,5% принято по условиям ограничения, накладываемого на максимальное содержание олова формулой комплексного соединения (олова с фтором) в форме которого, по В.Л.Барсукову, оно переносится. Остальные ограничительные градации (0,1-0,3; 0,3-3,0 и т.д.) выбраны по практическим соображениям.

Во второй половине таблицы приведены средне-взвешенные содержания олова по тем же интервалам. Эти значения вычислены также аналитическим путем с использованием формулы (23). Для этого поступают следующим образом: деля запасы олова в интервале (от  $K_1$  до  $K$ ) на число кларков в нем и получают в этом случае средне-взвешенное количество металла (в интервале), затем, используя заранее выполненный график  $\frac{I}{K \ln K}$ , определяют интересующие нас значения  $K$ . Например, деля запасы металла на интервале 1000-10230 кларков (0,3-3,0%), равные 0,290, на число кларков в нем 9230 получаем цифру  $3,14 \cdot 10^{-5}$ , по которой обратным ходом получаем отвечающее ей значение кларков 3810, которое и вписывается в таблицу.

## 5. Расчет дифференциальных запасов меди

в месторождениях порфириновых прожилково-вкрапленных руд

5.1. В качестве медных гидротермальных месторождений для расчета выбираются широко распространенные медные месторождения порфириновых прожилково-вкрапленных и тесно связанных с ними кварцево-сульфидных жильных руд. Таким образом охватывается весьма широкий круг содержаний меди-металла в рудах.

В основу расчета положены следующие соображения:

а. За исходную породу, с которой ставятся в генетическую связь месторождения медных порфириновых руд, принимается гранодиорит. Геохимические параметры подобной породы принимаются средними между гранитами и диоритами по Виноградову.

б. Процесс рудообразования считается изотермическим.

в. Рудный материал месторождений представлен смесью минералов халькопирита и пирита, причем каждого в равных молекулярных количествах (грамм-молекула на грамм-молекулу). В этом случае эффективный состав подобного искусственного минерала может быть описан формулой  $Cu_1Fe_2S_4$ . Согласно этой формуле на 1 грамм-атом меди приходится два грамм-атома железа и 4 грамм-атома серы или на 1 грамм меди - 1,755 г железа и 2,02 г серы. Объемный вес 1 дц<sup>3</sup> подобной смеси равняется 4650 г; количество грамм-атомов в этом объеме в расчете на чистую минеральную смесь халькопирита и пирита - 107 г-атомов.

г. Жильные минералы представлены смесью серицита ( $KAl_3Si_3O_{12}H_2$ ) и кварца ( $SiO_2$ ) для бедных руд - до 5,2% по меди и одним кварцем - для богатых (начиная с 6,73% и выше по меди).

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

е. Конкретные расчеты произведены согласно схеме, изложенной выше (см. табл. 2).

5.2. Сводные результаты произведенных расчетов приведены в табл. 6.

К ней следует сделать пояснения:

а. Кривая, отображающая выведенную зависимость запасы - кларки концентрации для меди в порфириновых месторождениях, представлена на рис. 5. Из рисунка следует, что упомянутая кривая имеет перегиб в промежутке 37-100 кларков по меди и далее со 100 кларков вплоть до предельных их значений (12662), имеет монотонно-затухающий вид, в промежутке 1-37-100 кларков по меди кривая имеет неизменно возрастающий характер. На самом же деле, теоретически рассуждая, кривая

Таблица 6

Сводная таблица результатов расчетов энергии рудообразования медно-порфириновых руд

№ п/п	Кларк концентрации меди К <sub>Си</sub>	Содержание меди (Си), %	Объемная масса, г/дц	Полная энергия рудообразования единицы объема руды, усл.ед.	Соответствующее значение К <sub>эф</sub> , усл.ед.	Относительное значение К <sub>эф</sub> , % К <sub>Си</sub>	Расход энергии рудообразования в расчете на Кларк концентрации меди, усл.ед.	Расход энергии по Больцману $\frac{I}{K_{эф}}$	Запас меди $R_{КСи} = \frac{I}{K_{эф}}$ $\frac{K_{эф} \cdot \rho \cdot K_{эф}}{K_{Си}}$	Запас Р <sub>КСи</sub> , усл.ед.
I	I	$2,7 \cdot 10^{-3}$	2800	96,0	28,5	2850,0	96,0	$3,51 \cdot 10^{-2}$	$3,655 \cdot 10^{-4}$	57,60
2	10	$2,7 \cdot 10^{-2}$	2800	117,0	33,5	335,0	11,7	$2,985 \cdot 10^{-2}$	$2,55 \cdot 10^{-3}$	402,00
3	37	0,1	2805	233,0	58,0	152,0	6,3	$1,725 \cdot 10^{-2}$	$2,74 \cdot 10^{-3}$	431,50
4	100	0,27	2807	592,0	123,0	123,0	5,92	$8,14 \cdot 10^{-3}$	$1,374 \cdot 10^{-3}$	216,50
5	270	0,72	2817	1773,0	310,0	115,0	6,58	$3,23 \cdot 10^{-3}$	$4,91 \cdot 10^{-4}$	77,40
6	568	1,49	2882	4148,0	640,0	113,0	7,30	$1,563 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	33,70
7	630	1,64	2900	4670,0	712,0	113,0	7,42	$1,405 \cdot 10^{-3}$	$1,895 \cdot 10^{-4}$	29,90
8	800	2,06	2930	6143,0	904,0	113,0	7,68	$1,108 \cdot 10^{-3}$	$1,442 \cdot 10^{-4}$	22,70
9	1560	3,80	3088	13141,0	1760,0	113,0	8,42	$5,69 \cdot 10^{-4}$	$6,75 \cdot 10^{-5}$	10,62
10	2216	5,20	3215	19525,0	2500,0	113,0	8,82	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$4,54 \cdot 10^{-5}$	7,15
11	3000	6,73	3355	27527,0	3390,0	113,0	9,17	$2,95 \cdot 10^{-4}$	$3,22 \cdot 10^{-5}$	5,07
12	5000	10,50	3590	48845,0	3650,0	113,0	9,77	$1,77 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	2,85
13	7500	14,32	3953	76864,0	8480,0	113,0	10,24	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	1,81
14	10000	17,50	4320	105803,0	11330,0	113,0	10,58	$8,81 \cdot 10^{-5}$	$8,34 \cdot 10^{-6}$	1,31
15	12662	20,55	4650	138518,0	14400,0	113,0	10,93	$6,95 \cdot 10^{-5}$	$6,35 \cdot 10^{-6}$	1,00

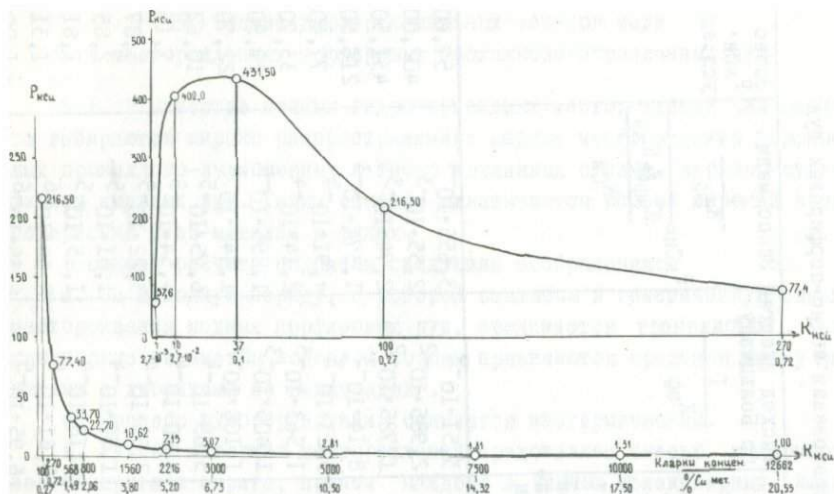


Рис. 5. График дифференциальных запасов меди в медно-порфирировых месторождениях

должна иметь на всем промежутке I-I2662 кларка монотонно-затухающий характер. Причина подобного отступления от теории заключена в том, 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 др., с одновременным угнетением, требуемым сохранением суммарного числа грамм-атомов, так же петрогенных элементов — магния, натрия, кальция и др. Однако с точки перегиба кривой энергии, в основном, начинает расходоваться на концентрирование рудных элементов, и кривая в целом приобретает теоретически предсказываемый вид.

б. На всем участке I00-I2662 кларков концентрации по меди, как показывает специально проведенный анализ, доля энергии рудообразования, зависящая от концентрирования — деконцентрирования петрогенных элементов постепенно снижается (от 11,9% при I00 кларках и практически до нуля при кларках концентрации 5000 и выше). Отсюда следует, что с этого предела I00 кларков и далее до I2662 практически вся энергия рудообразования определяется концентрированием только рудных элементов — меди, серы и железа.

в. Характерной особенностью кривой на участке I00-I2662 кларков концентрации по меди является, во-первых, зависимость энергии рудообразования от эффективного кларка концентрации  $K_{св\text{эф}}$ , учитывающего расходы на концентрирование не только одной меди, но всей совокуп-

ности рудных элементов (меди, серы, железа) и, во-вторых, прямая зависимость  $K_{эф}$  от коэффициента концентрации главного элемента — меди ( $K_{Cu}$ ), выражающаяся постоянным коэффициентом пропорциональности  $\frac{K_{эф}}{K_{Cu}} = 1,13$ .

5.3. Выше, в разделе, посвященном олову, была выведена упрощенная формула (23), справедливая для области содержаний олова в руде свыше 333 кларков (0,1%) и до 650000 кларков.

Для рассматриваемого случая меди подобная ситуация возникает с кларком концентрации по меди равным 100 (0,27%) и до 12662 (20,55%). Однако очевидное требование учета всей потребленной энергии рудообразования в рассматриваемом случае обязывает вводить в соотношение не кларк концентрации меди, а эффективный кларк концентрации  $K_{эф}$ . В соответствии с изложенным можем написать:

$$P_k = \frac{\frac{I}{K_{эф}}}{K_{эф} \ln K_{эф}} \quad (24)$$

В расчете на 1 кларк меди формула будет иметь вид

$$P_k = \frac{\frac{I}{K_{эф}}}{K_{эф} \ln K_{эф} K_{Cu}} \quad (25)$$

Заменяя  $K_{Cu}$  через  $K_{эф}$ , будем иметь окончательно

$$P_{K_{Cu}} = \frac{\frac{I}{K_{эф}}}{\frac{K_{эф} \ln K_{эф}}{K_{эф} / 1,13}} = \frac{0,885}{K_{эф} \ln K_{эф}}$$

Для получения запасов в числовом выражении величину  $K_{Cu}$  следует перевести в  $K_{эф}$  путем ее умножения на 1,13.

В табл. 7 приведены результаты соответствующих расчетов по этой формуле, а также средние содержания по интервалам.

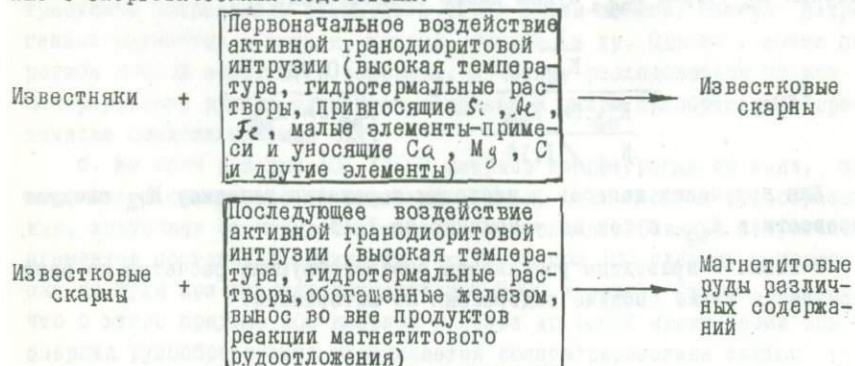
Результаты расчета относительных запасов медных руд различных градаций в медно-порфировых месторождениях

Градация руд	Интервалы содержаний		Результаты вычислений		Средне-взвеш. содержания	
	вес, %	кларки содержания К <sub>Сu</sub>	по формуле (26)	приведенные к един., %	вес, %	кларки концен. К <sub>Сu</sub>
Убогие	0,27-1,00	100-377	0,219	35,0	0,57	212
Рядовые	1,00-3,80	377-1560	0,187	30,0	1,93	748
Богатые	3,80-20,55	1560-12662	0,219	35,0	10,07	4773
Всех градаций	0,27-20,55	100-12662	0,625	100,0	4,81	2035

#### 6. Расчет дифференциальных запасов железа в скарновых месторождениях магнетитовых руд

6.1. В качестве гидротермальных 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.

Общие сведения, касающиеся этой группы месторождений, позволяют сформулировать краткие положения, непосредственным образом связанные с энергетическими подсчетами:



Расчету подвергается процесс образования магнетитовых руд по уже образованным известковым скарнам.

Исходный химико-минералогический состав известковых скарнов принимается согласно данным, приведенным в табл. 8.

## Исходный химико-минералогический состав известковых скарнов

Перечень характеристических показателей минералов известкового скарна	Минералы известкового скарна							Известковый скарн по канонич. сост.
	магнетит	кальцит	волластонит	диопсид	геденбергит	гроссуляр	андрадит	
Канонические составы минералов	$Fe_3O_4$	$CaCO_3$	$CaSiO_3$	$CaMgSi_2O_6$	$CaFeSi_2O_6$	$Ca_2Fe[SiO_4]_3$	$Ca_2Fe_2[SiO_4]_3$	$\Sigma$ ср.
Объемные веса минералов, г/дц <sup>3</sup>	5050	2700	2840	3320	3550	3530	3750	-
Содержание минералов в скарне, объем. %	1,0	4,0	5,0	24,0	16,0	20,0	30,0	100,0
То же, г/дц <sup>3</sup>	50,0	108,0	142,0	797,0	568,0	706,0	1125,0	3496
Содержания элементов в г/дц <sup>3</sup> , предугадываемое	13,8	51,9	58,6	353,7	219,0	301,0	425,0	1423
Si	-	-	34,4	206,0	129,0	132,0	186,0	687,4
Mg	-	-	-	-	-	84,5	-	84,5
Fe маг.	36,2	-	-	-	-	-	-	36,2
Fe сил.	-	-	-	-	128,0	-	248,0	376,0
Ca	-	43,1	49,0	147,0	92,0	188,5	266,0	785,0
Mg	-	-	-	90,3	-	-	-	90,3
C	-	13,0	-	-	-	-	-	13,0
Сумма примесей "малых элементов"	-	-	-	-	-	-	-	31,0
Полный объемный вес известковых скарнов, г/дц <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	3527,0

Химический состав магнетитовых руд, образующихся на месте известковых скарнов, приведен в табл. 9.

К табл. 9 надлежит сделать следующие пояснения:

а. Под суммой элементов-примесей понимается совокупность содержания Na, K, Ti, H, P, Mn, V, "малых" рудообразующих элементов (Cu, Pb, Zn, Sn, W, Mo и т.п.); это содержание равняется такому в исходных известковых скарнах и остается практически неизменным (31 г/дц<sup>3</sup>) во всех градациях магнетитовых руд.

б. В качестве условного кларка магнетитового железа в рудах принимается содержание его, равное 36,2 г/дц<sup>3</sup>. Эта величина равняется содержанию Fe маг в пустых известковых скарнах.

Элементарные составы магнетитовых руд различных кондиций, новообразующихся по известковым скарнам

Химический состав руд (элемента)*	Содержание магнетитового железа ( $F_{\text{ж маг}}$ ) в скарне и скарновых магнетитовых рудах в условных кларках в единице объема															
	1	2	3	4	5	10	15	25	35	50	65	80	90	95	97,5	100
Fe маг	36,2 1,03	72,4 2,04	108,6 3,07	144,8 4,07	181,0 5,03	362,0 9,85	540,0 14,50	900,0 23,35	1258,0 31,55	1800,0 42,90	2340,0 53,20	2882,0 62,96	3258,0 67,40	3429,0 69,47	3530,0 70,45	3620,0 71,47
O	1423 40,35	1423 40,24	1423 40,10	1423 40,00	1423 39,70	1423 38,93	1423 38,25	1423 36,85	1423 35,70	1423 33,90	1423 32,33	1423 30,60	1352 28,80	1376 27,76	1368 27,33	1360 26,87
Si	687,4 19,50	687,4 19,44	687,4 19,40	687,4 19,35	685,0 19,10	620,0 16,97	582,0 15,65	505,0 13,13	430,0 10,76	316,0 7,54	204,0 4,65	90,6 1,97	44,5 0,91	29,2 0,59	18,8 0,37	8,0 0,16
Al	84,5 2,40	82,5 2,33	80,8 2,27	78,6 2,21	78,0 2,18	76,6 2,16	72,3 1,94	63,8 1,66	54,8 1,37	41,9 1,00	28,9 0,66	15,6 0,34	13,8 0,29	12,9 0,26	12,4 0,25	12,0 0,24
Fe сил	376,0 10,65	369,0 10,41	361,0 10,17	353,0 9,93	352,0 9,83	339,5 9,30	319,0 8,58	277,5 7,20	236,0 5,92	173,5 4,14	111,7 2,53	49,6 1,08	30,8 0,63	22,0 0,44	17,3 0,35	12,0 0,24
Ca	785,6 22,28	768,0 21,75	751,0 21,21	735,0 20,68	733,0 20,45	708,0 19,36	665,0 17,90	579,0 15,02	492,0 12,32	361,0 8,59	231,0 5,23	100,0 2,10	57,5 1,05	30,0 0,60	18,9 0,37	7,0 0,14
Mg	90,3 2,56	90,3 2,56	90,3 2,55	90,3 2,54	90,3 2,50	81,5 2,23	76,5 2,06	66,6 1,73	56,8 1,42	42,1 1,00	27,2 0,62	12,4 0,27	12,0 0,25	12,0 0,24	12,0 0,24	12,0 0,24
C	13,0 0,37	13,0 0,37	13,0 0,37	13,0 0,37	13,0 0,36	11,6 0,36	10,8 0,299	9,2 0,24	7,7 0,19	5,35 0,19	3,0 0,07	1,0 0,02	1,0 0,02	1,0 0,02	1,0 0,02	1,0 0,02
Сумма элементов-примесей	31,0 0,87	31,0 0,87	31,0 0,87	31,0 0,85	31,0 0,85	31,0 0,85	31,0 0,83	31,0 0,82	31,0 0,77	31,0 0,74	31,0 0,69	31,0 0,65	31,0 0,65	31,0 0,62	31,0 0,62	31,0 0,62
Итого по сумме 78 элементов	3527 100 151,4	3537 100 151,4	3547 100 151,4	3557 100 151,4	3586 100 151,4	3650 100 151,4	3720 100 151,4	3855 100 151,4	3990 100 151,4	4194 100 151,4	4400 100 151,4	4587 100 151,4	4835 100 153,0	4953 100 153,9	5009 100 154,3	5063 100 154,7

\* Содержание отдельных элементов и суммы элементов-примесей обозначены в г/дц<sup>3</sup> и вес, %:  $\frac{\text{г/дц}^3}{\text{вес, \%}}$ , последняя строка таблицы (итого по сумме 78 элементов) представлена тремя цифрами и обозначается

$\frac{\text{г/дц}^3}{\text{вес, \%}}$   
число г/т/ом

в. В рудах производных от скарна увеличение "магнетитового железа" происходит пропорционально принимаемым условным кларкам его в расчете на 1 дц<sup>3</sup> руды.

г. Приращение "магнетитового железа" в рудах происходит за счет уменьшения содержания Si, Al, Fe<sub>сил.</sub>, Ca, Mg, C по принципу "атом за атом" (метамоматически); соотношение атомных содержаний перечисленных элементов в рудах сохраняется близким к тем, которые характерны для исходного скарна.

Расшифровка состава и количества "малых" элементов примесей в сплошных магнетитовых скарновых рудах приведена в табл. 10.

Таблица 10

Состав и содержания "малых" элементов-примесей  
в сплошных магнетитовых рудах

Эле- менты	Si	Al	Ca	Na	K	Mg	Ti	H	P	Mn	C	V	"Малые", рудоб- разующие	Сумма при- месей
Содер- вес. %	0,15	0,24	0,14	(0,1)	(0,1)	0,24	0,06	(0,05)	(0,04)	0,08	(0,02)	0,002	(0,18)	1,40
Содер- г/дц <sup>3</sup>	8,0	12,0	7,0	(5,0)	(5,0)	12,0	3,0	2,70	(1,9)	4,0	(1,0)	0,1	(9,5)	70,9

Пояснения к табл. 10:

а. Цифры в скобках - приближенные.

б. Сумма примесей "малых" (рудобразующих) элементов (Pb, Zn, Ca, Sn и т.п.) принимается равной таковой в гранодиоритах (9,5 г/дц<sup>3</sup>).

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

6.2. Сами энергетические расчеты произведены в соответствии с вышеприведенными формулами (9, 17, 20) и со схемой расчета энергии (см. табл. 2).

Окончательные результаты этих расчетов в сводном виде представлены в табл. II, там же приведены некоторые необходимые дополнительные сведения.

Уравнением, аппроксимирующим приведенные в последней строчке (табл. II) данные по условным запасам привнесенного магнетитового железа, с выражением их через условные кларки содержаний этого железа  $K^I = (K-I)$  в руде, является

Результаты расчета энергии образования скарновых магнетитовых руд

Показатели	Концентрация Fe маг в I дц <sup>3</sup> руды в усл. кларках (I усл. кларк=36,2 г/дц <sup>3</sup> )															
	I	2	3	4	5	10	15	25	35	50	65	80	90	95	97,5	100
Полное содержание Fe маг:																
г/дц	36,2	72,4	108,6	144,8	181,0	363,0	540,0	900,0	1258,0	1800,0	2340,0	2888,0	3525,0	3439,0	3530,0	3620,0
г/атом/дц <sup>3</sup>	0,645	1,29	1,93	2,58	3,23	6,45	9,65	16,13	22,57	32,25	41,93	51,60	58,45	61,60	63,25	64,50
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
Объемная масса, г/дц <sup>3</sup>	3527,0	3537,0	3547,0	3557,0	3586,0	3650,0	3720,0	3855,0	3990,0	4194,0	4400,0	4587,0	4835,0	4953,0	5009,0	5063,0
Содержание привнесенного Fe маг:																
усл. кларк/дц <sup>3</sup>	—	1,0	2,0	3,0	4,0	9,0	14,0	24,0	34,0	49,0	64,0	79,0	89,0	94,0	96,5	99,0
г/дц <sup>3</sup>	—	36,2	72,4	108,6	144,8	324,0	504,0	864,0	1222,0	1764,0	2304,0	2846,0	3222,0	3403,0	3494,0	3594,0
Энергия образования Fe маг, усл.ед.:																
единицы объема	—	1,26	3,45	5,78	8,41	24,0	41,8	83,0	128,8	205,8	298,0	475,3	581,4	703,5	864,7	1565,0
единицы массы	—	34,8	47,7	53,2	58,2	74,1	83,0	96,1	105,0	116,5	129,3	167,0	180,2	206,5	247,5	437,0
Доля рудообразующей энергии по Больцману, усл.ед.	—	1,0	0,5	0,333	0,25	0,111	$7,14 \times 10^{-2}$	$4,17 \times 10^{-2}$	$2,94 \times 10^{-2}$	$2,04 \times 10^{-2}$	$1,56 \times 10^{-2}$	$1,27 \times 10^{-2}$	$1,12 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-2}$	$1,04 \times 10^{-2}$	$1,02 \times 10^{-2}$
Запас привнесенного Fe маг, усл.ед.	—	$2,88 \times 10^{-2}$	$1,05 \times 10^{-2}$	$6,26 \times 10^{-3}$	$4,30 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$8,69 \times 10^{-4}$	$4,35 \times 10^{-4}$	$2,80 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-4}$	$1,21 \times 10^{-4}$	$7,58 \times 10^{-5}$	$6,25 \times 10^{-5}$	$5,15 \times 10^{-5}$	$4,15 \times 10^{-5}$	$2,34 \times 10^{-5}$
То же при P <sub>99</sub> = I	—	12,34,0	450,0	268,0	184,0	64,3	56,8	18,65	12,0	7,49	5,19	3,25	2,68	2,25	1,795	1,0

$$P_K = \frac{1234}{e^{0,35(K^I - 1)0,33}} \cdot K^I \quad (28)$$

В этом случае для всех значений  $P_{K^I}$  в пределах  $1 \leq K^I \leq 89$  получаемые по уравнению цифры запасов отличаются от полученных непосредственными расчетами (приведены в табл. II) максимально на -7,5% для  $K^I = 64$  и на +9,5% для  $K^I = 89$ , что может быть признано за удовлетворительные погрешности. В то же время для последних трех значений  $P_{K^I}$  при  $K^I = 94; 96,5; 99$  получаем только плюсовые отклонения против табличных, равные соответственно 19,4; 44,0 и 148,0%. Эти величины по относительным значениям, конечно, велики, но приходится на область запасов ультра-богатых руд, играющих в общем балансе запасов скарновых магнетитовых руд отчетливо ничтожную роль (см. табл. II). Поэтому с указанными расхождениями можно смириться и признать аппроксимирующее уравнение (28) удовлетворяющим практические запросы. Тогда, принимая полученную по этому уравнению (28) величину  $P_{K^I}$  (при  $K^I = 99$  кларков и равную 2,48 запасов в условных единицах) за условную единицу запасов и переходя к условным кларкам концентрации  $K$  (полного содержания магнетитового железа в рудах), получим окончательно аппроксимирующее уравнение в виде:

$$P_K = \frac{498}{e^{0,35(K-2)0,33}} \cdot (K-1) \quad (29)$$

Это уравнение и используется в дальнейшем (рис. 6).

Ряд практически интересных выводов при использовании этого уравнения приведен в табл. I2 и I3.

К табл. I2 и I3 следует сделать следующие замечания:

а. Приведенные содержания магнетитового железа в весовых процентах при необходимости могут быть переведены в весовые же процентные содержания магнетита путем умножения на 1,38.

б. Доля собственно промышленных руд невелика (12%), если в подсчете учитываются все классы руд и повышается, при повышении нижнего предела содержания металла в добываемых рудах.

в. Табл. I2 и I3 имеют силу в применении к участку земной коры с однородным скарновым оруденением.

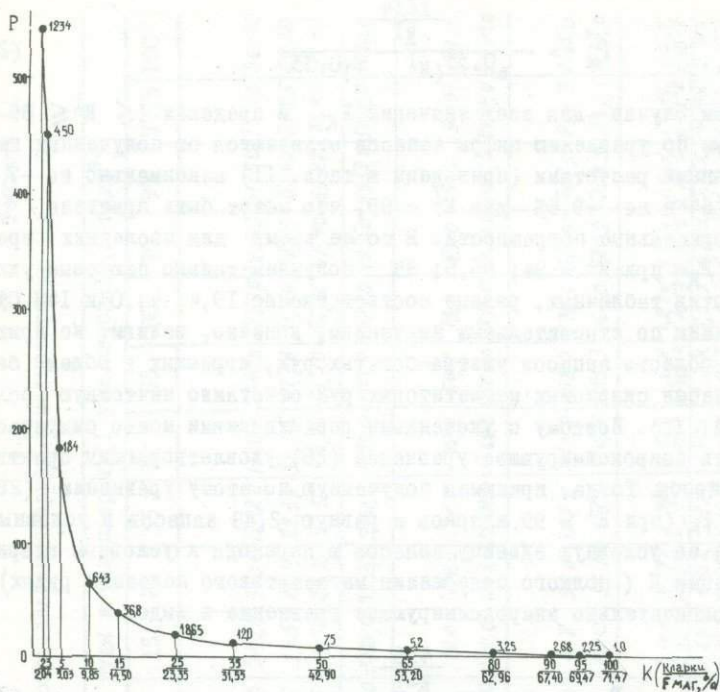


Рис. 6. График дифференциальных запасов железа (магнетитового) в скарновых месторождениях.

Таблица 12

Результаты расчета относительных запасов скарновых магнетитовых руд различных градаций

Градация руд	Интервалы содержаний магнетитового железа		Относительная доля в общем балансе, %	Средне-взвеш. содержания	
	весовые в процентах	кларки концентрации		вес, %	кларки концентрации
Убогие	2,04-10,30	2-10,5	65,3	3,60	3,5
Резервные	10,30-31,0	10,5-34,5	22,4	16,55	17,0
Промышленные	31,0-71,47	34,5-100	12,3	45,50	54,0
Всего	2,04-71,47	2-100	100,0	5,07	5,0

Таблица 13

Результаты расчета относительных запасов скарных магнетитовых руд  
при условии повышения нижнего предела содержания металла

Классы скарно-во-магнетитовых руд	Интервалы содержания магнетитового железа, вес. %	Доля запасов магнетитового железа в общем балансе, %	Доля запасов руд данных содержания, %	Доля объемов руд данных содержания, %	Средневзвешенное содержание магнетитового железа, вес. %
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	100,0	33,55
Убогие	не учитывались				
Резервные	не учитывались				
Промышленные	31,00-71,47	100,00	100,00	100,00	45,50
Всего	31,00-71,47	100,00	100,00	100,00	45,50

## 7. Использование расчетов энергии рудообразования

для характеристики руд сложного состава и комплексных ореолов

7.1. Расчеты энергии рудообразования по предложенным выше формулам 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 при отсутствии данных о последних как кларки для земной коры (по Виноградову). Расчет произведений  $K_i \ln K_i$  может быть выполнен по таблицам натуральных логарифмов или по специально построенной номограмме (см. рис. 3).

Дальнейший расчет предусматривает суммирование значений энергии рудообразования по всем металлам (элементам) в пробе. Если содержание элемента в пробе меньше его кларкового содержания в гранитоиде, то в этом случае рассчитывается его деконцентрация - "вынос" как отношение кларкового содержания к содержанию его в пробе.

В связи с тем, что значения "энергии привноса" и "энергии выноса" в дальнейшем иногда используются самостоятельно, рекомендуется отдельно суммировать энергию по элементам, присутствующим в пробе в вышекларковых концентрациях и по элементам, содержание которых в пробе ниже кларковых. Для получения значения суммарной энергии рудообразования "энергия привноса" и "энергия выноса" складываются. В результате для каждой точки опробования получаются три числа ("суммарная энергия", "энергия привноса" и "энергия выноса"), характеризующие энергетически как процесс рудообразования в целом, так и отдельно происходящие при этом перераспределения элементов. Формулой предусматриваются все химические элементы каждой пробы, установленные анализом. Однако, как показывает опыт работ, изменения концентраций подавляющего большинства элементов, в первую очередь основных породообразующих, незначительны и несоизмеримы с изменениями содержаний относительно кларков основных рудных элементов (элементов геохимических индикаторов оруденения). Если содержания последних в измененных породах и, особенно, в рудах меняются по отношению к содержанию их в гранитоидах в десятки, а чаще - в сотни и тысячи раз, то содержание остальных элементов меняется в десятые доли или в несколько единиц раз. Такими изменениями при расчете энергии рудообразования 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; для оловорудных месторождений - олово, вольфрам, висмут, мышьяк, цинк, медь, сви-

нец, серебро, индий, сурьма, а для месторождений золота - золото, серебро, теллур, селен, свинец, цинк, медь.

7.2. Значение использования энергии рудообразования как единого геохимического показателя может быть проиллюстрировано многими примерами.

Один из примеров - рудопоявление вольфрама (рис. 7). Представлено оно кварцево-вольфрамитовой жилой, мощностью около 0,5 м и протяженностью по простиранию 90 м

вертикально залегающей в среднезернистых двухслюдястых гранитах. Кроме кварца в жиле в незначительном количестве присутствует турмалин, флюорит, вольфрамит, пирит, арсенопирит. Вдоль забандов жилы наблюдается слабая грейзенизация. В 700 м к востоку от этой 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 вкост простирания жилы и пегматитов. Анализ проб проводился методами просыпки и высокочувствительного спектрального анализа.

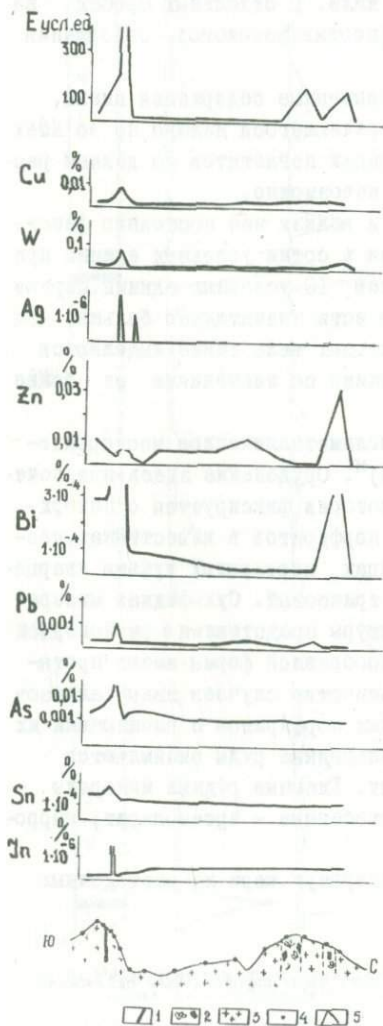


Рис. 7. Распределение содержаний элементов и значений энергии рудообразования по профилю на одном из вольфрамовых месторождений. 1 - кварцево-вольфрамитовая жила, 2 - пегматиты, 3 - граниты, 4 - места отбора проб, 5 - графики распределения содержаний элементов и значений энергии рудообразования.

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 необнаруженной минерализацией в гранитах (мышьяк, серебро, висмут). Говорить о наличии и размерах первичного ореола по этим данным сложно. Скорее можно отметить лишь незначительное локальное увеличение содержаний указанных элементов непосредственно в жиле. В отдельных пробах за пределами жилы отмечаются повышенные (против фонового) содержания многих элементов.

В пегматитах установлены только повышенные содержания цинка, вольфрама и висмута, а также бора, встречающегося далеко не во всех пробах. Говорить о геохимической индикации пегматитов по данным распределения отдельных элементов вообще невозможно.

По энергии рудообразования в жиле и вблизи нее постоянно фиксируется очень четкий ореол со значениями в сотни условных единиц при устойчивом ровном фоновом значении менее 10 условных единиц. Ширина ореола — несколько десятков метров, то есть значительно больше, чем собственная мощность жилы. Оба пегматитовых тела также выделяются четкими аномалиями энергии рудообразования со значениями ее более 100 условных единиц.

В другом примере рассматривается полиметаллическое месторождение одного из районов Приморья (рис. 8)<sup>х</sup>. Оруденение здесь приурочено к протяженной тектонической зоне, которая фиксируется с поверхности дайками диоритовых и диабазовых порфиритов в известняках, песчаниках, алевролитах и кремнистых сланцах, перекрытых туфами кварцевых порфиритов. Возраст вмещающих пород триасовый. Сульфидная минерализация в пределах тектонической структуры представлена равномерной вкрапленностью пирита. Рудные тела жилобразной формы имеют протяженность первые десятки метров. В большинстве случаев жилы залегают на контакте даек диоритовых и диабазовых порфиритов с вмещающими их туфами кварцевых порфиритов. Сплошные сульфидные руды окаймляются вкрапленностью тех же сульфидов в туфах. Главные рудные минералы — сфалерит, галенит, халькопирит; второстепенные — арсенопирит, пирротин, пирит.

Геохимическому опробованию был подвергнут керн из разведочных скважин (см. рис. 8)

<sup>х</sup> На рис. 8 приведены результаты анализов по двум опробованным скважинам (№ 1 и 3) данного месторождения.

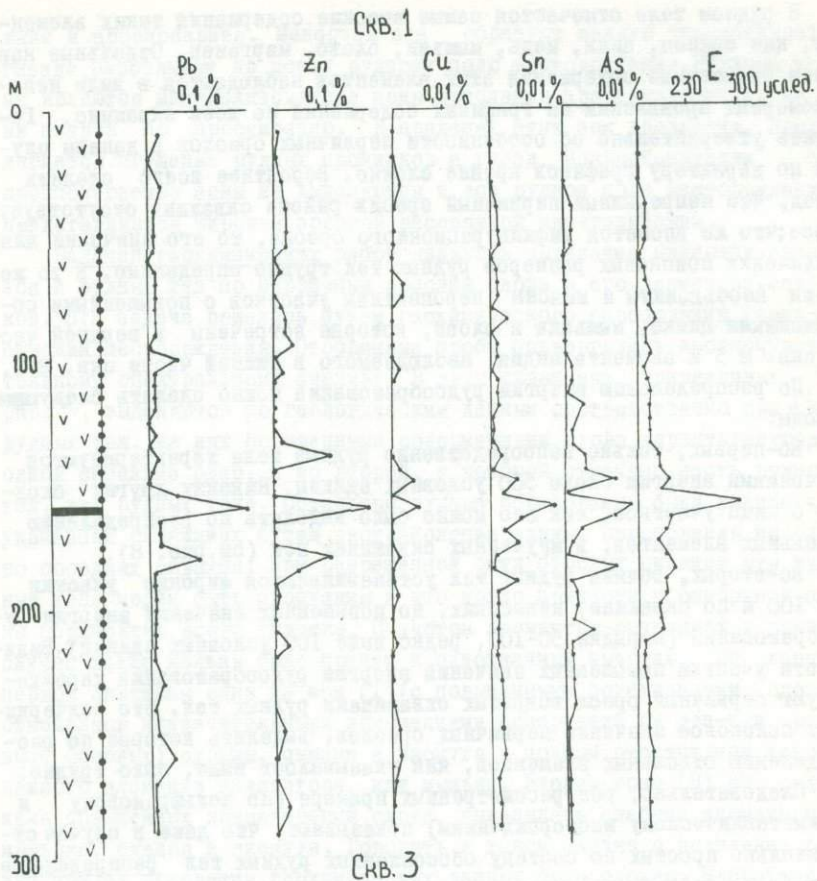


Рис. 8. Распределение содержаний элементов и значений энергии рудообразования по скважинам полиметаллического месторождения.

1 - полиметаллическое рудное тело, 2 - вмещающие эффузивные породы, 3 - места отбора проб, 4 - графики содержаний элементов и значений энергии рудообразования.

В рудном теле отмечаются самые высокие содержания таких элементов, как свинец, цинк, медь, мышьяк, олово, марганец. Отдельные наиболее повышенные содержания этих элементов наблюдаются в виде незакономерных проявлений на графиках содержаний по всей скважине. Говорить утвердительно об особенностях первичных ореолов в данном случае по характеру графиков крайне сложно. Вероятнее всего сделать вывод, что непрерывный первичный ореол в районе скважины отсутствует вовсе; что же касается инфильтрационного ореола, то его значение для увеличения поисковых размеров рудных тел трудно определимо. В то же время необъяснимы и неясны перспективы участков с повышенными содержаниями цинка, мышьяка и олова, которые встречены в верхней части скв. № 3 и элемента индия, наблюдаемого в нижней части скв. № I.

По распределению энергии рудообразования можно сделать следующие выводы:

Во-первых, только непосредственно рудные тела характеризуются значениями энергии около 500 условных единиц. Никаких других сходных с ними участков, как это можно было выделить по распределению отдельных элементов, в изученных скважинах нет (см. рис. 8).

Во-вторых, вблизи рудных тел устанавливаются широкие участки (до 100 м по скважине) невысоких, но повышенных значений энергии рудообразования (порядка 50-100, редко выше 100 условных единиц). Видимо, эти участки повышенных значений энергии рудообразования характеризуют первичный ореол вскрытых скважинами рудных тел. Это подчеркивает поисковое значение первичных ореолов, выделить которые по распределению отдельных элементов, как указывалось выше, было трудно.

Следовательно, оба рассмотренных примера (по вольфрамовому и полиметаллическому месторождениям) показывают, что даже в случае относительно простых по составу обособленных рудных тел распределение суммарной энергии рудообразования позволяет получить более контрастные и уверенные результаты, чем по распределению отдельных элементов. Еще более отчетливо эти преимущества изучения распределения энергии рудообразования проявляются при малоконтрастных и сложных по составу первичных ореолах.

В качестве примера здесь рассматриваются результаты, полученные при геохимических работах на одном из оловорудных месторождений Приморья. Морфология рудных тел этого месторождения отличается сложностью; их границы устанавливаются по данным опробования. В песчаниках и сланцах верхнемелового возраста в полосе шириной более 300 м постоянно отмечаются тонкие прожилки (мощностью от нескольких мм до 1-2 см), состоящие из кварца, турмалина, флюорита, серицита, карбонатов и рудных минералов - касситерита, пирита, сфалерита, пирро-

тина и арсенипирита. Минералы эти образуют мелкую вкрапленность и гнезда, рассеянные по всему рудному полю месторождения. Рудными телами являются минерализованные зоны дробления, прослеживающиеся на сотни метров по простиранию. В пределах этих зон дробления предполагается сгущение рудных прожилков и гнезд. Макроскопически эти предполагаемые зоны не выделяются, и все рудное поле месторождения представляется широкой полосой рассеянной минерализации.

Задачей геохимических работ являлось выделение минерализованных зон и рудных тел по первичным ореолам олова и его элементов-спутников. Эта задача решалась путем геохимического опробования кернa из скважин месторождения. Отобранные пробы подвергались высокочувствительному спектральному анализу. В двух скважинах, приведенных на рис. 9, выделяются по геологическим данным соответственно два и шесть рудных тел. Из них повышенными содержаниями олова характеризуются в одной скважине одно, а во второй, в которой отмечено шесть рудных тел, два рудных тела. Остальные рудные образования были выделены в указанных скважинах путем экстраполяции данных опробования на олово соседних скважин. При разреженной сети буровых скважин эти рудные тела могли быть пропущены и что могло привести к ошибочной оценке перспектив всего участка. С учетом элементов-спутников в данном случае также нельзя было прийти к однозначным выводам. По данным первой скважины одна из зон (I) (с повышенными содержаниями олова), отмечалась незначительными повышениями содержаний (в два-три раза выше фоновых) сурьмы, свинца и висмута и полным отсутствием такого важного элемента индикатора, как мышьяк. Вторая зона (II) не содержала повышенных концентраций олова, выделялась слабыми аномалиями мышьяка, свинца и висмута. Говорить в таком случае о выделении рудных зон на основании геохимических данных было сложно. Небольшие не совпадающие между собой повышения содержаний отдельных элементов можно было здесь рассматривать как случайные флюктуации при общей зараженности рудного поля и неравномерном их распределении. Распределение суммарной энергии рудообразования не вызывает никаких сомнений в правомочности выделений обеих зон как объектов дальнейшего исследования, на фоне низких концентраций (5-10 усл.ед.) суммарной энергии рудообразования они выделяются резкими ее повышениями (до 40-60 условных единиц). При этом ширина аномалий не менее 30-50 м, т.е. даже при достаточно широком интервале опробования эти рудные зоны не могли бы быть пропущены. Во второй скважине распределение отдельных элементов более сложное, что крайне затрудняло их интерпретацию. Только в двух зонах (I и VI) из шести отмечалось повышенное содержание олова; II и III зоны характеризовались слабым уве-

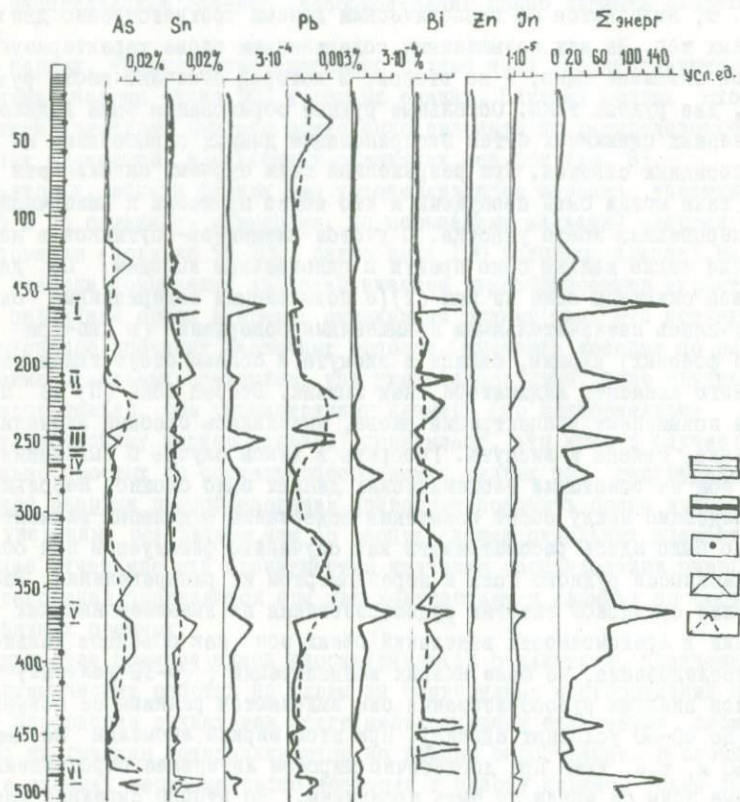
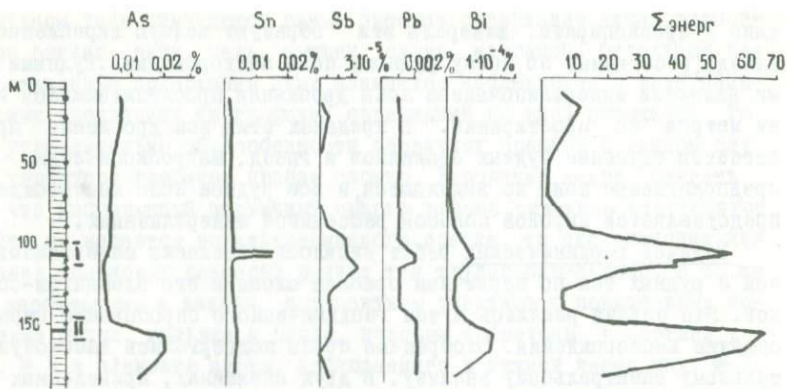


Рис. 9. Распределение содержаний элементов и значений энергии рудообразования по скважинам оловорудного месторождения.

1 - вмещающие осадочные породы, 2 - зоны оловорудной минерализации, 3 - места отбора проб, 4, 5 - графики распределения содержаний элементов и значений энергии рудообразования: 4 - фактические, 5 - сглаженные.

личением его содержаний; IV и V зоны содержали олово в фоновых его концентрациях. В то же время по этой скважине (между рудными зонами) отмечаются еще пять участков с повышенными концентрациями олова по интенсивности не меньшей, чем во II и III рудных зонах. Также сложно определение и других элементов-индикаторов оруденения. Повышенными содержаниями мышьяка отмечается только VI зона и четыре участка между рудными зонами. По содержанию свинца отчетливо выделяются два рудных тела (IV и V) и один безрудный участок. Повышенными концентрациями висмута характеризуются I, II, V и VI рудные тела и шесть безрудных участков. Очень слабые аномалии цинка отмечены в I и IV рудных телах, а индия во II, III, V и VI зонах. В целом, рассматривая распределение рудных элементов по скважине, можно отметить лишь общую неравномерную минерализацию пород. Говорить о выделении рудных тел при этом на основе этих данных не представляется возможным. По распределению суммарной энергии рудообразования все шесть рудных зон выделяются аномалиями с максимальными значениями 80-160 условных единиц, при фоновых значениях менее 10 условных единиц. Ширина аномалий 20-50 м. Кроме того несколько более слабой аномалией выделяется зона дробления между V и VI рудными телами. Ложных аномалий (не соответствующих рудным телам) методом изучения распределения энергии рудообразования не выделено. Приведенный пример убедительно свидетельствует, что расчет суммарной энергии рудообразования при сложных и малоcontrastных первичных ореолах позволяет достаточно надежно выделять перспективные рудные тела даже в том случае, когда по главному полезному компоненту из-за неравномерности его распределения тела не обнаруживаются. Этот простой и эффективный вид обработки геохимических данных может явиться полезным дополнением в применяемом комплексе поисковых методов.

### 7.3. Характеристика рудных полей в целом или их отдельных крупных частей.

Энергия рудообразования позволяет характеризовать рудное поле как единый объект по минимально аномальным значениям этого показателя, а по максимальным его значениям выделять в пределах поля отдельные ветви, рудные тела и т.д. Конечно, сходные представления можно получить, рассматривая по отдельности распределения элементов индикаторов оруденения, физических параметров минерализованных пород и пр. 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. Распределение 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 очень полезные сведения о деталях строения рудного поля, но хуже характеризуют его в целом. В качестве примера рассматривается одно из оловорудных месторождений Дальнего Востока. (Пример приводится по материалам Н.П.Емельянова и И.В.Касьяновой). Месторождение относится к хлоритово-касситеритовому типу силикатно-касситеритовой формации. Приурочено месторождение к локальной трубообразной зоне, представляющей собой сплюснутый штокверк, размером в плане 200 x 400 м. Вмещают оруденение липариты - ингимбриты мелового возраста и прорывающие их интрузивные гранит-порфиры.

По вещественному составу рудные тела делятся на касситерито-хлоритовые с небольшим количеством сульфидов и касситерит-сульфидно-хлоритово-флюоритовые. Границы рудных тел определяются по данным опробования. В строении рудных тел наблюдается зональность - постепенная смена кварцево-касситеритовой и касситеритово-флюоритово-кварцевой минерализации (приуроченной к центру рудных тел) касситеритово-сульфидной и сульфидной (располагающейся по их периферии). Сульфидная минерализация не образует сплошного чехла вокруг рудных тел; развита она отдельными участками. Геохимическими исследованиями установлено, что постоянными спутниками олова являются свинец, медь, мышьяк, серебро и цинк. Присутствуют также вольфрам, висмут, молибден и индий. Наиболее детально изучены четыре рудных тела (рис. 10). Каждое из них сопровождается обычно обособленными друг от друга первичными ореолами, представленными оловом и его элементами-спутниками. Ореолы, как и рудные тела, имеют трубообразную форму. Размеры ореолов олова и свинца превышают размеры рудных тел в 2-3 раза. Ореолы меди и мышьяка наоборот в 1,5-2 раза меньше размеров рудных тел. 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, что свидетельствует о сложном строении рудного поля с отдельными благоприятными для отложения определенных минералов участками. Говорить о связи рудных тел в пределах рудного поля и положении определяющих структур (центров минерализации) по таким разноречивым данным трудно. Суммарная энергия рудообразования рассчитывалась по всем определяемым рудным элементам для каждой пробы с использованием номограммы. Результаты расчета наносились на схему опробования, построенную в изометрической (оффинной) проекции по каждому горизонту. В качестве наиболее характерных выбраны две изоповерхности: 100 условных единиц, как наиболее наглядно

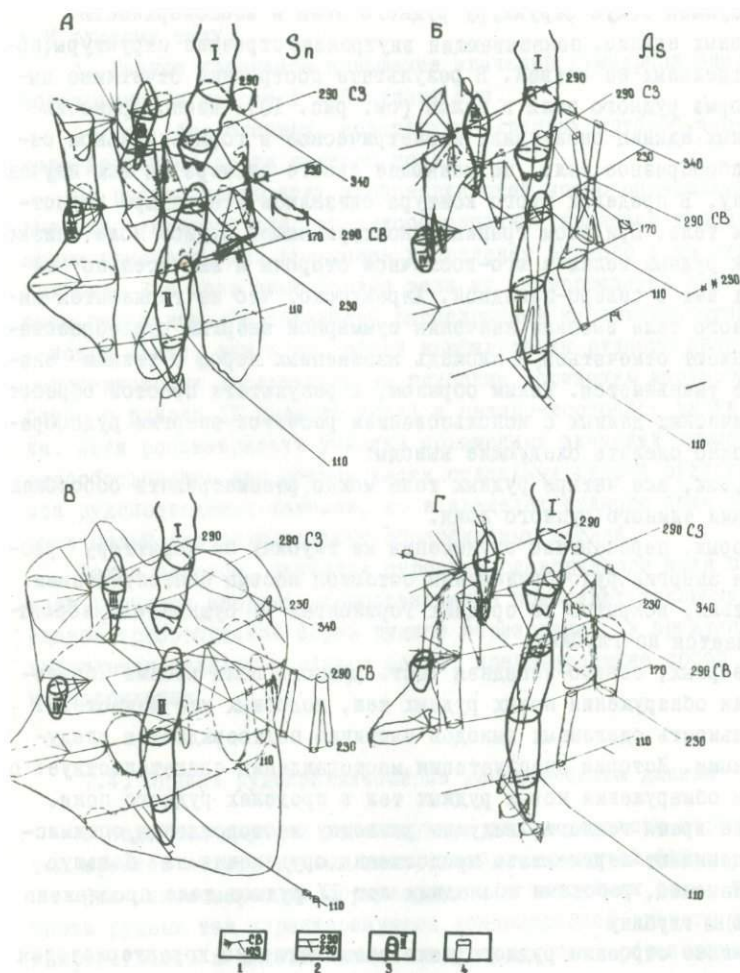


Рис. 10. Схема распределения олова (А), мышьяка (Б) и значений энергии рудообразования (В, Г) на одном из оловорудных месторождений. Оффинная проекция. (По материалам И.И.Бока и И.В.Касьяновой). Внутри изоповерхностей содержания олова и мышьяка более 0,01%; значения энергии рудообразования более 100 усл.ед. (В) и более 1000 усл.ед. (Г).

1 - горные выработки и их направление, 2 - горизонты, по которым проиэводилось оловобование, 3 - рудные тела и их номера, 4 - изоповерхности содержания элементов и значений энергии рудообразования.

характеризующая общую структуру рудного поля и изоповерхность 1000 условных единиц, показывающая внутреннее строение структуры, положение отдельных ее ветвей. В результате построений отчетливо выявилась форма рудного поля в целом (см. рис. 10). Изоповерхность 100 условных единиц оконтуривает изометрическое в горизонтальном сечении столбообразное тело, не меняющее своего размера на всю изученную глубину. В пределах этого контура оказались все четыре известных рудных тела. При этом граница, оконтуривающая рудное поле, близко подходит к рудным телам с юго-восточной стороны и значительно отступает от них с северо-западной. Характерно, что на горизонтах ниже IV рудного тела высокие значения суммарной энергии рудообразования продолжают отмечаться, и площадь измененных пород с такими значениями не уменьшается. Таким образом, в результате простой обработки геохимических данных с использованием расчетов энергии рудообразования можно сделать следующие выводы:

Во-первых, все четыре рудных тела можно рассматривать обособленными частями единого рудного поля.

Во-вторых, перспективы оруденения на глубину по характеру распределения энергии рудообразования остаются весьма благоприятными.

В-третьих, вскрытое на средних горизонтах IV рудное тело, вероятно, продолжается на глубину.

В-четвертых, северо-западная часть рудного поля весьма благоприятна для обнаружения новых рудных тел, подобных уже известным.

Правильность сделанных выводов частично подтверждается следующими данными. История эксплуатации месторождения свидетельствует о постоянном обнаружении новых рудных тел в пределах рудного поля. В последнее время геологи, ведущие разведку месторождения, оптимистически оценивают перспективы продолжения оруденения на большую глубину. Наконец, работами последних лет IV рудное тело прослежено (по падению) на глубину.

Внутреннее строение рудного поля очень наглядно характеризуется распределением в пространстве наиболее высоких значений энергии рудообразования, в частности значений, находящихся внутри изоповерхности 1000 условных единиц. 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.

1. Это очень четко выраженное столбообразное тело, пространственно совпадающее с IV рудным телом и резко увеличивающееся в поперечных размерах по падению.

2. Серия уменьшающихся по размерам с глубиной тел, относящихся к III рудному телу.

3. Резкое локальное повышение значений суммарной энергии рудообразования в районе I и II рудных тел.

4. Ряд обособленных, сближенных, крупных трубообразных тел в северо-восточной части рудного поля.

По расположению этих изоповерхностей можно определить, что повышение суммарной энергии рудообразования является весьма благоприятным признаком для выявления в пределах рудного поля отдельных рудных тел. Все известные рудные тела на месторождении легко выделяются этим признаком. По характеру расположения изоповерхностей в пространстве также, как и по общей конфигурации рудного поля, наиболее перспективными представляются глубокие горизонты месторождения, (особенно в районе IV рудного тела) и северо-восточная часть рудного поля. Если рассматривать участки повышенных значений суммарной энергии рудообразования как осевые части отдельных ветвей рудного поля или как рудоподводящих каналов, то в пределах рудного поля можно наметить целый ряд вертикальных обособленных ветвей.

Таким образом, изучение строения оловорудного поля с использованием расчетов энергии рудообразования позволяет заключить, что это единое трубообразной формы рудное образование, в пределах которого выделяются отдельные рудные ветви, представляющие собой рудные тела месторождения.

#### 7.4. Оценка рудопроявлений по геохимическим данным

В подобных случаях используются закономерности строения первичных ореолов вблизи рудных тел линейно-вытянутой формы.

Эти закономерности формулируются в следующем виде: промышленные части рудных тел характеризуются концентрацией рудного вещества непосредственно в рудовмещающих структурах без образования заметных первичных ореолов; краевые, непромышленные части рудовмещающих структур, наоборот, характеризуются рассеянием рудного вещества (первичные ореолы) не только в самих рудных структурах, но и во вмещающих их породах. Эта закономерность используется на оценочной стадии с целью разбраковки отдельных частей рудоносных структур, изученных по редкой сети выработок. При этом методика оценки, в общем, использует данные геохимического изучения первичных ореолов с отбором проб по всем поисковым выработкам. Трудность в использовании указанной закономерности заключается в том, что распределение в ореолах отдельных элементов весьма неравномерное: нередко низкое

содержание одних элементов сопровождается относительным обогащением других элементов. Поэтому судить об общей концентрации или рассеянии вещества в первичном ореоле достаточно сложно.

Использование в этом случае расчетов энергии рудообразования значительно упрощает оценку. В отличие от использованной в предыдущих примерах методики расчетов здесь рассматривается не суммарная энергия рудообразования, а отдельно "энергия привноса" и "энергия выноса". Увеличение "энергии выноса" и уменьшение "энергии привноса" в сравниваемых участках месторождения является благоприятным оценочным признаком, который успешно может использоваться в комплексе с другими геологическими, геофизическими и геохимическими признаками. Насколько контрастными являются различия по этому признаку видно из приведенных данных по одному из оловорудных районов Дальнего Востока (рис. II) (в промышленной и непромышленной их части).

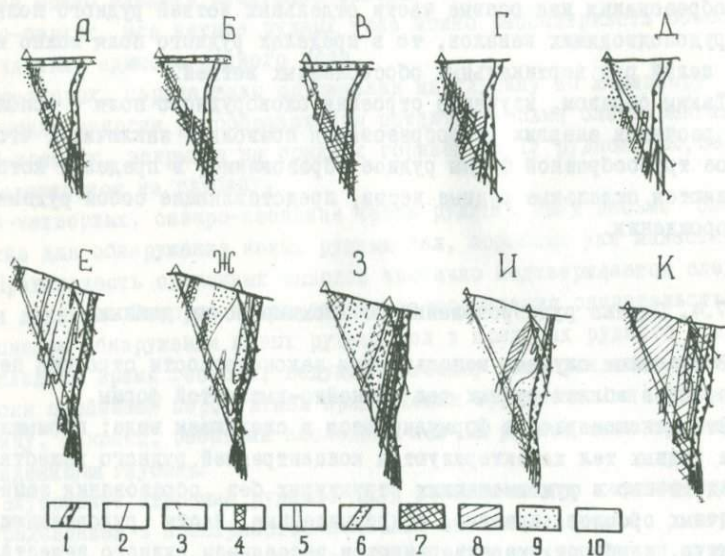


Рис. II. Распределение рудных элементов (А, Б, В, Е, Ж, З) и значений энергии рудообразования (Г, Д, И, К) по "бездрудному" (А-Д) и "рудному" (Е-К) профилям оловорудного месторождения. Распределение олова (А, Е), мышьяка (Б, Ж), серебра (В, З), энергии привноса (Г, И), энергии выноса (Д, К).

1 - рудная зона, 2 и 3 - границы ореолов: 2 - установленные, 3 - предполагаемые, 4-6 - содержания элементов: 4 - вышефоновые, 5 - фоновые, 6 - нижефоновые, 7-10 - значения энергии рудообразования: 7 - более 100, 8 - 100-26, 9 - 1-25, 10 - менее 1 усл. ед.

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 приведенном рисунке 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 вышефоновых содержаний элементов сменяются полосами фоновых и нижефоновых их содержаний. Вышефоновые содержания преобладают на разрезе, пересекающем минерализованную зону в непромышленной ее части, а нижефоновые — на разрезе, проходящем через центр рудного тела (обогащенная ее часть). 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 значительно менее контрастными. 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 значения "энергии привноса" обычно составляют 1-25 усл.ед., редко превышая это значение, а иногда не достигают даже 1 усл.ед. Значения "энергии выноса", наоборот, обычно составляют 26-100 усл.ед., иногда превышают 100 и редко уменьшаются до 1-25 усл.ед. В непромышленной части рудного тела значения "энергии привноса" обычно 26-100 усл.ед. и более 100 и очень редко 1-25 усл.ед., а "энергия выноса" не превышает 1-25 усл.ед. и часто менее 1 усл.ед. Такое различие характеристики первичного ореола весьма удобно использовать на оценочной подстадии работ.

В качестве примера оценки по этому признаку рассматриваются результаты геохимических работ на одном из оловосульфидных месторождений Дальнего Востока. Вмещают оруденение липариты-игнимбриты мелового возраста. Оруденение здесь приурочено к тектонической структуре субмеридионального простирания, прослеживающейся на 1600 м и имеющей мощность 20-150 м. С запада к основной рудной зоне примыкают несколько мелких зон, имеющих северо-западное простирание и прослеживающихся на 80-450 м. Падение всех зон крутое. В пределах зон наблюдаются метасоматиты 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, халько-

пирит, пирит, пирротин, арсенопирит. Рудные минералы образуют обыкновенно рассеянную вкрапленность и мелкие гнезда в метасоматитах. Иногда они приурочены к зальбандам рудных тел или встречаются во вмещающих породах в виде чехла 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 (на глубине 100–150 м) концентрируются медь и серебро, на наиболее глубоких горизонтах (200–300 м) наблюдаются повышенные содержания олова. Заметное скопление промышленных рудных тел наблюдается в северной части рудоносной структуры; в южной обнаруживается лишь рассеянная минерализация. Как в северной, так и в южной частях, минерализованная зона дробления вскрыта с поверхности канавами, которые опробованы по всей их длине бороздовыми пробами метровой длины. Все пробы проанализированы спектрально на большое количество рудных элементов. По результатам анализов И.В.Касьяновой детально изучено распределение рудных элементов в приповерхностной части месторождения. Из рис. 12 видно, что по характеру первичных ореолов северная и южная части месторождения различаются не сильно. Если ореолы меди в южной части несколько 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 различаются.

В северной части по "энергии привноса" очерчиваются узкие полосы, располагающиеся вблизи промышленных участков рудной зоны: значение энергии здесь превышает 26 и даже 100 усл.ед. Такое высокое значение "энергии привноса" объясняется высокими содержаниями элементов непосредственно в рудной зоне. В первичном ореоле значения не превышают 25 усл.ед., а иногда составляют одну и менее условной единицы. В южной части наблюдаются широкие по площади аномалии со значениями "энергии привноса" более 26 и более 100 усл.ед., а значений менее одной усл.ед. практически не наблюдается. "Энергия выноса" по абсолютному значению и в той и в другой частях месторождения значительно меньше (обычно 1–25, реже 26–100 усл.ед.), но ореолы выноса в северной части по площади в 2–3 раза больше, чем в южной. По такой характеристике распределения энергии рудообразования на площади месторождения южной части, несмотря на обогащение первичных ореолов

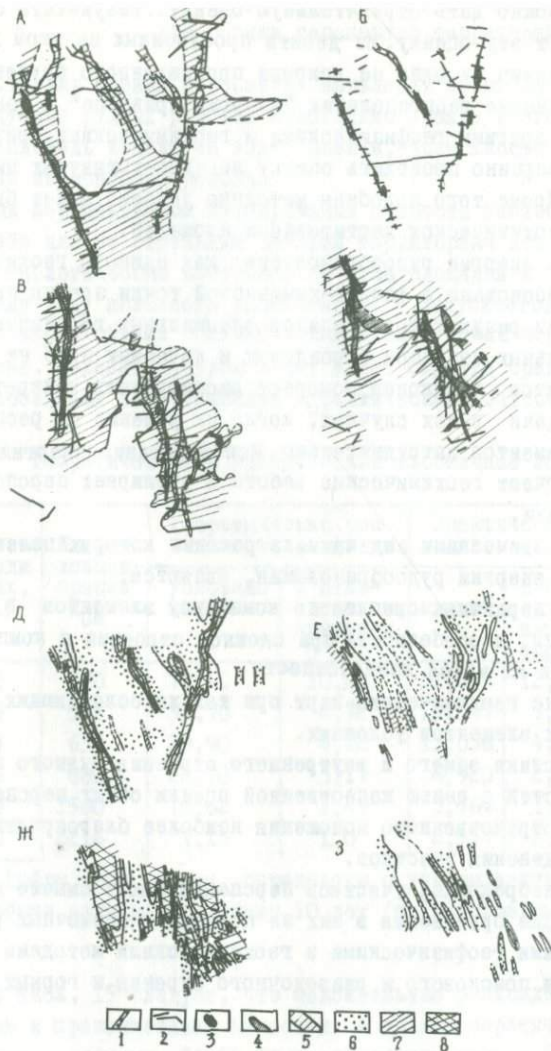


Рис. 12. Распределение олова (А, В), меди (Б, Г) и значений энергии рудообразования (Д-З) по поверхности одного из оловорудных месторождений (по данным И.И.Бока и И.В.Касьяновой). А, Б, Д, Е - промышленная часть месторождений; В, Г, Ж, З - непромышленная часть месторождения.

1 - рудные зоны, 2 - каналы, 3-5 - содержания элементов: 3 - более 0,1%, 4 - 0,01-0,1%, 5 - 0,001-0,01%; 6-8 - значения энергии рудообразования: 6 - 1-25, 7 - 26-100, 8 - более 100 усл.ед., Ж, Д - энергия привноса, Е, З - энергия выноса

оловом и медью, можно дать отрицательную оценку. Результаты буровых работ подтверждают эту оценку. Из девяти пробуренных на этом участке месторождения скважин ни одна не вскрыла промышленного оруденения. Следовательно, изучение распределения "энергии привноса" и "энергии выноса" наряду с другими геофизическими и геохимическими признаками помогает более уверенно проводить оценку линейно-вытянутых минерализованных зон. Кроме того подобная методика успешно может быть использована при геохимическом картировании площадей.

Использование энергии рудообразования как единого геохимического показателя обосновано с физико-химической точки зрения просто и удобно при наличии результатов анализов специальных геохимических проб или спектральных анализов бороздовых и керновых проб на большое количество элементов и, наконец, помогает расшифровать конкретные геологические задачи в тех случаях, когда их решение по распределению отдельных элементов затруднительно. Использование энергии рудообразования облегчает геохимические работы и расширяет перспективы прикладной геохимии.

Основными практическими задачами, в решении которых целесообразно использование энергии рудообразования, являются:

1. Выявление первичных ореолов по комплексу элементов с целью поисков рудных тел, в особенности при сложном строении и комплексном составе ореолов и их малой контрастности.
2. Составление геохимических карт при тех же осложняющих использовании 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) участков перспективных в смысле промышленной концентрации оруденения в них на подстадии оценочных работ в комплексе с другими геофизическими и геохимическими методами с минимальными объемами поискового и разведочного бурения и горных выработок.

8. Использование распределения региональных запасов  
для оценки перспектив территорий

8.1. Для оценки перспектив выявления новых запасов на площадях исследуемых рудных районов необходимо прежде всего ограничить (выбрать) площадь исходя из задач оценки, возможности метода оценки и степени изученности района.

При перспективном планировании прироста запасов в глобальном масштабе или по отдельным крупным территориям используются все имеющиеся геологические материалы по этим площадям и территориям по выбранному виду полезного ископаемого. Допускается, что при наличии достаточного объема геологических данных такая перспективная оценка возможна. Доказательством этому может служить сравнение распределения глобальных теоретических и фактических запасов меди (табл. 15).

Таблица 15

Теоретические и практические глобальные запасы меди

Содержание меди в рудах, вес. %	Кларки концентрации К <sub>Сп</sub>	Теоретические расчетные запасы меди		Практические запасы меди		Отношение запасов
		условные запасы	в относительных единицах	млн. т <sup>ж</sup>	В относительных един.	<u>практические</u> теоретическ., %
0,72	270	77,40	10,82	31,043	12,15	112
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	1,0	2,557	1,0	100,0

<sup>ж</sup> Цифры этой графы определены с учетом данных разведки и мировой добычи меди за последние 10 лет (по материалам зарубежных авторов).

Из табл. 15 следует, что максимальные расхождения между теоретическими и практическими запасами, в долях теоретических запасов, определяются цифрами -14,5% (при содержании меди - 2,06%) и +12% (при содержании меди - 0,72 и 1,49%), т.е. глобальное распределение запасов полезного ископаемого (в данном случае меди) хорошо описывается теоретической формулой (19).

Не менее важна оценка перспектив выявления новых запасов сырья определенных кондиций и в отдельных крупных рудных районах, таких как полиметаллическая провинция Рудного Алтая, Тихоокеанский оловорудный пояс, золоторудная провинция Южной Африки и т.д.

Проведенные сопоставления теоретических и фактических кривых распределения запасов по классам содержаний полезных компонентов для некоторых таких провинций (по содержаниям свинца, меди и олова) подтвердили возможность использования предлагаемой методики оценки с учетом требований, предъявляемых к масштабу и возможностям метода, а также и в отношении степени геологической изученности таких территорий.

В ряде рудных провинций была сделана попытка более крупномасштабной оценки. В качестве единицы оцениваемой площади выбирались хорошо обособляющиеся в геологическом отношении металлогенические зоны или отдельные рудные районы с однотипной рудной минерализацией. Уверенно можно говорить о возможности использования предлагаемой методики при оценке достаточно изученных рудных районов в масштабе I:200000 - I:50000.

Небольшой опыт работ имеется и по оценке отдельных частей рудных районов, выделяемых формально (например, половина или четверть площади единого рудного района), или по геологическим соображениям.

Нижним пределом площадей, на которых предлагаемая методика оценки целесообразна, является, видимо, рудное поле. Во всяком случае есть положительные примеры совпадения теоретических и фактических распределений запасов по классам содержаний отдельных оловорудных и полиметаллических рудных полей (Дальний Восток, Рудный Алтай).

Более крупномасштабные исследования подобной методики (например, оценка отдельных рудных тел) вряд ли целесообразны.

8.2. Исследования с применением указанной методики проводятся в следующей последовательности:

а. Выбирают площадь и, определив задачу оценки (глобальную, региональную, локальную или отдельных частей рудных районов и рудных полей), приступают к сбору и группировке необходимых материалов для проведения такой оценки;

б. В границах выбранной площади составляют перечень рудных объектов одного класса полезных ископаемых, материалы по разведке и эксплуатации которых являются основными данными при перспективной оценке территории в целом;

в. Определяется однотипность материала для оценки - производится по всем рудным объектам выбор данных, относящихся либо к результатам разведочных работ, желательно одной детальности, либо к результатам их эксплуатации.

В зависимости от сохранности данных по разведке и эксплуатации объектов на выбранной территории возможен один из четырех случаев:

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 средних содержаниях полезного компонента в руде и объеме руды, поступавшей на обогатительную фабрику с каждого объекта за все время их отработки;

4. Имеются сведения о среднем содержании полезного компонента и объеме добытой руды за определенные периоды эксплуатации (например, за каждый год, за пятилетие, за 10 лет и т.д.).

Все эти сведения пригодны для оценки по предлагаемой методике, и в зависимости от их характера они группируются в соответствующие таблицы (табл. 16, 17)\*, в которых определенный объем руды характеризуется определенным средним содержанием полезного компонента.

Таблица 16

Фактическое распределение запасов руды по классам содержания в ней олова для одного из оловорудных районов Дальнего Востока (по отдельным разведочным выработкам)

Название объекта	выработка	Среднее содержание по выработке, %				Запасы руды в т, отнесенные к выработке
		олово	мышьяк	свинец	медь	
Месторождение I Уч.Дальний	Скв.10 Шт.5-Р23	0,27	0,08	0,12	0,32	32500
		0,87	0,12	0,43	0,55	12600

Таблица 17

Фактическое распределение запасов полиметаллических руд по годам эксплуатации для одного из рудных районов Казахстана

Название объекта	Годы эксплуатации	Добытые запасы (в усл.ед.)	Средневзвешенное содержание свинца, %
Месторождение I	1950-1960гг.	127	2,3
Месторождение B	1930-1940гг.	50	5,7

Составлением подобных таблиц по изучаемой территории заканчивается первичный сбор необходимых для оценки материалов. Дальнейшая обработка собранных материалов заключается в составлении исходных таблиц для построения фактических кривых распределения запасов по классам содержаний.

\*Эти и другие подобные таблицы в данной работе приводятся как формы группировки собираемых необходимых материалов для проведения оценки перспектив выявления новых запасов на площадях выбранных рудных районов.

Если собранные данные соответствуют табл. 16, то составление по этим сведениям исходных таблиц не вызывает никаких затруднений. Прежде всего выбираются градации содержаний элементов в руде с таким расчетом, чтобы в построенном фактическом распределении этих классов было достаточно данных для статистических выводов. Достаточным в этом отношении может считаться 7-12 классов, обычно принимается дробное деление (15-20 классов). Приняв в этих пределах деления определенное количество классов содержаний, выбирают граничные (наибольшее и наименьшее) содержания по фактическим материалам. Весь интервал содержаний между граничными значениями делят на число принятых градаций с таким расчетом, чтобы числа, характеризующие границы градаций были достаточно округленными. Например, в исследуемом рудном районе отмечаются средние содержания (свинца) в подсчитанных блоках запасов от 0,5 до 14,5%. Весь интервал содержаний желателен распределить на 15 классов: 0-1,0%; 1,1-2,0%; 2,1-3,0% и т.д. В другом районе, например, средние содержания (олова) по отдельным разведочным выработкам колеблются от 0,07 до 2,1%. Для дальнейшей обработки весь интервал содержаний в данном случае был распределен 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 (табл. 18, 19). В том случае, если в дальнейшем предполагается использовать распределение запасов только главного полезного компонента, то и запасы группируются только по его классам содержаний. Если рассматривается, кроме того, распределение запасов элементов-спутников, то дополнительно выбираются классы содержаний по каждому спутнику, и дальнейшая группировка запасов по каждому классу содержаний каждого спутника производится таким же способом, как для главного компонента. Результаты суммирования сводятся в общие исходные построения фактического распределения таблицы (см. табл. 18, 19).

Таблица 18

Фактическое распределение запасов полиметаллических руд по классам содержаний свинца (или условного свинца) для одного из рудных районов Казахстана

Классы содержаний свинца (или условного свинца) в % (или усл.ед.)	Запасы полиметаллической руды (или металла) в т (или усл.ед.)
2,1 - 3,0	272
11,1 - 12,0	37

Фактическое распределение запасов олова и его элементов-спутников  
по классам их содержаний  
для одного из оловорудных районов Дальнего Востока

Содержание олова, %	Запасы олова, усл.ед.	Содержание меди, %	Запасы меди, усл.ед.	Содержание мышьяка, %	Запасы мышьяка, усл.ед.
0,6I-0,7	I2,3	I,5I-2,0	IO,4	0,06I-0,07	I,4
0,9I-I,0	I,3	3,I-3,5	2,7	-	-

Эти таблицы (см.табл. 18,19) являются основными для проведения оценки рудных территорий на основе использования термодинамических закономерностей, так как в них представлен основной (для этих целей) правильно сгруппированный фактический материал.

Несколько иначе обстоит дело с составлением исходных данных, когда собранные первичные материалы соответствуют табл. 17. Собранные материалы в этом случае не являются собственно первичными (они усреднены в процессе эксплуатационных работ) и не могут отразить закономерностей распределения запасов по классам их содержания. Для того, чтобы эти материалы служили исходными данными для составления основных табл.18 и 19,необходима их специальная дополнительная обработка,заключающаяся в разложении запасов (фактических) по теоретической кривой. В этом случае фактический объем добытой руды (за определенный промежуток времени) с определенным средним в ней содержанием полезного ископаемого разбивают на классы с более дробным содержанием в соответствии с теоретической кривой или формулой распределения запасов.

При разложении по теоретической кривой исходными данными, в каждом отдельном случае, являются три цифры - суммарные запасы, средневзвешенное содержание полезного компонента и его бортовое содержание, принятое при оконтуривании промышленных запасов месторождений или отдельных рудных полей. Подготовительные работы при разложении, проводимом по формуле теоретического распределения запасов по классам содержания, заключаются в составлении вспомогательных таблиц, в которых, начиная с определенного принятого бортового содержания,рассчитываются (по теоретической формуле) суммарные относительные запасы и средневзвешенное содержание для каждого класса.Пример такого расчета приведен в табл. 20 и 21.

Дальнейшее разложение по классам содержания производится на основе фактических данных - суммарных запасов и средневзвешенного содержания, записываемых в двух нижних строчках табл. 22 и 23. В конкрет-

Расчет средневзвешенного содержания  
по теоретическому уравнению распределения запасов оловянной руды  
по классам содержания олова в ней

Интервал содержания в условных кларках	Расчетный кларк в усл. ед.	Среднее содержание в %	Запасы в усл. ед.	Запасы в % к сумме	Произведение среднего содержания 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	2,76	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
			42438	99,991	85,11			

Расчет средневзвешенного содержания по теоретическому уравнению распределения запасов  
 полиметаллических руд по классам содержания свинца в них  
 $K = 1 - 0,1\%$

Интервал содержаний в условных кларках	Расчетный кларк в условных единицах	Среднее содержа- ние в %	Запасы в услов- ных еди- ницах	Запас в % к сумме	Произведе- ние сред- него содер- жания на запасы	Нараста- ющая сумма произ- ведений	Нараста- ющие за- пасы	Средне- взвешенное 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	0,731	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

Разложение запасов отдельных рудных полей оловорудного района  
по формуле теоретического распределения запасов по классам содержаний

Классы содержаний	Номера рудных полей												Всего
	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	50,7
0,25	6,8	1,2	1,8	2,0	3,1	6,3	2,2	2,1	2,2	0,6	1,0	0,1	29,5
0,35	4,8	0,8	1,3	1,4	2,2	4,4	1,6	1,5	1,6	0,5	0,7	0,07	20,9
0,45	3,7	0,6	1,0	1,1	1,77	3,4	1,2		1,2	0,4	0,6	0,06	15,1
0,55	3,0	0,5	0,8	0,9	1,4	2,8	0,9		1,0	0,3	0,4		12,1
0,65	2,5	0,4	0,7	0,7	1,1		0,8		0,8	0,2	0,4		7,9
0,75	2,2	0,4	0,6	0,6	1,0		0,7		0,7	0,2	0,3		6,6
0,85	1,9	0,3	0,5	0,6	0,9		0,6		0,6	0,2	0,3		6,0
0,95	1,7	0,3	0,5	0,5	0,8		0,6		0,6	0,2	0,3		5,3
1,05	1,5	0,3	0,4	0,4	0,7		0,5		0,5	0,1	0,2		4,7
1,15	1,4	0,2	0,4	0,4	0,6		0,5		0,5	0,1	0,2		4,3
1,25	1,3	0,2		0,4	0,6		0,4		0,4	0,1	0,2		3,6
1,35	1,2	0,2		0,3	0,5						0,2		2,5
1,45		0,2			0,5						0,2		0,9
1,55		0,2			0,5						0,2		0,8
1,65		0,2			0,5						0,2		0,8
1,75		0,2			0,4						0,1		0,7
1,85		0,1									0,1		0,2
1,95		0,1									0,1		0,2
Всего по руд- ному полю	44,0	8,5	11,2	12,8	21,9	27,6	13,9	7,2	14,1	4,0	7,3	0,4	173,0
Ср. взв. сод. по рудн. 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	

Разложение добытых по определенным интервалам времени запасов полиметаллических руд по формуле теоретического распределения запасов по классам содержания

Классы содержания	Добыча руды (в условных единицах) по годам										Всего	
	до 1917	1917-25	1926-30	1931-35	1936-40	1941-45	1946-50	1951-55	1956-60	1961-66		
0,25											99,012	99,012
0,35									97,464		68,372	165,838
0,45									74,259		52,093	126,352
0,75									42,587		29,875	204,956
1,25									23,955		16,605	166,887
1,75									16,381		11,481	114,117
2,25				4,039	11,947	14,554	15,289	22,988	12,303		8,631	74,462
2,75				3,170	9,376	11,422	11,999	18,041	9,656		6,774	70,438
3,25		0,647	0,871	2,608	7,713	9,396	9,870	14,840	7,943		5,572	59,460
3,75		0,541	0,727	2,180	6,448	8,252	8,252	12,406	6,640		4,658	49,707
4,25	0,266	0,467	0,628	1,862	5,570	7,855	7,126	10,713	5,734		4,022	43,171
4,75	0,235	0,412	0,554	1,659	4,908				5,054		3,546	22,649
5,25	0,202	0,355	0,478	1,432	4,234				4,381		3,059	14,121
5,75	0,179	0,314	0,422	1,264					3,854		2,701	8,731
6,25	0,164	0,288	0,388	1,162					3,539		2,483	8,024
6,75	0,149	0,262	0,352	1,055					3,214		2,255	7,287
7,25	0,137	0,241	0,324	0,971							2,076	3,749
7,75	0,125	0,219	0,295	0,883							1,887	3,409
8,25	0,115	0,202	0,271	0,813							1,738	3,139
8,75	0,106	0,187	0,251	0,753							1,609	2,906
9,25	0,098	0,173	0,238	0,697							1,490	2,691
9,75	0,093	0,163	0,219	0,655							1,400	2,530
10,25	0,085	0,150	0,202									0,437
10,75	0,082	0,141	0,189									0,412
11,25	0,076	0,133	0,178									0,387
11,75	0,071	0,125	0,167									0,363
12,5	0,064	0,113	0,152									0,329
13,5	0,058	0,103	0,138									0,299
14,5	0,053	0,093	0,125									0,271
15,5	0,048	0,084	0,113									0,245
16,5	0,044	0,077	0,104									0,225
17,5	0,040	0,070	0,095									0,205
18,5	0,037	0,065	0,086									0,158
19,5	0,035	0,061										0,096
20,5	0,032	0,057										0,089
21,5	0,029	0,052										0,081
22,5	0,027											0,027
23,5	0,026											0,026
24,5	0,024											0,024
25,5	0,023											0,023
26,5	0,022											0,022
27,5	0,020											0,020
28,5	0,019											0,019
29,5	0,017											0,017
<b>Всего</b>	<b>2,801</b>	<b>5,827</b>	<b>7,563</b>	<b>25,225</b>	<b>89,389</b>	<b>97,725</b>	<b>161,865</b>	<b>233,924</b>	<b>316,941</b>	<b>331,559</b>	<b>1272,819</b>	
<b>Среднее содержание в %</b>	<b>9,74</b>	<b>7,69</b>	<b>7,18</b>	<b>4,73</b>	<b>2,56</b>	<b>2,27</b>	<b>1,87</b>	<b>1,75</b>	<b>1,26</b>	<b>1,18</b>	<b>1,723</b>	

ном случае в табл. 22 эти данные относятся к отдельным полям одного из оловорудных районов, представленного 12 рудными полями, и в табл. 23 для разных временных периодов (10 периодов по 5 лет каждый) эксплуатации известного с давних времен полиметаллического рудного района.

Каждая из вертикальных граф этих таблиц соответствует разложению суммарных запасов одного рудного поля (см. табл. 22) или одному временному периоду эксплуатации рудного района (см. табл. 23) пропорционально относительным запасам и соответствующим им средневзвешенным содержаниям, приведенным в табл. 20 и 21.

Как пример рассмотрим II рудное поле оловорудного района (вторая колонка, табл. 22).

Фактические данные, относящиеся к этому рудному полю: запасы руды 8,5 усл.ед., средневзвешенное содержание 0,64%, бортовое содержание (K) 0,1%.

Для этого рудного поля из табл. 20 находим произведение среднего содержания на относительные запасы, которое равно 85,11 усл.ед. Далее используем данные о фактических запасах и находим их переходный коэффициент к теоретическим запасам -  $8,5:85,11 = 0,099$ . С помощью этого полученного коэффициента рассчитываются фактические запасы для каждого класса содержаний (см. табл. 22).

Так, для среднего содержания, равного 0,15% (третья колонка, табл. 20), фактические запасы будут равны 2 (20,795 · 0,099); для среднего содержания 0,25% - 1,2 (12,107 · 0,099); для среднего содержания 0,35% - 0,8 (8,561 · 0,099) и т.д.

После проведения разложений (по классам содержаний) по всем рудным полям или временным периодам эксплуатации вычисляются суммарные запасы по всем классам содержаний (последняя колонка, табл. 22 и 23). В конечном результате первая и последняя колонки в этих таблицах содержат все необходимые сведения для составления таблиц типа I8 и I9, которые, как указывалось выше, являются основными и более простыми при обработке фактических данных, касающихся исследуемых рудных полей и районов.

8.3. Использование исходных таблиц (типа табл. I8 и I9) является собственно оценкой потенциальной рудоносности изучаемой территории.

Методика этой оценки заключается в следующем:

I. По данным табл. I8 и I9 строится график запасов по классам содержания (рис. I3): по оси абсцисс откладываются средние содержания полезного компонента - K, а по оси ординат его запасы -  $P_{K\%}$  усл.ед. или  $\%$ . На такой график наносится построенная кривая теоретического распределения запасов, соответствующая тем же классам содержания.

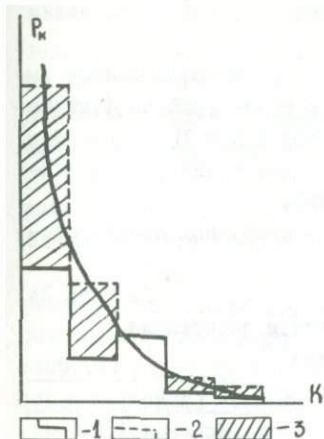


Рис. 13. Схема оценки потенциальной рудоносности площадей.  
1 - фактические (выявленные) запасы;  
2 - запасы, рассчитанные по теоретической формуле; 3 - запасы невыявленные.

2. Перед тем как строить кривую, рассчитывают теоретические запасы, используя вспомогательные таблицы типа табл. 20, 21 или формулу теоретического распределения запасов по классам содержаний полезных компонентов, которая имеет вид:

$$P_K = \frac{100\%}{K} \cdot e^{\alpha(K-1)^n}.$$

3. Однако эта формула в зависимости от конкретных особенностей рудных районов может изменяться в отношении уточнения значений коэффициентов ( $\alpha$  и  $n$ ), характеризующих эти особенности.

Уточнение значений этих коэффициентов проводится только в том случае, если распределения запасов по теоретической кривой и фактическому графику относительно близко совпадают,

что характерно для достаточно детально опроскованных рудных площадей (старые горнорудные или новые интенсивно разведываемые промышленные районы). В таких случаях кривая и график совпадают не менее чем в двух точках и ни одна точка фактического графика (по значению ординаты) не больше соответствующей точки теоретической кривой. Выбор таких (совпадающих) точек производится путем подбора в пределах отрезков, относящихся к средним частям кривой и графика, где совпадение их наиболее вероятно. Практически поступают следующим образом: берут любые две точки (кроме первых двух крайних) на оси абсцисс (расположение точек фактического распределения запасов по классам содержаний) с определенными значениями  $K$  (кларка концентрации), и если в этих точках  $K$  теоретическая кривая и фактический график совпадут, то в этом случае каждой точке  $K$  соответствует определенное и единственное значение запасов  $P_K$ .

Подставив значения  $K$  и  $P_K$  в теоретическую формулу, получим следующую систему уравнений:

$$P_1 = \frac{I}{K_1} \cdot e^{\alpha(K_1-1)^n}; \quad P_2 = \frac{I}{K_2} \cdot e^{\alpha(K_2-1)^n}.$$

Решив эту систему уравнений с помощью функции  $y = e^x$ , определим значения коэффициентов  $\alpha$  и  $n$ .

В случае, если полученная теоретическая кривая (с использованием вычисленных  $\alpha$  и  $n$ ) пройдет ниже хотя бы одной точки графика фактического распределения, то уточнение коэффициентов ( $\alpha$  и  $n$ ) следует повторить, выбрав в качестве совпадающих иные две точки фактического распределения запасов по классам содержаний.

Пример подобных расчетов (для одного из оловорудных полей) приведен в табл. 24 и 25.

Таблица 24

Фактическое распределение запасов по классам содержаний  
(для одного из оловорудных полей)

Запасы (в усл.ед.)		Средние содержания (в усл.ед.)	
Фактические	Приведенные	Фактические	Приведенные
775,0	193,8	450	0,4
283,2	70,8	1540	0,6
269,6	67,4	2400	1,0
41,0	10,2	3750	1,6
52,8	13,2	4570	1,9
30,6	7,6	5670	2,4
13,4	3,8	6400	2,7
17,6	4,4	8000	3,3
4,0	1,0	9600	4,0

Таблица 25

Теоретическое распределение запасов по классам содержаний  
(для одного из оловорудных полей)

Приведенные фактические запасы	Приведенные фактические содержания	Произведение запасов на содержание	Теоретические запасы (усл.ед.)
193,8	0,4		3400
70,8	0,6		210
67,4	1,0	67,4	67,4
10,2	1,6	16,3	18,8
13,2	1,9	25,1	13,2
7,6	2,4	18,2	8,6
3,8	2,7	9,9	6,8
4,4	3,3	14,5	4,4
1,0	4,0	4,0	2,3

В первой и третьей колонках (табл. 24) показаны фактические запасы руд по классам с соответствующими средними содержаниями (усл.ед.); во второй и четвертой колонках запасы и среднее содержание соответственно преобразованы (приведены). При преобразовании конечные минимальные запасы приравнялись единице, а остальные цифры запасов по классам содержаний изменялись также в соответствии с этим уравниванием. То же было сделано и со средним содержанием рудного компонента для каждого класса запасов.

Приведенные в табл. 24 запасы и средние содержания (колонки 2 и 4) являются исходными для построения фактического распределения запасов по классам содержаний и вычисления коэффициентов в уравнении теоретического распределения запасов. Близость фактического распределения запасов теоретической формуле устанавливается по произведению запасов на содержания по классам (табл. 25). Постоянное уменьшение этого произведения свидетельствует о распределении, близком к теоретическому.

В приведенном примере уточненные коэффициенты рассчитаны путем приравнивания теоретического и фактического распределений в точках, соответствующих запасам и содержаниям пятой и восьмой строк табл. 25.

$$13,2 = \frac{\frac{67,4}{1,9}}{e^{\alpha(1,9 - 1)^n}},$$

$$4,4 = \frac{\frac{67,4}{3,3}}{e^{\alpha(3,3 - 1)^n}}.$$

В результате решения этой системы уравнений были определены значения коэффициентов  $\alpha$  и  $n$  и тем самым уточнено уравнение (29).

$$P_K = \frac{\frac{67,4}{K}}{e^{0,9(K-1)^{0,5}}}.$$

Таким образом, оценка перспективной рудоносности заключается собственно в вычислении разности значений ординат теоретической кривой и фактического графика при абсциссе, соответствующей каждому классу содержаний. Графически это изображено на рис. 14 и 15. Окончательным же результатом оценки является таблица минимальных, не выявленных еще на изучаемой территории, запасов по классам содержаний (табл. 26) и общих запасов при разных бортовых содержаниях и соответствующих значениях средневзвешенных содержаний (табл. 27).

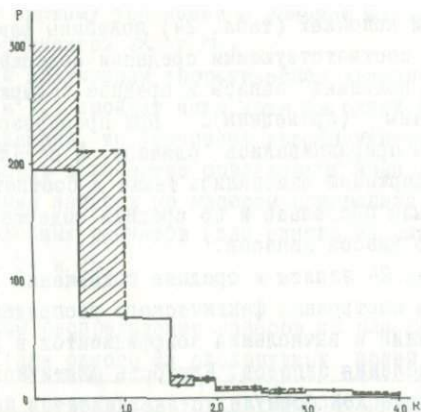


Рис. 14. Результаты оценки одного из оловорудных полей. Рассчитано по отдельным выработкам. Условные обозначения как на рис. 13.

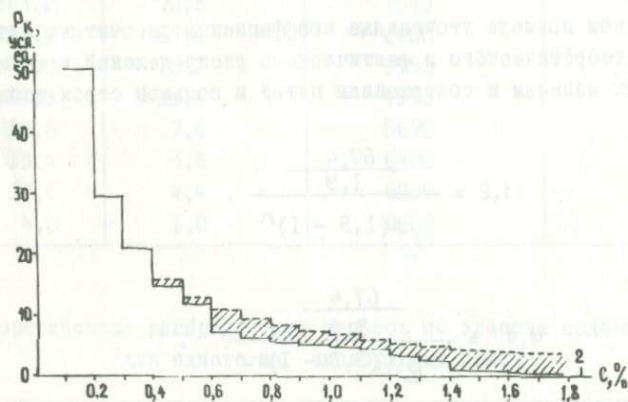


Рис. 15. Результаты оценки одного из оловорудных районов. Рассчитано по методу разложения запасов. Условные обозначения как на рис. 13.

Таблица 26

Результаты оценки изучаемой территории  
с точки зрения выявления новых запасов руды

Среднее содержание (в % или усл.ед.)	Невыявленные запасы в тыс.т или усл.ед.	Произведение содержания
3,2	124,1	397,1
10,1	7,1	71,7

Значения невыявленных запасов руды  
при разных бортовых содержаниях полезного компонента

Бортовое содержание (усл.ед., % ;ныне принято=I)	Невыявленные запасы (усл.ед., тыс.т)	Средневзвешенное со- держание (усл.ед., %)
I (ныне принятое)	1324,7	4,8
0,75	23437,1	1,9
0,50	574428,4	0,7

Графики ( см.рис.14,15) и таблицы (типа табл.26,27) являются необходимыми и важными в объяснительных записках к металлогеническим картам при оперативном (долгосрочном) планировании прироста запасов по крупным рудным площадям и территориальным геологическим подразделениям при составлении проектов на мелко- и среднемасштабные поиски и разведку в пределах рудных полей, в отчетах по результатам поисковых и поисково-оценочных работ.

8.4. В качестве конкретных примеров оценки рассмотрены три рудных региона.

8.4.1. Первый регион представлен месторождениями полиметаллических руд, на базе которых с давних лет (с XVII столетия) организована горнодобывающая промышленность.

В связи с этим, следовательно, получить сведения о запасах руд по отдельным месторождениям, а тем более по вынутым (подсчетным)блокам или отдельным разведочным выработкам практически было невозможно. В этом случае использовались материалы по добыче за относительно короткий срок (начиная с 20-х годов текущего столетия). Данные группировались по интервалам времени в 5 лет.Для расчета фактического распределения запасов был применен метод разложения запасов по уточненной выше формуле (29):

$$P_K = \frac{821000000}{K} e^{0.07(K-1)0.52}$$

Теоретическое распределение запасов, отвечающее этой формуле, приведено в табл. 28.

Разложение фактически вынутых при эксплуатации запасов производилось по описанным выше методикам (см.табл.22,23). График фактического распределения запасов приведен на рис. 16.

Количество невыявленных запасов полиметаллических руд по отношению к добытым составляет 34%.Распределение их по классам содержаний приведено в табл. 28.

Расчет энергии рудообразования  
и распределения запасов полиметаллических руд  
по классам содержаний свинца

Содержания свинца		Кларк концент- рации относи- тельно грани- тоидов	Расход энер- гии рудооб- разования на 1 т руды	Запасы в условных единицах
в вес. %	в кг/м <sup>3</sup>			
0,002	0,053	1	210	821000000
0,005	0,134	2,5	212	327000000
0,01	0,268	5,0	219	156900000
0,02	0,536	10,0	234	74100000
0,06	1,608	30,0	310	18900000
0,1	2,682	50,0	354	9490000
0,2	5,366	100,0	671	2568900
0,6	16,146	300,0	2023	310300
1,0	27,0	500,0	3346	103400
1,7	46,155	850,0	6135	34480
2,4	65,52	1215,0	8864	16030
4,0	109,52	2000,0	15460	5517
5,8	162,4	3015,0	24438	2414
8,4	240,408	4200,0	35170	1155
11,0	319,0	5921,0	51808	569
20,0	632,0	11807,0	111420	131
30,0	1440,0	19346,0	193362	45
50,0	2175,0	40346,0	429683	22
70,0	3997,0	74231,0	835277	3
86,6	6495,0	120538,0	1417246	1

Таблица 29

Оценка невыявленных запасов по классам содержаний для полиметаллического рудного региона

№ п/п	Классы содержаний, усл.ед.	Относительные запасы, %
1.	0,5-2	9
2	2-4	4
3	4-6	5
4	6-8	6
5	8-10	5
6	10-12	3
7	> 12	2
Всего	> 0,5	34

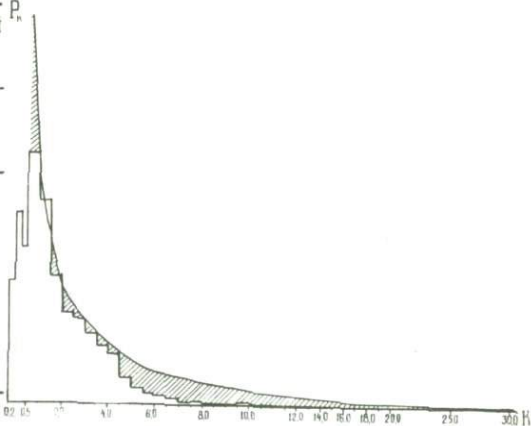


Рис. 16. Результаты оценки одного из рудных регионов с полиметаллической минерализацией. Рассчитано по методу разложения запасов. Условные обозначения как на рис. 13 (по данным Н.П.Иванова).

Значительный объем запасов руды, оцененных как невыявленные для высоких содержаний условного свинца в руде (более 6 и особенно более 10 условных единиц), объясняется тем, что при расчетах не учтена добыча за дореволюционный период эксплуатации месторождения, когда добывались в основном только богатые руды. Поэтому прогнозы по этим классам содержаний следует считать завышенными и общий объем невыявленных еще запасов вернее оценивать порядка 20% от уже добытых.

Подобным способом были рассчитаны распределения запасов по классам содержаний условного свинца по трем отдельным металлогеническим зонам этого рудного полиметаллического региона. Теоретическая кривая для каждой из этих зон рассчитывалась по основной уточненной формуле. Фактическое распределение запасов свинца по каждой зоне района приведено на рис. 17.

Количество невыявленных запасов в каждой из этих трех металлогенических зон приведено в табл. 30.

Оценка перспектив данного крупного рудного региона и его отдельных участков, выделенных по геологическим особенностям, позволяет говорить о необходимости дальнейшего изучения как региона в целом, так и его отдельных рудных площадей (металлогенических зон). Однако оценка перспектив старых горнорудных районов связана со значительными трудностями из-за необходимости прибегать к несколько формальному приему разложения запасов и из-за невозможности учесть материалы добычи и разведки за все время существования таких горнорудных

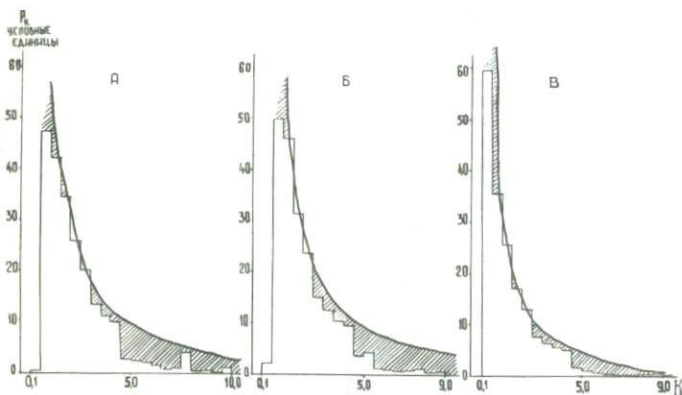


Рис. 17. Результаты оценки отдельных металлогенических зон одного из рудных регионов с полиметаллической минерализацией (по данным Н.П.Иванова).  
Условные обозначения как на рис. 13.

Таблица 30

Оценка невыявленных запасов по отдельным металлогеническим зонам полиметаллического рудного региона (запасы показаны в % от добытых)

Металлогенические зоны	Классы содержаний, усл.ед.	Невыявленные запасы
Первая	0,5-5	10
	> 5	22
	Всего >0,5	32
Вторая	0,5-5	15
	> 5	20
	Всего >0,5	35
Третья	0,5-5	20
	> 5	7
	Всего >0,5,	27

предприятий. Но однако и при этих недостатках оценка перспектив подобных районов методом разложения запасов представляет несомненный интерес.

8.4.2. В качестве второго примера рассматривается один из оловорудных районов, на территории которого велись и ведутся значительные поисково-разведочные работы, а также добыча оловянных руд.

Все рудные образования этого района находятся в сходных геологических условиях и близки между собой по типу оруденения. Разведы-

вались они с помощью канав, горных выработок (штолен) с рассечками и буровых скважин. Результаты анализов бороздовых и керновых проб на олово (а также и на его спутники) явились основным исходным материалом, используемым при оценке этого оловорудного района в целом и его отдельных месторождений.

При оценке сделана попытка охарактеризовать невыявленные запасы в рассматриваемом районе также в отношении их пространственного размещения.

Для этого использовались закономерности распределения как основного элемента так и элементов-спутников.

При распределении элементов-спутников исходили из следующих положений:

1. При однотипной минерализации, когда источник образования главного полезного компонента (олова) и его спутников один и тот же, запасы каждого элемента-спутника косвенно характеризуют и запасы олова.

2. Распределение запасов элементов-спутников по классам их содержаний и оценка невыявленных запасов каждого элемента-спутника проводятся по той же методике, что и для ведущего полезного ископаемого.

3. В пространственном распространении элементов-спутников (для отдельных рудных районов) часто устанавливаются вполне определенные закономерности (региональная зональность), помогающие пространственно выделять участки, обогащенные тем или другим элементом-спутником.

4. Каждому типу оловянного оруденения, как известно, отвечает характерный для него геохимический парагенезис элементов. Зная этот парагенезис того или иного участка рудной территории и запасы элемента-спутника выявленного в наименьшей степени, можно выделить (определить) перспективную для поисков на олово территорию.

5. Связь элементов-спутников с главным полезным компонентом и промышленная значимость каждого их парагенезиса дают возможность оценить относительную перспективность отдельных частей территории на главный компонент (олово), а в наиболее благоприятных случаях дают возможность предсказать, в какой именно части территории можно с наибольшей вероятностью ожидать запасы руд, которые при общей оценке района определены как невыявленные.

Исходя из этих положений методика оценки данной территории должна включать:

1. Оценку невыявленных запасов главного полезного компонента:

- составление фактического распределения запасов по классам содержаний (по сумме отдельных разведочных выработок);

- уточнение уравнения теоретического распределения (по описанной выше методике);

– определение невыявленных запасов по классам содержаний и общих запасов при разном бортовом содержании.

2. Оценку невыявленных запасов каждого элемента-спутника:

- составление фактического распределения по классам содержаний для каждого элемента-спутника;
- вычисление (уточнение) теоретического уравнения распределения запасов для каждого элемента-спутника;
- вычисление общего количества невыявленных запасов по каждому элементу-спутнику.

3. Определение закономерностей пространственного распределения элементов-спутников олова на рудных объектах данного района:

- вычисление средней геохимической характеристики каждого объекта;
- нанесение этих вычисленных характеристик на схематическую геологическую карту района;
- выделение участков территории с повышенным содержанием того или иного элемента-спутника.

4. Выделение на схеме участков территории, которые перспективны для выявления запасов олова.

Таким образом в описываемом примере по обычной методике были построены фактические распределения запасов руды по классам содержаний (цинка, мышьяка, меди и свинца) (рис. 18). Для геохимической характеристики объектов строились лучевые диаграммы на предварительно рассчитываемых средних содержаниях элементов-спутников по каждому объекту. Во избежание влияния мало распространенных элементов содержания спутников выражались в кларках концентрации (К). Полученные величины (кларки) наносились на схему пространственного расположения рудных объектов по определенным для каждого элемента-спутника лучам, причем для большей наглядности луч строился пропорционально запасам оловянной руды в каждом объекте (рис. 19). В результате было установлено, что в центральной части района рудные объекты обогащены мышьяком. (Промышленная значимость таких объектов относительно невелика). Следующая полоса выделяется повышенным обогащением медью (промышленная значимость этих месторождений высокая). На более значительном удалении от центра, особенно в северной части территории, в рудах преобладает свинец и цинк (такие руды имеют большое промышленное значение).

Распределение запасов олова и его спутников рассчитывалось по данным опробования горных выработок и буровых скважин. Теоретические уравнения определялись путем решения систем уравнений. Они имели вид:

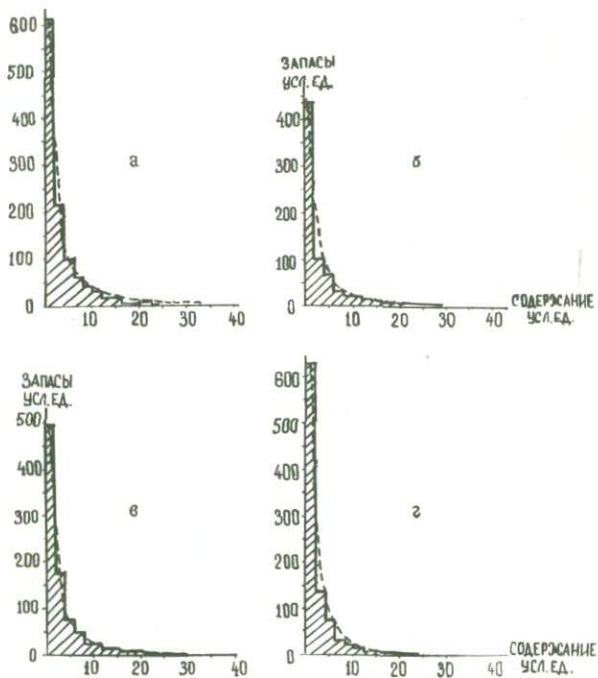


Рис. 18. Результаты оценки одного из оловорудных регионов по запасам олова (а), мышьяка (б), меди (в), свинца (г). Условные обозначения как на рис. 13.

$$\text{Для олова: } P_K = \frac{\frac{615}{K}}{e^{0,05(K-1)}}. \quad \text{Для мышьяка: } P_K = \frac{\frac{438}{K}}{e^{0,06(K-1)}}.$$

$$\text{Для меди: } P_K = \frac{\frac{495}{K}}{e^{0,06(K-1)}}. \quad \text{Для свинца: } P_K = \frac{\frac{438}{K}}{e^{0,1(K-1)}}.$$

Оценка запасов по классам содержаний олова приведена в табл. 31.

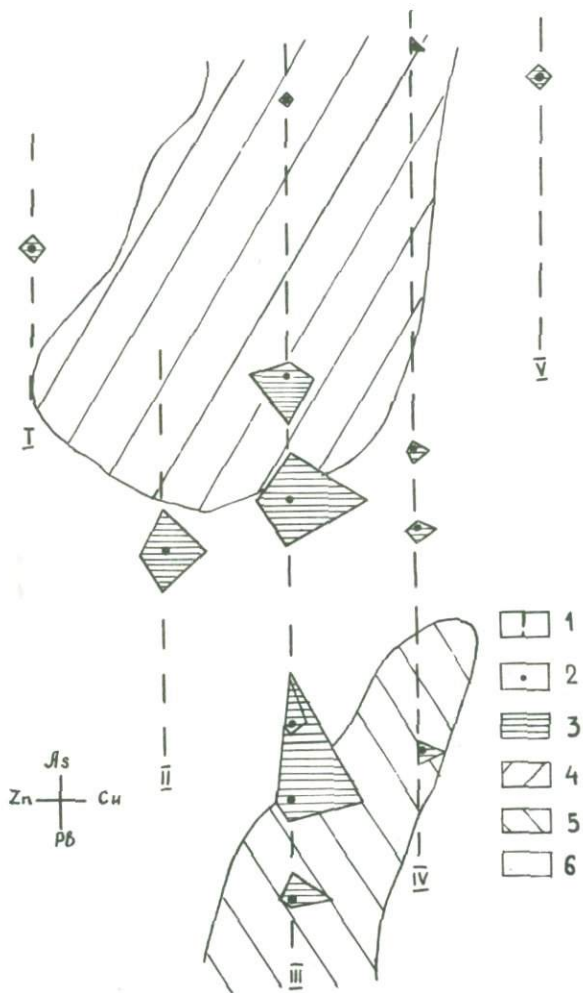


Рис. 19. Схема геохимической зональности одного из оловорудных районов, 1 - оловоносные структуры и их номера, 2 - месторождения и рудопроявления, 3 - геохимическая характеристика объекта, 4 - площади развития олово-полиметаллической минерализации, 5 - площади развития олово-медно-мышьяковой минерализации, 6 - площади развития олово-полиметаллической минерализации.

Оценка (в усл.ед.) невыявленных запасов олова  
по классам его содержаний

№ п/п	Классы содержаний	Невыявленные запасы, рассчитанные	
		по выработкам	путем разложения
1	0,2-0,4	0	0
2	0,4-0,8	3	4
3	0,8-1,2	6	5
4	1,2-1,6	3	4
5	1,6-2,0	4	5
	Суммарные	16	18

Как видно из табл. 31, на исследуемой территории можно ожидать выявления порядка 15-20% запасов оловянных руд от уже известных. По классам содержания олова эти невыявленные запасы распределяются равномерно.

Для контроля было построено распределение запасов по классам содержания олова методом разложения запасов, подсчитанных отдельно по каждому рудному объекту месторождения. Фактическое распределение запасов в этом последнем случае показано на рис. 20. Близость результатов расчетов перспективных (невыявленных) запасов олова по выработкам и по методу разложения показывает их сходность, что говорит о возможности оценки перспектив каждым из этих способов.

После расчета теоретических уравнений для распределения запасов по классам содержаний мышьяка, меди и свинца были рассчитаны суммарные невыявленные еще запасы руд для повышенных содержаний этих элементов. Они оказались равными 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 этих спутников. Правильно также, что суммарных запасов по спутникам больше, чем по олову, поскольку все спутники встречаются совместно, и можно говорить только о преобладании того или иного элемента. Исходя из сделанной оценки наиболее перспективными для выявления новых запасов представляется тот тип месторождений, где совместно с оловом преобладают галенит и сфалерит. Месторождения этого типа развиты в северной части рассматриваемой территории, где и возможны новые обнаружения таких руд.

Таким образом, наиболее перспективная часть территории, занимающая примерно 10–12% всей площади, располагается в северной ее части. Этот пример показывает надежность проведения термодинамической оценки районов с равномерной степенью изученности рудных объектов на их территории. Используя описываемую методику оценки в комплексе с геохимическими данными, можно подсчитывать не только количества не выявленных запасов руд, но и выделять перспективные для их обнаружения районы и участки на изучаемой территории.

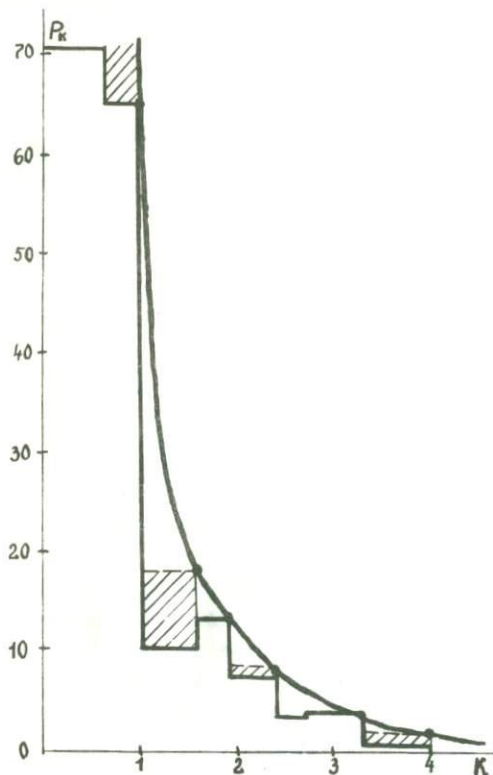


Рис. 20. Результаты оценки одного из оловорудных районов. Условные обозначения как на рис.13.

8.4.3. Третий пример относится к практическому использованию выведенных закономерностей для скарново-магнетитовых месторождений Соколово-Сарбайского района. По этому крупнейшему железорудному бассейну Союза по состоянию на 1972 год были подсчитаны разведанные запасы скарновых магнетитовых руд в количестве 4,017 млрд. тонн, при среднем содержании железа 43,52% (при диапазоне содержаний от максимальных, отвечающих чистым магнетитам и до 20%, принятом за бортовое).

Этих данных оказалось достаточно для некоторых практических выводов:

I. Соотношения запасов скарновых магнетитовых руд, выведенные теоретически для различных содержаний в них металла, имеют полную силу в отношении Соколово-Сарбайских руд.

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

3. Восполнение запасов руд богатых категорий с содержаниями выше средневзвешенного происходит за счет более бедных руд с содержаниями железа ниже средневзвешенного с таким расчетом, чтобы в смеси их получилась бы руда со средневзвешенным содержанием, равным 43,52% по железу.

4. Каждому диапазону руд богатых по содержанию отвечает свой диапазон руд бедных притом так, что в смеси этих диапазонов руд более богатым рудам отвечают более бедные по содержанию железа руды. Результаты расчетов с учетом сказанного выше приведены в табл. 32.

Таблица 32

Результаты расчетов запасов скарновых магнетитовых руд  
в Соколово-Сарбайском железорудном бассейне

Интервалы содержания магнетитового железа в руде, вес. %	Среднее содержание в интервале вес. %	Теоретические дифференциальные запасы, вошедшие в смесь, в % к суммарным запасам			Пересчет в абсолютные запасы, в млн. т		Остаток запасов в недрах, в млн. т	
		металла	руды	отн. %	металла	руды	металла	руды
I	2	3	4	5	6	7	8	9
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
26,40-28,00	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
58,80-56,90	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

I	2	3	4	5	6	7	8	9
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	57,5	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 В смеси	43,52	11,359	26,061	-	4,017	9,239	3364,0	12851,0
							ср.взв.= 26,2%	

Пояснения к таблице 32:

а. Цифры, приведенные в столбцах "теоретические дифференциальные запасы, вошедшие в смесь", даны в процентах от полной суммы запасов металла и руды для всего диапазона содержаний магнетитового железа от 20,40% и до 71,47%, вычисленных с использованием цифр, полученных по формуле

$$P_K = \frac{498}{\frac{K-I}{0,35(K-2)0,33}}$$

б. Нарушения плавного нарастания цифр компенсирующих запасов, имеющие место для градаций 24,70-26,40% по сравнению с градацией 23,00-24,70% и 35,60-38,0% по сравнению с 34,00-35,60%, вызваны объединением запасов в градациях компенсируемых богатых руд.

в. Перевод относительных запасов, выраженных в процентах, в абсолютные (в тоннах) произведен на основании соображения, что сумма полученных относительных запасов, равная 11,359%, соответствует данным 4,017 млрд. тонн металла, откуда 1% соответствует 354 млн. тонн металлического железа.

г. Смесь из каждой пары руд "богатой" и "бедной" градаций подобрана в пропорции, обеспечивающей получение заданного средневзвешенного содержания металла в смеси (43,52%).

д. Запасы металла пересчитывались в запасы руды в соответствии с данными об объемных весах руд с различными содержаниями металла.

Что же касается выводов, следующих из табл. 32, то они сводятся к утверждению, что помимо учтенных 4,017 млрд. тонн железа в рудах со среднезвешенным содержанием, равным 43,52%, в недрах имеется еще не учтенных минимум 3-4 млрд. тонн железа в рудах со среднезвешенным содержанием металла, равным 26,2%.

## 9. Заключение

9.1. 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 концентрациями их же в родоначальной магме;

г) за процесс, определяющий общие условия рудообразования, - постмагматический гидротермальный процесс.

9.2. Количества энергии рудообразования, расходуемые природой на создание всех руд данной кондиции, определялись согласно закону Больцмана, справедливому для любого по масштабам, но замкнутого в себе, энергетического очага.

Дифференциальные 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 Больцману), на расход энергии рудообразования на создание единицы объема руды (после пересчета на единицу массы руды, металла) данной кондиции (по термодинамике идеальных процессов).

9.3. Металлами, для которых были рассчитаны по вышеизложенной схеме дифференциальные запасы для всех возможных кондиций руд, явились:

а. Олово в рудно-кварцевых месторождениях как типичный представитель 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 дифференциальных запасов металла в рудах различных кондиций, и по этим материалам рассчитаны удельные веса и средневзвешенные содержания по практически важным интервальным рудным грациям в общем балансе запасов металла.

9.4. Полученные теоретические выводы используются в качестве:

а. Результатов расчетов энергии образования единицы объема руды (оросола), которые применяются для изображения в едином энергетическом показателе многокомпонентных геологических и геохимических образований.

б. Результатов расчетов по дифференциальным запасам руд, которые используются для предварительной оценки перспектив рудоносности территорий при минимуме накопленных практических данных по этим территориям.

9.5. Эти теоретические выводы были проверены на практическом материале:

а. Целый ряд многокомпонентных ореолов первичного рассеяния месторождений был выражен после соответствующих простых пересчетов в значениях суммарной энергии ореолообразования, и тем самым была показана экономичность и высокая наглядность подобного рода отображения полезных геохимических материалов.

б. Было произведено сопоставление теоретических расчетных и глобальных практических, статистических цифр по добыче (запасам) меди из ее месторождений и показано, что расхождения между этими цифрами заключены в пределах - 14,5 и +12% по отдельным интервалам содержания и близки к 0 по сумме всех интервалов.

в. Было выполнено, по накопленным практическим данным, несколько провизорных оценок еще не вскрытых запасов руд разных металлов в недрах и были получены весьма результативные цифры, позволяющие предполагать их реальность.

Приведенные данные свидетельствуют о перспективности использования рассмотренных методических приемов при проведении поисково-оценочных и металлогенических исследований, перспективного планирования работ и т.д. Поэтому необходимо продолжать работы, расширяя круг рассмотренных металлов и вовлекая в изучение новые рудные районы.

## С о д е р ж а н и е

1. В в е д е н и е . . . . .	3
2. Общие положения . . . . .	5
3. Термодинамические обоснования расчетов энергии рудообразования . . . . .	10
4. Расчет дифференциальных запасов олова в кварцевых жилах . . . . .	26
5. Расчет дифференциальных запасов меди в месторождениях порфириновых прожилково-вкрапленных руд . . . . .	32
6. Расчет дифференциальных запасов железа в скарных месторождениях магнетитовых руд . . . . .	36
7. Использование расчетов энергии рудообразования для характеристики руд сложного состава и комплексных ореолов . . . . .	44
8. Использование распределения региональных запасов для оценки перспектив территорий . . . . .	61
9. З а к л ю ч е н и е . . . . .	87

Вып. № 203

### РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТАХ (методические рекомендации)

Ведущий редактор Н.И.Марочкин  
Художник Ю.Г.Галинский  
Корректор Л.А.Новожилова

М-19709  
80х 90 1/16  
6 печ. л.

Подписано к печати 19.05.1976 г.

Тираж 500 экз.  
Заказ № 1404

Цена 60 коп.

ОНТИ ВИТР, 199106, Ленинград, Весельная ул., 6.  
Ротапринт ВИТР, 199111, Ленинград, Кожевенная линия, 23а.

Цена 60 коп.

17777