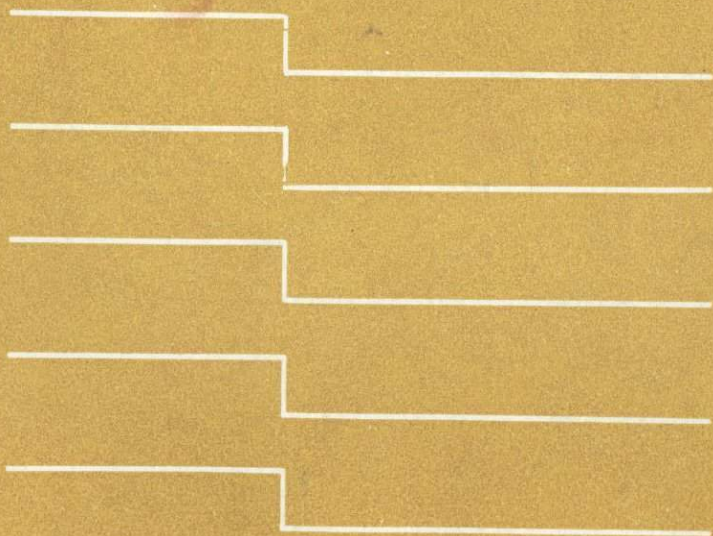


В.В. АРИСТОВ

**МЕТОДИКА
ГЕОХИМИЧЕСКИХ
ПОИСКОВ
ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ**



В. В. АРИСТОВ

МЕТОДИКА
ГЕОХИМИЧЕСКИХ
ПОИСКОВ
ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ

4247



МОСКВА «НЕДРА» 1984



Аристов В. В. Методика геохимических поисков твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1984. 200 с.

Рассмотрены объекты геохимических поисков, их системный анализ и моделирование. Дана классификация геохимических методов по условиям применения. Описаны дистанционные, контактные и контактно-дистанционные методы. Изложена методика геохимических поисков, выполняемых в различных геологических и ландшафтных условиях на разных стадиях поисковых и разведочных работ. Освещены вопросы интерпретации геохимических данных и оценки геохимических полей и аномалий для прогноза и поисков эндогенных и экзогенных месторождений твердых полезных ископаемых.

Для геологов, занимающихся поисками и разведкой месторождений твердых полезных ископаемых.

Табл. 17, ил. 78; список лит. — 50 назв.

Рецензент — канд. геол.-минер. наук *Н. Н. Трофимов* (Университет Дружбы народов им. Патриса Лумумбы)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Задачи, поставленные XXVI съездом КПСС по расширению минерально-сырьевой базы, требуют разработки прогрессивных методов поисков полезных ископаемых. К их числу относятся геохимические методы, которые предусматривают: выявление новых промышленных месторождений полезных ископаемых на основе интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий; изучение геохимических особенностей флангов и глубоких частей эксплуатируемых месторождений для обнаружения скрытых тел полезных ископаемых; создание геохимических карт больших территорий, где осуществляется региональное геологическое картирование, для разработки прогнозных рекомендаций на будущее; определение по геохимическим данным потенциальной продуктивности в отношении полезных ископаемых геологических образований различного типа и масштаба.

Основы геохимических поисков полезных ископаемых были заложены в трудах Д. И. Менделеева, А. П. Карпинского, Н. С. Курнакова, В. И. Вернадского. В развитии геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых большие заслуги принадлежат многим ученым: А. Е. Ферсману, А. П. Виноградову, В. А. Соколову, Н. И. Сафронову, А. П. Соловову, А. А. Саукову, Е. М. Сергееву, С. Д. Миллеру, Е. М. Квятковскому, В. И. Красникову, И. И. Гинзбургу, А. И. Перельману, В. В. Поликарпочкину, С. В. Григоряну, Л. Н. Овчинникову, Л. В. Таусону и др.

В последние два десятилетия геохимические методы также получили большое распространение за рубежом, особенно в Канаде, США, Великобритании.

В данной работе обобщены материалы по основным вопросам методики геохимических поисков твердых полезных ископаемых. В работе использованы результаты геохимических исследований, которые были выполнены Б. П. Алексеевым, Б. Г. Безиргановым, С. У. Вартаняном, В. К. Волковым, В. В. Домчаком, Ю. К. Кудрявцевым и др.

Отдельные разделы работы были просмотрены А. С. Вершининым, Д. И. Горжевским, А. П. Солововым. Их замечания, предложения и советы учтены при подготовке рукописи к печати. Большую помощь в подготовке графики оказала Г. Г. Русецкая. Всем им автор выражает свою признательность. Особую благодарность автор приносит рецензенту Н. Н. Трофимову, чьи критические замечания способствовали улучшению книги.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОБЪЕКТОВ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

Система представляет собой объективное единство частей (предметов, явлений), закономерно внутренне связанных друг с другом. Система опирается на классификацию, т. е. на разделение множеств изучаемых частей (предметов) на отдельные группы по тем или иным признакам.

Для системного анализа объектов геохимических поисков имеют значение следующие классификации или группировки, определяющие характер геохимических прогнозов и методику геохимических поисков: разделение объектов поисков на конечные и промежуточные; стадийность геологоразведочных работ; масштабность объектов поисков; периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева. Каждая из этих классификаций или группировок отражает систему с внутренними связями, которую можно использовать для прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых.

Конечными объектами поисков вообще и геохимических в частности являются промышленные месторождения и тела полезных ископаемых. Достижение этой цели в современных условиях нередко требует предварительного выявления, изучения и оценки промежуточных объектов — аномальных полей, связанных с перспективными районами, зонами, структурами, массивами и другими геологическими образованиями, в пределах которых могут быть выявлены месторождения полезных ископаемых. Промежуточными объектами при геохимических поисках являются аномальные геохимические поля различного масштаба и формационного типа.

На первых этапах развития геохимических методов ориентировались непосредственно на конечные объекты поисков, так как среди них было немало объектов, выходящих на поверхность, но визуально трудно различимых. К ним, например, относились штокверковые месторождения молибдена, вольфрама, олова, которые характеризовались отчетливыми геохимическими аномалиями в рыхлых элювиально-делювиальных отложениях на дневной поверхности. В последующие периоды, когда стали искать скрытые месторождения, появилась необходимость изучения связанных с ними аномальных геохимических полей, которые представляют собой лишь признаки или предпосылки поискового прогнозирования, т. е. являются по существу промежуточными объектами поисков.

Кроме того, появилась возможность и необходимость геохими-

ческого изучения больших территорий для получения картины региональных геохимических полей с выделением аномальных составляющих, которые могут являться предпосылками поискового прогнозирования определенных видов полезных ископаемых или их комплексов. Подобные региональные геохимические поля также представляют собой промежуточные объекты — объекты поисков полезных ископаемых.

Следовательно, в современных условиях путь к конечным объектам поисков лежит через выявление, изучение и оценку промежуточных объектов — аномальных геохимических полей, выделяющихся на фоне нормальных геохимических полей. Те и другие поля по условиям проявления в геологических образованиях подразделяются на: литохимические, гидрохимические, биогеохимические, атмосферические, радиогеохимические, ядерногеохимические.

Нормальные геохимические поля — это области геосфер с близкими к кларковым содержаниями химических элементов за пределами месторождений и проявлений полезных ископаемых. Аномальные геохимические поля выделяются в нормальных полях повышенными или пониженными против фоновых (кларковых) значений содержаниями химических элементов и включают собственно геохимические аномалии (рис. 1, а). В общем виде геохимическая аномалия представляет собой часть геохимического поля, в пределах которой отмечаются положительные или отрицательные отклонения содержания химических элементов от геохимического фона. Геохимическая аномалия, связанная с конкретным месторождением или проявлением полезного ископаемого, обычно называется геохимическим ореолом.

Эндогенные месторождения и проявления сопровождаются эндогенными первичными ореолами и аномалиями, являющимися составными частями аномальных геохимических полей в коренных породах. При выветривании и разрушении эндогенных месторождений образуются экзогенные* вторичные аномальные геохимические поля, включающие экзогенные вторичные ореолы (аномалии) в рыхлых аллювиальных, делювиальных, ледниковых и прибрежно-морских отложениях, а также в водах и растительном покрове, и экзогенные вторичные геохимические потоки в аллювиальных отложениях и водах. Месторождения экзогенных полезных ископаемых (солей, фосфоритов и др.) сопровождаются экзогенными первичными аномальными полями, при выветривании и разрушении которых возникают экзогенные вторичные аномальные геохимические поля.

По условиям залегания выделяются аномальные геохимические поля открытые — выходящие на поверхность и скрытые — слепые, погребенные и погребенно-слепые (рис. 1, б). По масшта-

* Здесь и далее принята единая терминология: экзогенные (экзо — внешние) и эндогенные (эндо — внутренние) вместо гипергенные (над, выше) и гипогенные (гипо — под, ниже).

бу распространения аномальные геохимические поля подразделяются на три группы: планетарные, региональные и локальные. Все аномальные геохимические поля, возникновение которых обусловлено процессами формирования полезных ископаемых,

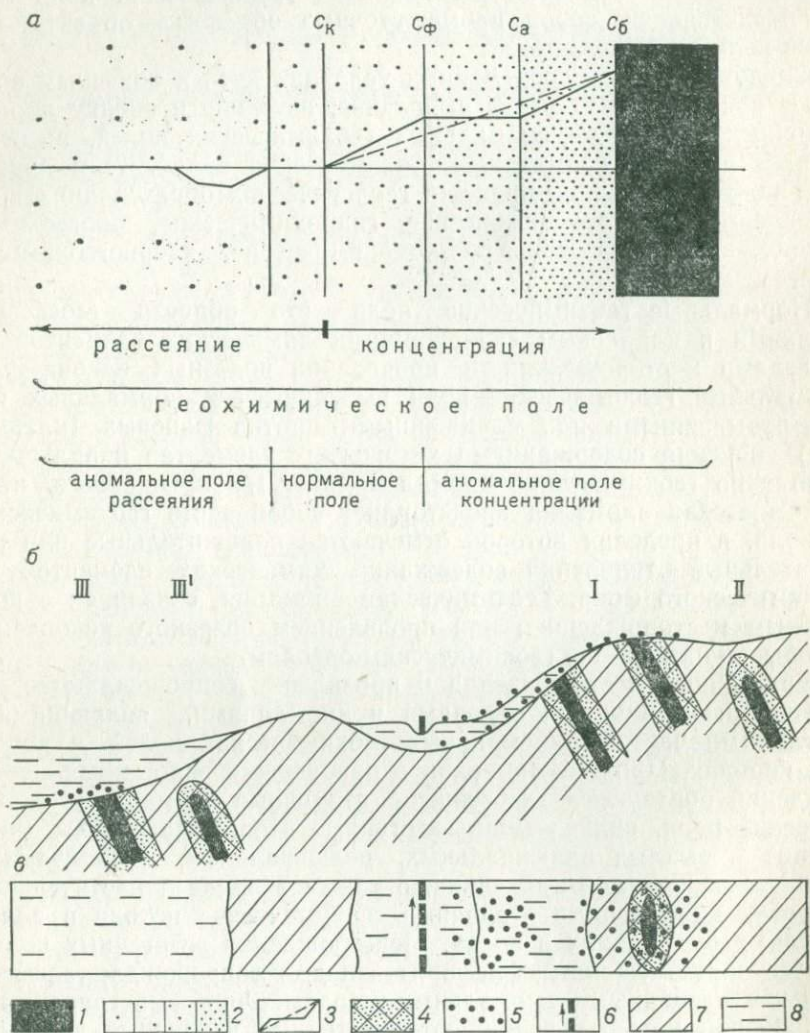


Рис. 1. Схема геохимического поля (а) и типы аномальных геохимических полей по условиям залегания (б — разрез, в — план).

1 — месторождение; 2 — градации содержаний химических элементов (C_k — кларковые, C_f — фоновые, C_a — аномальные, C_b — бортовые); 3 — графики изменения содержаний химических элементов (пунктир — по экспоненте, сплошная линия — фронтально); 4 — эндогенные (первичные) ореолы; 5 — экзогенные (вторичные) ореолы; 6 — потоки; 7 — коренные породы; 8 — рыхлые отложения. Аномальные геохимические поля: I — открытые (выходящие на поверхность); скрытые: II — слепые, III — погребенные, III' — погребенно-слепые

могут быть названы продуктивными (рудными). Кроме того, выделяются аномальные геохимические поля: петрогенные или породные, связанные с отклонениями в распределении содержаний химических элементов в геологических образованиях вне влияния конкретных месторождений или проявлений полезных ископаемых; аккумулятивные или ландшафтные, сформировавшиеся в благоприятных ландшафтах и непосредственно не связанные с полезными ископаемыми; техногенные, возникшие в связи с технической деятельностью человека. Петрогенные, аккумулятивные и техногенные аномальные геохимические поля также относятся к промежуточным объектам поисков. В одних случаях эти аномальные поля осложняют интерпретацию продуктивных полей, в других — способствуют выделению потенциально продуктивных геологических образований (интрузивов, горизонтов осадочных или вулканогенных пород, разрывных нарушений), которые являются предпосылками поискового прогнозирования месторождений определенных видов полезных ископаемых.

В целом необходим системный анализ объектов — от промежуточных до конечных — и системный подход ко всему процессу геохимических поисков.

Стадийность геологоразведочных работ — это основная организационная система осуществления геологосъемочных, поисковых и разведочных работ для выявления конечного объекта — промышленного месторождения полезного ископаемого. Составные части стадийности взаимосвязаны. Проведение каждой последней из них выполняется с учетом предыдущих частей. На отдельных стадиях и подстадиях процесса поисковые методы выполняются по определенным принципам. Среди этих методов геохимические методы играют большую роль для выявления многих видов полезных ископаемых. При региональных геологосъемочных и геофизических работах (1- и 2-я подстадии I стадии) эти методы позволяют выявить и оконтурить региональные аномальные геохимические поля, контролирующее размещение провинций полезных ископаемых. В отдельных случаях при региональных съемках и поисках геохимические методы обеспечивают выявление крупных месторождений, выходящих на поверхность. Поиски скрытых объектов на I стадии осуществляются на 4-й подстадии — глубинного геологического картирования. При проведении общих поисков (1-я подстадия II стадии) в пределах провинции выделяются перспективные зоны, характеризующиеся локальными аномальными геохимическими полями. На следующей подстадии детальных поисков в пределах локальных аномальных полей оконтуриваются перспективные геохимические аномалии, являющиеся прямыми поисковыми признаками полезных ископаемых. Более подробное изучение этих аномалий и новых аномалий выполняется на подстадии поисково-оценочных работ. На стадиях предварительной и детальной разведки изучаются геохимические аномалии на флангах и в глубоких частях месторождений. Внутренние связи между отдельными стадиями и подстадиями геоло-

горазведочных работ обеспечивают возможность непрерывно-прерывистого системного анализа геохимических полей для решения конкретных практических задач.

Системный анализ объектов геохимических поисков позволяет рассмотреть и учесть масштаб искомого объекта. В настоящее время намечаются два направления в решении этого вопроса. Совершенно первому направлению каждой стадии и подстадии поисковых работ должны соответствовать ожидаемые объекты определенных масштабов — от рудных районов, рудных узлов, зон, рудных полей до месторождений и тел полезных ископаемых. Для I стадии, когда осуществляется геологическая съемка масштаба 1 : 200 000, объектами поисков считаются рудные районы, при съемке масштаба 1 : 50 000 — рудные узлы. Для II стадии — рудные поля, месторождения, тела полезных ископаемых. В зависимости от формы и размеров этих объектов рекомендуется выбирать и параметры сети геохимического опробования. При этом считается, что можно существенно разредить сеть пробоотбора без ущерба для достоверности поисков.

Второе направление, развиваемое и в данной работе, ориентирует геохимические поиски на выявление конечного объекта — месторождения полезного ископаемого, имеющего промышленное значение для конкретных геолого-экономических условий. Этим определяются и параметры сети геохимического опробования, регламентированные в соответствующей инструкции [25], которые позволяют, с одной стороны, не пропустить при поисках любого масштаба главный объект, а с другой — не заниматься неоднократным повторением геохимического опробования на одних и тех же площадях. Выявляемые при поисках аномальные геохимические поля, которые служат лишь промежуточными объектами поисков, могут именоваться аномальными геохимическими: районами, узлами, зонами, центрами и т. д. в зависимости от их морфологии и размеров, но заменять эти понятия при геохимических поисках более определенными терминами — рудный район, рудный узел, рудное поле не имеет смысла до получения данной всесторонней оценки. Следует также учитывать, что в новых методических указаниях по прогнозным ресурсам [23] объекты прогноза, выявляемые при поисковых работах комплексом методов, рекомендуется называть достаточно осторожно — точечными и площадными. К точечным относятся объекты, поисковые признаки которых сконцентрированы на площади, близкого к размерам месторождения ожидаемого формационного типа. Площадными считаются объекты, где поисковые признаки, указывающие на возможность обнаружения месторождения, рассеяны по территории, размер которой многократно превышает среднюю площадь месторождения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

Моделирование объектов геохимических поисков заключается в построении и изучении моделей геохимических полей для разработки теоретических основ их интерпретации и оценки. Такое моделирование предусматривает системный анализ от моделей строения атомов химических элементов до моделей геохимических полей, аномалий и ореолов различного типа и масштаба. В настоящее время применительно к теоретическому обоснованию геохимических поисков можно различать следующие виды моделирования: геохимическое и минералого-геохимическое, геолого-геохимическое, математическое.

В основе теории геохимического и минералого-геохимического моделирования лежат положения общей геохимии [11], среди которых большое значение имеют: геохимические классификации химических элементов, закон о всеобщем рассеянии и миграции химических элементов в геосферах, ассоциации химических элементов (факторы миграции химических элементов (внешние и внутренние)).

Общей теоретической основой системного анализа и интерпретации геохимических полей и аномалий различного типа являются *геохимические классификации химических элементов*, разработанные на базе периодической системы элементов Менделеева многими геохимиками — В. И. Вернадским, В. М. Гольдшмидтом, А. Е. Ферсманом, А. Н. Заварицким. Среди этих классификаций наиболее распространена классификация В. М. Гольдшмидта, в основу которой положены строение электронных оболочек ионов и величина атомных объемов. В ней выделены четыре группы химических элементов, названия которых прочно вошли в практику всех геохимических исследований: *атмофилы*, в которых преобладают атомы с 8 электронными оболочками; *литофилы*, в которых ионы большинства элементов имеют 8 электронных оболочек; *халькофилы* с ионами, имеющими 18 электронных оболочек; *сидерофилы*, в которых ионы имеют достраивающиеся электронные оболочки. Классификация В. М. Гольдшмидта, учитывающая строение электронных оболочек ионов, вполне оправдана для геохимических построений и интерпретаций. Однако для того чтобы атом превратился в ион (катион или анион), весьма важна общая структура электронного облака, картина которого стала выясняться уже после создания указанной классификации и нашла свое выражение в современном варианте периодической системы Менделеева. Она представляет собой систему фундаментальных знаний свойств и поведения химических элементов, имеющую большое значение для интерпретации и оценки геохимических полей и прогноза полезных ископаемых. Этот вариант периодической системы особенно интересен в связи с тем, что, во-первых, в основу его принят короткий вариант классификации, предложенный Д. И. Менделеевым и отличающийся оптимальными возможностями сопо-

ставления химических элементов по различным параметрам; во-вторых, в этот вариант внесено новое содержание, основанное на теоретических положениях квантовой механики, объясняющих строение атомов химических элементов. Это новое отражено в выделении семейств химических элементов (s, p, d, f), свойства и положение которых в периодической системе имеют прямое отношение к прогнозу месторождений полезных ископаемых. Поэтому остановимся на характеристике этих семейств химических элементов [6].

В современной периодической системе Менделеева химические элементы по строению электронных оболочек подразделяются на четыре семейства; s — элементы, у которых последней заполняется электронами внешняя энергетическая орбиталь s ; p — элементы, у которых последней заполняется внешняя энергетическая орбиталь p ; d — элементы, у которых последней заполняется внутренняя энергетическая орбиталь d ; f — элементы, у которых последней заполняется внутренняя энергетическая орбиталь f .

Расположение в таблице Менделеева химических элементов, относящихся к различным семействам, прежде всего отражает периодичность изменения химических свойств как по группам (по вертикали), так и по периодам (по горизонтали). Такая же периодичность отражается и в изменении свойств геохимических ассоциаций химических элементов.

По относительной подвижности в геохимических процессах химические элементы могут быть охарактеризованы следующим образом: элементы семейства s , сильно подвижные в различных условиях (растворах и расплавах); элементы семейства p , подвижные преимущественно в растворах; элементы семейств d и f , слабоподвижные в растворах и более подвижные в расплавах. В последнем случае исключение составляют элементы побочных подгрупп, у которых особенно заметна «конкуренция» внешней энергетической орбитали s и внутренней d при заполнении их электронами. Свообразными особенностями в отношении подвижности в экзогенных условиях характеризуются некоторые элементы d и f — марганец, железо, кобальт, никель, ванадий, молибден, рений, уран и редкие земли (европий, самарий), у которых имеется несколько состояний окисления, сравнимых по устойчивости.

В природных процессах наиболее подвижны элементы тех семейств (s, p), для которых характерно наличие валентных электронов на внешних энергетических орбиталях. Потенциалы этих электронов невелики, так что их атомы вступают в различные соединения легче, чем атомы элементов двух других семейств. Все это определяет возможность повышенной миграции элементов s и p как в эндогенных, так и в экзогенных условиях. Химические элементы семейств d и f в большинстве случаев обладают меньшей подвижностью в связи с тем, что их валентные электроны расположены на внутренних энергетических орбиталях. Потенциалы ионизации этих электронов выше, и необходимо увеличение температуры и давления для начала и протекания реакций. Следова-

тельно, миграция элементов *d* и *f* должна происходить преимущественно в эндогенных условиях — в магматических расплавах или высокотемпературных растворах. Условия же миграции химических элементов определяют особенности их концентрации и формирование промышленных месторождений полезных ископаемых.

Таким образом, для составления поисковой геохимической клас-

	I						VII	VIII	
1	(H)						He		
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co Ni
	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh Pd
	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La ^{x)}	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir Pt
	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac ^{xx)}	Ku					

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tu	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

He	Xe	Cs	Al	Ti	Ce	As	Cu	Fe
----	----	----	----	----	----	----	----	----

Рис. 2. Геохимическая классификация химических элементов, составленная на основе современной периодической системы Д. И. Менделеева и геохимической классификации В. М. Гольдшмидта.

Атмофилы: 1 — *s*, 2 — *p*; литофилы: 3 — *s*, 4 — *p*, 5 — *d*, 6 — *f*; халькофилы: 7 — *p*, 8 — *d*, 9 — *d*-сидерофилы (индексы элементов выделены шрифтом: *s* — пунктир, *p* — тонкая линия, *d* — жирная линия, *f* — подчеркнуто)

сификации химических элементов в основу следует принять современный вариант периодической системы Менделеева, сохранив при этом наименования больших групп элементов по В. М. Гольдшмидту. Предлагается выделить следующие подгруппы химических элементов (рис. 2): *s*, *p*-атмофилы; *s*-, *p*-, *d*- и *f*-литофилы; *p*- и *d*-халькофилы; *d*-сидерофилы.

Поисковая геохимическая классификация химических элементов является общей теоретической моделью геохимических полей различных геосфер земного шара. Она может быть использована для прогноза и поисков полезных ископаемых при интерпретации и оценке конечных и промежуточных объектов геохимических поисков. Так, при проверке или прогнозе элементов-индикаторов (спутников) в аномальном геохимическом поле или месторождении

необходимо ориентироваться на ряды периодической системы. Если главным элементом в аномальном поле является медь, то элементами-спутниками могут быть d - и p -халькофилы — цинк, галлий, германий, мышьяк, селен, серебро, кадмий, индий, олово, сурьма, теллур, золото, ртуть, таллий, свинец, висмут. Это теоретическая модель ряда элементов-спутников. Уточнить ее следует на основе сведений о положении исследуемого объекта в определенной геохимической (металлогенической) провинции или зоне. Если главные элементы в аномальном геохимическом поле — ниобий и тантал, то элементами-спутниками могут быть d -литофилы: иттрий, цирконий, молибден, лантан, гафний, вольфрам; элементами-примесями, имеющими резко подчиненное значение, — халькофилы.

Для интерпретации и оценки аномальных геохимических полей может использоваться методика расчленения их по ассоциациям химических элементов, в которых преобладают сидерофилы, халькофилы или другие семейства элементов.

Например, по данным В. В. Гулевич [31], на территории Западной Чукотки выделяются две аномальные площади. Одна из них, приуроченная к полям развития ультраосновных и основных пород, характеризуется ассоциацией сидерофильных элементов (никель, кобальт). Для второй аномальной площади, где вулканогенно-осадочные толщи верхней юры прорваны интрузиями габбро-монцит-сиенитовой и гранитоидной формаций, ведущими являются халькофильные элементы: медь, серебро, свинец, цинк и др.

Рассматривая аномальные геохимические поля и собственно геохимические аномалии, следует обратить внимание на то, что не все химические элементы периодической системы создают одинаково отчетливые аномалии. По этому признаку можно выделить две группы химических элементов: элементы, создающие неотчетливые геохимические аномалии, и элементы, создающие отчетливые геохимические аномалии (табл. 1). В приведенной группировке химических элементов по характеру создаваемых геохимических аномалий указаны кларки элементов в литосфере, а также семейства химических элементов в соответствии с современным вариантом периодической системы (s , p , d , f). К группе элементов, создающих неотчетливые геохимические аномалии, относится большинство высококларковых элементов. В эту же группу попадают многие низкокларковые элементы, выявление которых существующими способами анализа пока еще затруднительно в общей массе геохимической пробы (например, празеодим, самарий и др.), или фазовое состояние элементов требует особого подхода при отборе проб (например, азот, хлор и др.). В группу элементов, создающих отчетливые геохимические аномалии, включаются лишь некоторые высококларковые элементы (калий, натрий, магний) и большинство низкокларковых, среднее содержание которых в литосфере измеряется сотыми, тысячными и десятитысячными долями процента.

Основные положения закона о всеобщем рассеянии и миграции химических элементов в геосферах были заложены в работах Ф. Кларка и В. И. Вернадского. В. И. Вернадский в книге «Пара-

Группировка химических элементов по характеру создаваемых геохимических аномалий

Кларк литосферы, %	Элементы, создающие геохимические аномалии по семействам							
	неотчетливые				отчетливые			
	<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>
10 ²								
10 ¹		O, Si						
<i>n</i>	Ca	Al	Fe		K, Mg, Na			
10 ⁻¹							Ti, Mn	
10 ⁻²		Cl			Ba, Sr, Rb	P, S, F	Zr	
10 ⁻³		N	Y, La, Sc	Nd	Li	Pb, Ga, B	Cr, V, Cu, Ni, Zn, Co, Nb	Ce, Th
10 ⁻⁴		Tl	Hf	Gd, Pr, Sm, Dy, Er, Tb, Ho, Eu	Cs, Be	Sn, Ge, As, Br	Mo, Ta, W	V
10 ⁻⁵		In	Cd	Yb, Lu, Tu		Sb, J		
10 ⁻⁶		Se	Pd				Ag, Hg	
10 ⁻⁷		Te				Bi	Au	
10 ⁻⁸			Re					

генезис химических элементов в земной коре» писал: «В песчинке или капле — как в микрокосмосе — отражается общий состав космоса. В ней могут быть найдены все те элементы, какие наблюдаются на земном шаре, в небесных пространствах...». Современная формулировка этого закона дается рядом исследователей. А. П. Соловов [43] определяет его следующим образом: «В любой точке геохимического поля содержания всех элементов, большие нуля, зависят от пространственных координат и непостоянны во времени, или $C_x = f(x, y, z) > 0$... В абсолютном большинстве точек геохимического поля содержания рудных элементов близки к цифрам их кларков (C_k) и только в редких случаях приобретают значения, существенно отклоняющиеся от этого уровня...». Н. И. Сафронов [42] отмечает, что таблицы кларков по геосферам доказывают повсеместное распространение всех элементов периодической системы в природе — «геохимической особенности в ранге основного закона», которому уместно присвоить имя его основоположников, т. е. закона Кларка — Вернадского.

Этот закон, указывая на всеобщее рассеяние химических элементов, не затрагивает вопроса о дисперсии или неоднородности рассеяния. Вместе с тем имеющиеся данные о характере планетарных, региональных и локальных геохимических полей эндогенного и экзогенного типов позволяют обоснованно предполагать первичную неоднородность рассеяния химических элементов в геосферах вообще и в глубинных зонах литосферы в частности [Б. И. Бурдэ; Ю. В. Ильинский; 14]. Именно первичная неоднородность рассеяния могла обусловить возникновение концентраций отдельных химических элементов или их ассоциаций в процессе миграции.

Миграция химических элементов в различных геосферах приводит к формированию геохимических полей и аномалий, а также проявлений и месторождений полезных ископаемых. Периодическая система Менделеева отражает закономерности рассеяния и концентрации химических элементов: с высокими кларками элементы сосредоточены в верхней части таблицы, с низкими — в нижней.

Геохимические поля литосферы связаны с горными породами, отдельные типы которых являются концентраторами определенных химических элементов. Для интерпретации и оценки геохимических аномалий необходимо знать особенности модели геохимического поля горных пород. Выявление горных пород — концентраторов химических элементов может быть сделано путем вычислений кларков (коэффициентов) концентрации:

$$КК = C_{кп}/C_{кл},$$

где $C_{кп}$ — кларк породы; $C_{кл}$ — кларк литосферы.

Эти кларки принимаются по широко известной таблице А. П. Виноградова или новой таблице А. А. Беуса [9]. Между данными этих исследователей существует различие. Так, в таблице А. П. Виноградова кларк литосферы представляет собой среднее из содержаний в двух частях кислых и одной части основных магматических пород. В таблице А. А. Беуса даны средние содержания раз-

дельно для «осадочной оболочки», «гранитной обслочки», «базальтовой оболочки», а также в целом для литосферы континентальной (без осадочного чехла) и литосферы всей коры (без осадочной оболочки).

Рассмотрим примеры некоторых химических элементов и горных пород — их концентраторов, показывающие важность знания кларков концентрации для интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий, связанных с месторождениями полезных ископаемых.

Магний. Кларк литосферы континентальной (без осадочной оболочки) равен 2,4 %, кларки в гранитах 0,33 %, в гипербазитах 20,5 %. Кларки концентрации: в гранитах $0,33:2,4=0,1$ (рассеяние); в гипербазитах $20,5:2,4=8,1$ (концентрация). Следовательно, промышленные скопления магния должны быть связаны с ультраосновными породами. В них действительно известны эндогенные жилы магнезита, возникшие на заключительных стадиях магматического процесса, и экзогенные залежи магнезита, образовавшиеся в процессе формирования коры выветривания.

Никель. Кларки литосферы $9,5 \cdot 10^{-3}$ %, гранитов $0,45 \cdot 10^{-3}$ %, гипербазитов $200 \cdot 10^{-3}$ %. Кларки концентрации: гранитов 0,05 (рассеяние), гипербазитов 21 (концентрация). Если в гранитах выявлена геохимическая аномалия никеля, то она может быть связана или с процессами, наложенными на граниты, или с ксенолитами гипербазитов, остатками кровли гранитного интрузива. В самих же массивах гипербазитов геохимические аномалии никеля обычны и могут при определенных значениях содержаний этого элемента характеризовать перспективные участки для обнаружения рудопроявлений или месторождений этого элемента.

Бериллий. Кларки литосферы $1,5 \cdot 10^{-4}$ %, гранитов $3,5 \cdot 10^{-4}$ %, гипербазитов $0,2 \cdot 10^{-4}$ %. Кларки концентрации: гранитов 2,3 (концентрация) гипербазитов 0,1 (рассеяние). Следовательно, если геохимические аномалии бериллия выявлены в гранитных интрузивах, то они связаны с одной из гранитных фаз или с постмагматическими процессами (грейзенизации и др.), генерируемыми гранитными интрузиями. Наличие геохимических аномалий бериллия в гипербазитах не может быть вызвано формированием этих пород. Причину появления таких аномалий и здесь необходимо искать в связи с гранитами, как это установлено в ряде районов развития месторождений бериллиевых руд.

Золото. Относится к тем элементам, для которых решать вопрос об явной концентрации в каких-либо породах трудно, но вместе с тем можно обнаружить общую тенденцию к концентрации.

Кларки ($n \cdot 10^{-7}$ %): литосфера 1,7, граниты 0,8, гранодиориты 1,2, диориты 2,8, основные породы 3,6, ультраосновные породы 6. Как видно, отмечается прогрессивное нарастание кларка золота от кислых к основным породам. В то же время кларки всех пород близки (одна и та же декада), поэтому появление в геохимическом поле аномалий золота с концентрацией $n \cdot 10^{-6} \div 10^{-5}$ %, по-видимому, можно объяснить наложением постмагматических процессов, сопровождающих средние и основные интрузии. Это подтверждается многочисленными примерами месторождений золота, связанных парагенетически с малыми интрузиями повышенной основности.

Таким образом, при интерпретации и оценке геохимических полей и аномалий необходимо учитывать особенности концентрации и рассеяния химических элементов в определенных типах горных пород. Одни из них могут быть породами-концентраторами одного элемента, выделяясь на фоне геохимического поля достаточно контрастными геохимическими аномалиями, другие обнаруживают геохимические особенности по совокупности ассоциаций химических элементов.

Ассоциации химических элементов (АХЭ) — это такие их сообщества, которые определяются сходством геохимических параметров и возникновение которых обусловлено общими процессами их миграции. Понятие АХЭ считается более широким, чем понятие «парагенезис химических элементов».

В геохимических полях химические элементы обнаруживаются в определенных ассоциациях, возникших в результате эндогенных, экзогенных и метаморфогенных процессов.

Форма существования АХЭ в нормальных и аномальных геохимических полях может быть минеральной и неминеральной. В нормальных литогеохимических полях АХЭ могут находиться в виде самостоятельных минералов — порообразующих, второстепенных и аксессуарных. В неминеральной форме химические элементы могут присутствовать в виде ионов на поверхности кристаллов. В аномальных литогеохимических полях и особенно в геохимических аномалиях преобладает минеральная форма существования АХЭ. Изучение эндогенных геохимических ореолов показывает, что в их пределах устанавливаются микровкрапленники и микропрожилки минералов полезных ископаемых и их спутников.

Например, по данным С. У. Вартаняна, в зонах развития эндогенных ореолов медноколчеданных месторождений Северной Армении отмечаются микровкрапленники и микропрожилки халькопирита и пирита (медесодержащего), концентрирующиеся вдоль плоскостей смятия и трещин во вмещающих измененных породах.

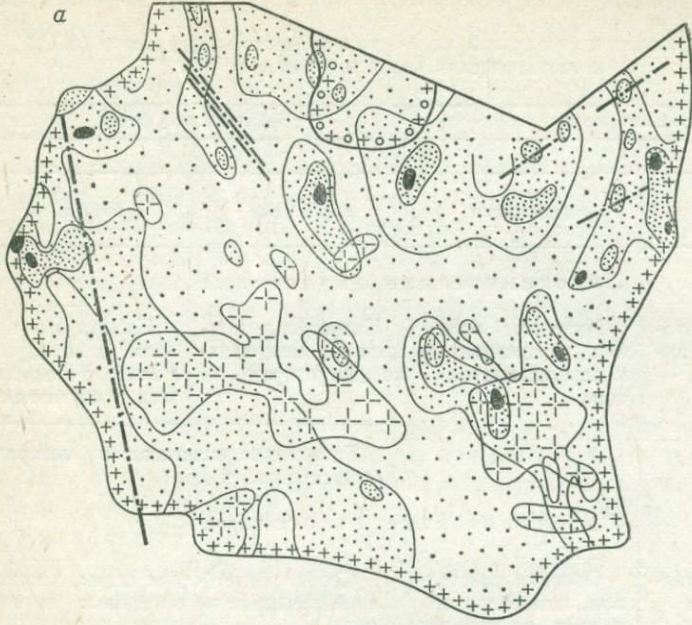
В эндогенных геохимических ореолах и аномалиях, связанных с вольфрамовыми и оловянными месторождениями, также преобладает минеральная форма существования АХЭ. Так, например, на площади Шерловогорского гранитного интрузива ореолы вольфрама соответствуют ореолам вольфрамита (рис. 3). Подобное же соответствие отмечается и для экзогенных ореолов и аномалий, по данным В. В. Поликарпочкина [39] и др.

Обобщая данные А. А. Беуса и С. В. Григоряна, Г. А. Голевой, Н. А. Рослякова, Г. И. Россмана, Н. И. Сафронова и других исследователей, можно составить сводную таблицу форм существования химических элементов-индикаторов в геохимических полях и аномалиях (табл. 2).

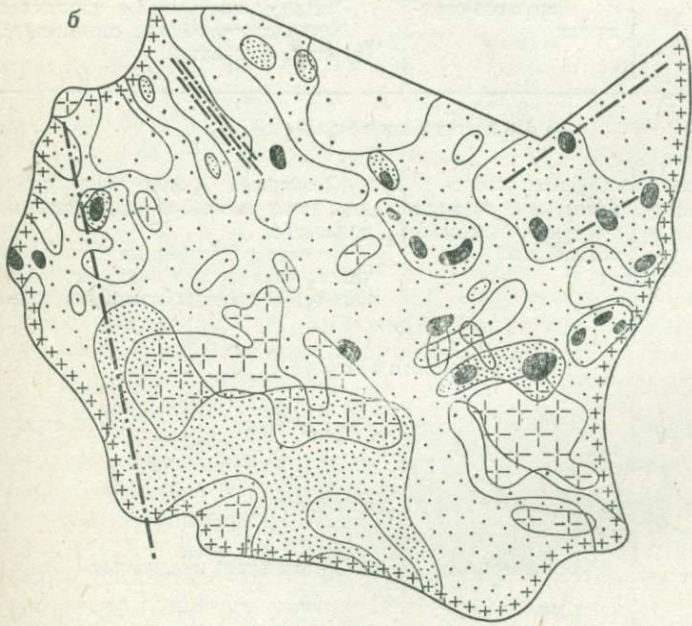
Изучение форм существования АХЭ в геохимических полях позволяет более уверенно интерпретировать и оценивать геохимические аномалии, а также выбирать и применять определенные виды анализов геохимических проб. При изучении геохимических полей содержание химических элементов определяется: суммарное (валовое) — по всем формам их существования (спектральный анализ и др.) или раздельное — по некоторым формам (анализы специальные — дитизоновые, вытяжки и др.).

Для интерпретации литохимических полей, в которых преобладают минеральные формы существования АХЭ, очень важными являются контрольные минералогические анализы определенной группы геохимических проб. Это особенно необходимо при интер-

a



б



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9

Рис. 3. Карты эндогенных ореолов вольфрама (а) и вольфрамита (б) на площади Шерловогорского гранитного интрузива.

1-5 — градации содержаний вольфрама и вольфрамита; 6 — гранит-порфиры; 7 — контур порфировидных гранитов; 8 — крупнозернистые граниты; 9 — разрывные нарушения

4247



**Формы существования ассоциаций химических элементов-индикаторов (АХЭ)
в геохимических полях и аномалиях**

Минеральная форма		Неминеральная форма	
Поля			
нормальные	аномальные	нормальные	аномальные
Литохимические эндогенные			
Минералы породо-образующие и ак-цессорные	Минералы полез-ных ископаемых и минералов-спутни-ков	Изоморфные при-меси в минералах-концентраторах	Изоморфные при-меси в минералах полезных ископае-мых и спутниках
		Газожидкие включения в минералах горных пород и др.	
Литохимические экзогенные			
Обломки кристал-лов акцессорных минералов	Обломки кристал-лов, минералов по-лезных ископаемых и минералов-спут-ников	Сорбционные формы (ионы, частицы, сорбированные на минералах и поро-дах). Растворы пленочных и поровых вод. Металлоорганические соединения (гуматы, фульваты)	
Гидрохимические			
Взвеси (тонко-дисперсные части-цы минералов и горных пород)	Взвеси (тонко-дисперсные частицы минералов полезных ископаемых)	Коллоидная форма (псевдоколлоид-ды), ионы элементов адсорбированных коллоидами. Истинно растворенные формы хими-ческих элементов в виде нейтральных молекул и простых комплексных ионов	
Атмохимические			
Аэрозоли горных пород	Аэрозоли полез-ных ископаемых	Газы и пары	Газы и пары
Биогеохимические			
	Фотоминералы	Органические соединения	

претации и оценке объектов с устойчивыми в экзогенных условиях минералами.

Факторы миграции химических элементов, определяющие условия возникновения их ассоциаций, а также формирование геохимических полей и аномалий, со времени А. Е. Ферсмана принято подразделять на две группы: внутренние и внешние.

Внутренние факторы включают строение атома, кристаллохимические свойства, удельную массу, упругость паров и летучесть, растворимость. Внешние факторы — это термодинамические, физико-химические (температура, давление, концентрация) и энергетические условия системы. Важными для геохимических прогнозов являются следующие кристаллохимические свойства: химическая связь в кристаллических решетках, электроотрицательность, радиусы атомов и ионов, изоморфизм, энергия кристаллической решетки.

По типам химической связи выделяется четыре группы моделей кристаллических решеток: ионные, атомные, молекулярные, металлические. Одной из важных кристаллохимических характеристик, позволяющих объяснять формирование той или иной группы решеток, является электроотрицательность, т. е. энергия притяжения данным атомом валентных электронов при соединении его с другими атомами [11].

Сопоставление величин электроотрицательности отдельных семейств химических элементов с целью интерпретации геохимических полей представляет интерес. Элементы семейства *s* имеют низкие значения и небольшой размах величин электроотрицательностей (0,4—0,9 МДж). Элементы семейства *d* отличаются несколько более высокими показателями при меньшей амплитуде их колебаний (0,6—1,0 МДж). Элементы *p* характеризуются наиболее высокими величинами и большой амплитудой их колебаний (0,5—2,7 МДж). Следовательно, ионные связи в решетках формируются почти всегда при участии элементов семейства *p*, входящих в соединения с элементами семейств *s*, *d* и теми элементами семейства *p*, которые характеризуются большими различиями в электроотрицательности. Учитывая это положение, можно интерпретировать геохимические поля и аномалии, а также прогнозировать ассоциации химических основных элементов-индикаторов и спутников. При этом рассматривается только определенная термодинамическая система. Например, в эндогенной генетической системе переносчиками металлов являются соединения, в которых большую роль играют элементы семейства *p* с высокими величинами электроотрицательностей (F 2,7 МДж, O 2,2, Cl 1,9, S 1,5, В 1,2, Si 1,1 МДж). В процессе образования постмагматических месторождений формируются рудные тела, геохимические ореолы и ореолы измененных пород. При этом происходит разрушение комплексных соединений и выпадение минералов. В ореолах, наряду с рудными минералами, содержащими элементы семейства *d* (вольфрам, молибден и др.) и элементы семейства *s* (берилл, литиевые слюды), образуются минералы, содержащие элементы

семейства p с высокими значениями электроотрицательности (флюорит, турмалин, кварц и др.). По отношению к рудным телам ореолы этих минералов и элементов могут занимать внешние зоны, создавая благоприятные условия для прогноза и поисков скрытого оруденения [8, 46].

Важным фактором для интерпретации геохимических полей и аномалий является изоморфизм — способность близких по свойствам химических элементов замещать друг друга в кристаллических решетках, обусловленный величинами радиусов ионов и атомов. Анализ величин радиусов ионов и атомов на современной таблице Менделеева показывает периодичность их распределения по семействам химических элементов (s , p , d , f) в пределах отдельных групп. Периодичностью распределения величин радиусов ионов в зависимости от семейства химических элементов, по-видимому, может быть в определенной мере объяснен изовалентный и гетеровалентный изоморфизм, выделенный А. Е. Ферсманом.

Рассмотрим некоторые примеры изовалентного изоморфизма, представляющие интерес для интерпретации геохимических полей.

Золото и серебро, образующие природный сплав, имеют близкие радиусы ионов и атомов [золото соответственно 1,37 и 1,44; серебро 1,13 (1,23) и 1,44]. В эндогенных месторождениях эти элементы формируют близкие по параметрам ореолы вокруг рудных тел. Однако в связи с обычно повышенным содержанием серебра в рудных телах ореолы этого элемента несколько шире и протяженнее. В экзогенных процессах для месторождений с крупным золотом могут формироваться шлиховые ореолы и россыпи золота. Для месторождений с тонкодисперсным золотом, особенно в сульфидных рудах, в экзогенных условиях происходит разделение золота и серебра в верхних частях зоны окисления, где разрушается природный сплав этих элементов. В нижних частях этих зон может вновь наблюдаться совпадение максимумов их накопления.

Цирконий и гафний имеют близкие радиусы ионов 0,87 и 0,86, что обеспечивает их изовалентный изоморфизм, который может быть использован при анализе геохимических полей. При соотношении содержаний этих элементов в минерале цирконе 30:1 (цирконий: гафний), имеются основания предполагать наличие гафния в тех месторождениях, которые создают контрастные геохимические аномалии циркония.

Ниобий и тантал — постоянные спутники — имеют радиусы ионов 0,69. Эти элементы образуют ряд минералов, получивших название тантало-ниобатов. В эндогенных месторождениях эти элементы семейства d формируют геохимические аномалии, локализующиеся главным образом в контуре тех интрузивов, с которыми они генетически связаны. В процессе экзогенных изменений тантал и ниобий обычно не разделяются из-за большой устойчивости их минералов. Следовательно, отмечается и совпадение геохимических аномалий этих двух элементов.

Редкие земли объединены в группу лантаноидов, для которых установлены близкие радиусы ионов (0,99—1,22). При обнаружении в геохимическом поле одного из элементов этой группы можно предполагать наличие и других элементов.

Гетеровалентный изоморфизм, характерный для химических элементов с разной валентностью, отмечается и для элементов одного и того же семейства. Например, элементы семейства d — молибден и рений — имеют разную валентность, но одинаковый радиус иона — 0,68. Рений — сверхрассеянный элемент (кларк $n \cdot 10^{-8} \%$) — содержится в повышенных количествах только в мо-

либдените (до $2 \cdot 10^{-3}$ %). Следовательно, оценивая геохимические аномалии молибдена, нельзя забывать о возможности обнаружения связанных с ними рудных тел, в которых вероятно появление молибденита с промышленными содержаниями рения.

Энергия кристаллической решетки — это энергия, которая затрачивается на разрушение ее, или энергия, выделяемая при ее образовании. Это понятие, введенное А. Е. Ферсманом, имеет значение при анализе минеральных форм существования химических элементов в геохимических полях и аномалиях. По формуле, предложенной А. Е. Ферсманом и уточненной В. И. Лебедевым, может быть определена энергия кристаллической решетки:

$$v = 256 (\text{эк } A + \text{эк } B + \text{эк } C \dots),$$

где эк — энергетический коэффициент. Согласно эмпирическим расчетам А. Е. Ферсмана, для анионов и маловалентных катионов $\text{эк} = \omega^2/2R_i$; для катионов $\text{эк} = \omega^2/2R_i \cdot 0,75(R_i + 0,20)$, где ω — валентность, R_i — радиус аниона; A, B, C — элементы.

Для примера определим энергию кристаллической решетки галита и кварца:

$$V = 256 (0,45 + 0,25) = 0,75 \text{ МДж (галит)},$$

$$V = 256 (8,6 + 2 \times 1,55) = 12,5 \text{ МДж (кварц)}.$$

Сопоставление этих величин показывает, что кристаллические решетки указанных минералов по энергии весьма существенно отличаются. Это объясняет устойчивость в экзогенных условиях кварца и неустойчивость галита.

Определяя величину энергии кристаллической решетки для конкретных минералов, можно в первом приближении прогнозировать поведение их в эндогенных и экзогенных условиях и решать вопросы о форме существования химических элементов в геохимических полях. В частности, представляет интерес вопрос о формировании россыпей минералов; устойчивых в экзогенных условиях.

В группу внутренних факторов миграции могут быть отнесены также изменения изотопного состава химических элементов, значения которых для геохимических поисков рассмотрены в некоторых работах [2].

Внешние факторы миграции химических элементов имеют также существенное значение для надежной интерпретации геохимических полей и аномалий. При анализе эндогенных процессов должны учитываться следующие факторы глубинной миграции (по Н. И. Сафронову): процесс остывания магматических тел и постмагматических растворов, тектоно-магматическая обстановка, пронцаемые и экранирующие свойства горных пород, диффузионные и инфильтрационные свойства постмагматических растворов. Рассмотрим некоторые из указанных факторов.

Диффузия — медленное проникновение раствора в породу, процесс равномерного распределения вещества от участков с высокой концентрацией к участкам с пониженной концентрацией.

Инфильтрация — просачивание раствора через трещины и проницаемые зоны.

Диффузионные геохимические ореолы определяются пористостью горных пород. Максимальное удаление от рудных тел от первых метров до 100—200 м. Инфильтрационные геохимические ореолы имеют протяженность от сотен метров до первых километров по простиранию и восстанию рудных тел. При этом могут формироваться «положительные» ореолы концентрации химических элементов, привносимых гидротермальными растворами, а также «отрицательные» ореолы рассеяния химических элементов, выносимых из вмещающих пород.

Проницаемость и экранирующие свойства пород могут отражаться на характере зональности геохимических аномалий и ореолов. Например, при наличии непроницаемых экранов в них могут быть выявлены только наиболее подвижные летучие элементы, создающие верхние части ореолов. На участках тектонически нарушенных экранирующих пород может проявляться зональность геохимического ореола, характерная для данного месторождения.

При интерпретации экзогенных геохимических полей и аномалий среди внешних факторов миграции должны учитываться кислотность растворов и окислительно-восстановительный потенциал. Важное значение приобретают климатические факторы, типы ландшафтов, формы миграции химических элементов в геохимических полях.

Геолого-геохимическое моделирование заключается в изучении моделей конечных объектов геохимических поисков, т. е. месторождений полезных ископаемых, по следующим параметрам: характеру и отчетливости (контрастности) геохимических аномалий, создаваемых объектами; условиям залегания по отношению к современной поверхности; генезису и морфологии; зональности.

Модели конечных объектов (месторождений) по характеру и отчетливости создаваемых ими первичных геохимических аномалий (ореолов) отражают ассоциации элементов-индикаторов, а также поисковое значение каждой из выделенных групп объектов (табл. 3).

В I группе главным элементом-индикатором является ведущий химический элемент полезного ископаемого: в солях — калий, натрий или магний, в фосфоритах — фосфор и т. д. Во II группе главный элемент-индикатор аномального поля выделить не всегда просто. Для решения этого вопроса требуется учитывать все известные геологические и минералого-геохимические особенности конкретного объекта. Группа III характеризуется, что геохимические методы для поисков аномалий имеют вспомогательное значение по сравнению с геолого-минералогическими и геофизическими методами.

Модели объектов по условиям залегания по отношению к современной поверхности характеризуются особенностями проявления аномальных геохимических полей. Месторождения, выходящие на поверхность, отражаются в ней признаками, которые могут быть

Геолого-геохимические модели месторождений твердых полезных ископаемых

Группа	Общая характеристика месторождений по характеру создаваемых первичных геохимических аномалий	Поисковое значение аномалий	Полезные ископаемые	
			эндогенные	экзогенные
I	Создающие отчетливые простые аномалии	Поисковые признаки прямые	Апатит (P) Барит (Ba) Флюорит (F) Киноварь (Hg) Антимонит (Sb) Боросиликаты (B) Хромиты (Cr)	Соли (K, Na, Mg) Целестин (Sr) Фосфориты (P) Бораты (B) Сера (S) Руды Ni (силикатные) Ge в углях; Au в зоне окисления
II	Создающие отчетливые сложные комплексные аномалии	Поисковые признаки прямые и косвенные	Руды: Ni, Co, Cu, Zn, Pb, Sn, W, Be, Mo, Ni, Ta, TR	Россыпи устойчивых минералов следующих металлов Au, Pt, Zr, Ti, Nb, Ta, Sn, TR
III	Создающие неотчетливые аномалии	Предпосылки прогнозирования и поисковые признаки косвенные	Fe-руды, пьезопитическое сырье, алмазы, асбест, тальк, камнесамоцветное сырье	Fe-руды, бокситы, угли, доломиты Россыпи алмазов, пьезосырье, поделочные камни
IV	Не создающие аномалий	—	Строительные материалы	

выявлены при наземных поисках. Скрытые объекты по разному проявляются на поверхности земли и на определенном от нее уровне в зависимости от глубины залегания верхней кромки объекта. По этому параметру выделяются объекты [3]: близповерхностные до 30 и 30—100 м, среднеглубинные 100—300 м глубокозалегающие 300—1000 м, сверхглубокие свыше 1000 м.

Слепые близповерхностные и среднеглубинные месторождения иногда могут проявляться на поверхности земли контрастными геохимическими аномалиями в коренных породах или элювиальных отложениях. Погребенные объекты этих глубинных интервалов создают обычно аномальные геохимические поля в базальном горизонте перекрывающих толщ, в погребенной коре выветривания коренных пород или гидрохимические аномальные поля в подземных водах. Глубокозалегающие слепые объекты обычно

не проявляются на современной поверхности, за исключением некоторых типов месторождений (например, сурьмяно-ртутных). Преобладающее большинство этих объектов, так же как и сверхглубоких, создают аномальные геохимические поля в определенных представительных горизонтах, выявление которых возможно только при глубинных поисках — из буровых скважин или подземных горных выработок.

Моделирование объектов геохимических поисков по их генезису и морфологии требует учета существующих генетических гипотез [12]. При этом должны рассматриваться и сопоставляться варианты аномальных геохимических полей для основных гипотез [8]. Например, для колчеданных месторождений должны быть обсуждены две модели аномальных геохимических полей, соответствующие гипотезе вулканогенно-осадочного и гидротермального генезиса. Морфология месторождений также влияет на характер и морфологию сопровождающих их аномальных геохимических полей. Пологозалегающие объекты эндогенного типа формируют поля вдоль проницаемых зон, горизонтов вмещающих пород и пересекающих их трещин. Для крутопадающих эндогенных месторождений характерны аномальные геохимические поля такого же падения, развитые по разрывным нарушениям и оперяющим их трещинам. Экзогенные месторождения сопровождаются первичными аномальными геохимическими полями в пределах тех толщ или свит осадочных пород, которые формировались одновременно с полезными ископаемыми.

Моделирование объектов по зональности создаваемых ими аномальных геохимических полей является одним из наиболее важных приемов воспроизведения закономерностей распределения химических элементов и их ассоциаций в пространстве. Разработаны модели для локальных, региональных и планетарных аномальных геохимических полей.

Подробно они будут рассмотрены в последующих разделах. Здесь же приведем общие модели геохимической зональности первичных ореолов эндогенного типа и теоретическую модель зональности эндогенных аномальных геохимических полей.

Обобщенный ряд зональности первичных эндогенных ореолов, разработанный Л. Н. Овчинниковым и С. В. Григорьяном для сульфидсодержащих гидротермальных месторождений (от подрудных к надрудным зонам), имеет следующий вид [8]: W—Be—Sn—Li—Mo—Co—Ni—Bi—Cu—Au—Zn—Pb—Ag—Cd—Hg—As—Sb—Ba—J.

Теоретическая модель зональности эндогенных аномальных геохимических полей, построенная на основании периодической системы химических элементов с учетом известных моделей зональности [8, 9, 42, 46], приведена в табл. 4, где указаны элементы, выявляемые спектральным анализом или другими видами обычных анализов. Рассмотрим примеры использования этой модели для общей интерпретации геохимических аномальных полей.

Теоретическая модель зональности эндогенных аномальных геохимических полей

Семейства химических элементов	АХЭ		
	I широкого рассеяния	II повышенного рассеяния	III узкого рассеяния
<i>s</i> -литофилы <i>p</i> -литофилы <i>p</i> -халькофилы <i>d</i> -халькофилы	Li Be K Rb Cs B F Cl Br I As Sb Hg	—	—
<i>d</i> -халькофилы <i>p</i> -халькофилы	—	Cu Zn Au Ag Cd Pb Bi Ge Ga Tl In Sn	—
<i>d</i> -литофилы <i>f</i> -литофилы <i>d</i> -сидерофилы	—		Ti V Cr Zr Nb Ta W Mo TR Co Ni Pt

Пример 1. В аномальном геохимическом поле главный элемент находится в ассоциации I зоны. Элементами-индикаторами могут быть элементы той же ассоциации, второстепенное значение будут иметь элементы ассоциаций II и III, которые могут присутствовать в виде элементов-примесей в рудных минералах. Предположим, что в аномальном поле главный элемент — ртуть; элементы-индикаторы — сурьма, мышьяк, фтор, барий, калий. Элементы-примеси в пиритах измененных пород могут создавать ореолы никеля, меди и др.

Пример 2. Главные элементы аномального поля находятся во II ассоциации. Число элементов-индикаторов увеличивается, так как кроме элементов собственно ассоциации II (например, свинец, цинк) могут присутствовать элементы широкого рассеяния I ассоциации (например, барий, мышьяк, сурьма и др.). Вполне возможны ореолы элементов из III ассоциации за счет элементов-примесей в сульфидах (например, никель, кобальт, ванадий и др.).

Пример 3. Главный элемент аномального поля находится в III ассоциации, создающей наиболее узкие ореолы вокруг рудных тел (например, тантал, ниобий). Вместе с тем можно ожидать во внешних зонах поля элементы широкого рассеяния (например, литий, бериллий, цезий).

Математическое моделирование геохимических полей основано на сопоставлении содержаний химических элементов в разных рангах (C_k, C, C_f, C_a, C_b). Наиболее полные данные по этому вопросу изложены в работах [9, 22, 25, 26, 39, 42, 43].

Используя материалы этих работ, приведем краткую характеристику основных математических моделей геохимических полей, и прежде всего литохимических.

Общие математические модели, основанные на соотношениях рассеяния и концентрации химических элементов в эндогенных литохимических полях, рассматриваются на примерах первичных ореолов.

В первичных ореолах распределение содержаний рудных элементов, по А. П. Соловову, подчиняется экспоненциальной зависимости (см. рис. 1):

$$C_x = C_0 \cdot e^{-\lambda x} + C_f,$$

где C_x — содержание элемента на расстоянии x от точки с начальной концентрацией C_0 ; $1/\lambda$ — коэффициент миграционной способности (подвижности), измеряемый в м; характеризует способность атомов химических элементов к миграции от центра рудной зоны (от начальной точки $x=0$) в сторону вмещающих пород (для диффузионных ореолов) и по восстанию (падению) рудной зоны для инфильтрационных ореолов. Величина $1/\lambda$ пропорциональна $\text{ctg } \alpha$, образованного осредняющей прямой графика содержаний рудного элемента с осью абсцисс

$$1/\lambda = K \cdot \text{ctg } \alpha,$$

где K — коэффициент, учитывающий соотношение масштабов по осям координат. В работе А. П. Соловова и др. [43] приведены примеры расчета глубины до уровня с заданным промышленным содержанием металла в рудах на основе оценки величины $1/\lambda$ для надрудных инфильтрационных ореолов.

В. В. Поликарпочкин, Л. В. Таусон, Р. И. Дубов и др. в разработанных математических моделях формирования рудных тел и эндогенных ореолов показывают более сложное распределение концентраций в ореолах в виде резко обозначенных фронтов. В узкой зоне непосредственного контакта с рудным телом наблюдается постепенное уменьшение содержаний по экспоненте, затем следует интервал с постоянной или колеблющейся около некоторого среднего уровня концентрацией, после которого идет резкое понижение концентраций до уровня фона (см. рис. 1, а). Главной математической моделью оценки геохимических аномалий (ореолов) является их продуктивность [9], представляющая собой произведение среднего содержания элемента в аномалии на ее ширину (линейная продуктивность в $m \cdot \%$) или на ее площадь (площадная продуктивность, в $m^2 \cdot \%$).

Линейная продуктивность первичного ореола по определенному сечению подсчитывается по следующей формуле [25]:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i (C_i - C_{\phi}),$$

где m_i — длина интервала опробования; C_i — содержание элемента в пробах; n — число проб; C_{ϕ} — среднефоновое содержание.

Сопоставление конечных или промежуточных объектов геохимических поисков может производиться по «геохимическому спектру» — оригинальной математической модели, разработанной А. П. Солововым. Им предложены два варианта изображения этого параметра. Первый вариант — графический предусматривает построение графиков продуктивностей элементов для двух сопоставляемых объектов (исследуемого и эталонного). Элементы ранжируются в убывающем порядке продуктивностей. Полученные графики имеют вид монотонно убывающих кривых, характеризующих геохимический спектр объектов (рис. 4). Аналитически геохимиче-

ский спектр можно выразить с помощью геохимического коэффициента n -го порядка:

$$\gamma_n = \frac{M_1 \cdot M_2 \dots}{M_3 \cdot M_4 \dots},$$

где $M_1 \cdot M_2$ — произведения продуктивностей или средних содержаний элементов, находящихся в дефиците (по графикам); $M_3, M_4 \dots$ — то же самое, но находящихся в избытке (по графикам).

Н. И. Сафроновым и др. [42] предложена математическая модель формирования первичного ореола на основе так называемой «энергии рудообразования» — природной энергии, в результате воздействия которой за счет всеобщего рассеяния рудообразующих элементов возникают их концентрации (месторождения). Считается, что вне зависимости от природы процесса концентрирования (разрежения) полный расход энергии в расчете на определенный химический элемент будет тем больше, чем меньше концентрация этого элемента в смеси. Полная затрата энергии рудообразования ΔE_n в расчете на единицу объема руды (ореола) при одном элементе составит

$$\Delta E_n = K \ln \cdot K,$$

где $K = C_p / C_\phi$ — кларк концентрации элемента в руде (ореоле)

по сравнению с геохимическим фоном. Энергия рудоореолообразования может быть рассчитана и для ассоциации химических элементов. Н. И. Сафронов рекомендует составлять геохимические карты в показателях суммарной энергии рудообразования, а также использовать их для определения прогнозных ресурсов руды.

Математическая модель связи между концентрацией и рассеянием химических элементов в литосфере разработана Е. М. Квятковским [26]:

$$\bar{C}_p = 10 \cdot \sqrt{C_h},$$

где \bar{C}_p — среднее содержание элемента в руде; C_h — кларк элемента.

Запасы элемента в месторождениях $Q = 10^n \cdot C_h$, где n — показатель степени (5 — для рудопроявлений, 6 — для небольших месторождений, 7 — для средних, 8 — для крупных, 9 — для уникаль-

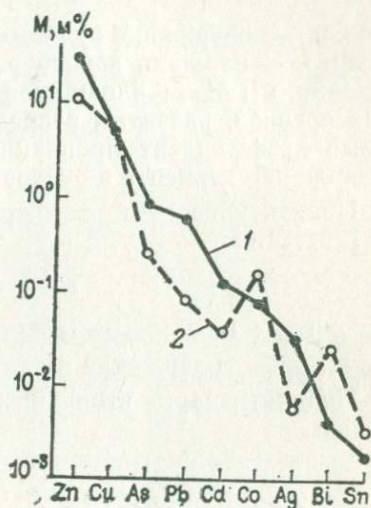


Рис. 4. Геохимические спектры [43].
1 — эталонного объекта; 2 — сопоставляемого объекта

ных). Глобальные запасы металлов в месторождениях $Q = 10^{10} \cdot C_n$.

Зная кларк элемента, можно ориентировочно определить порядок запасов в месторождениях определенного химического элемента.

Для вторичных (экзогенных) литохимических ореолов и потоков предложены свои математические модели. Так, А. П. Соловьевым выведено уравнение реального литохимического потока в аллювии

$$C_x = K \cdot M_x / (S_x + C_\phi),$$

где C_x — содержание рудного элемента в аллювиальных отложениях; S_x — площадь водосборов для соответствующих точек опробования, м²; M_x — площадная продуктивность вторичных остаточных ореолов, развитых в пределах водосборов, м² %; $K \geq 1$ — местный коэффициент пропорциональности; C_ϕ — местное фоновое содержание элемента в русловых отложениях.

Продуктивность потоков рассеяния определяется по формуле [25]:

$$M_x^1 = S_x (C_x^1 - C_\phi^1),$$

где C_x^1 и C_ϕ^1 — соответственно найденное в данной точке и местное фоновое содержание в аллювии; S_x — площадь водосбора.

Продуктивность вторичных ореолов можно найти из выражения

$$M = \Delta x \cdot l \left(\sum_{x=1}^N C_x - N C_\phi \right),$$

где Δx — шаг пробоотбора по профилю; l — расстояние между пробами, м; $\sum_{x=1}^N C_x$ — арифметическая сумма содержаний в контуре $C_x \geq C_a$ (для данной аномалии); C_ϕ — местное фоновое содержание; N — число точек, вошедшее в подсчет.

Количественная оценка прогнозных ресурсов по геохимическим данным выражается математическими моделями, которые могут соответствовать точечным или площадным объектам прогноза и поисков [23]. Оценка прогнозных ресурсов полезных ископаемых моделируется соответствующими уравнениями [25]. Для оценки прогнозных ресурсов Q слепого оруденения («точечные объекты») используются параметры надрудных первичных ореолов:

$$Q = \alpha \cdot 1/40 \cdot M \cdot H.$$

где α — доля балансовых руд в общих ресурсах полезного компонента в ореоле; M — продуктивность первичного ореола, м² %; H — вероятная вертикальная протяженность оруденения. Рекомендуемая величина α для различных типов месторождений: скарново-шеелитовых W 0,5; скарново-полиметаллических Pb 0,3; мед-

но-молибденовых Cu 0,8; жильных полиметаллических Pb 0,2; жильных золото-кварцевых Au 0,3; золото-серебряных Au 0,3; прожилково-вкрапленных настуран-сульфидных U 0,4.

Прогнозные ресурсы слабо эродированного оруденения можно оценить по уравнению $Q = 1/40 \cdot M^1 \cdot 0,8 H$; вскрытого в средней части $Q = 1/40 \cdot M^1 \cdot 0,6H$,

где M^1 — продуктивность рудного тела; H — вероятная протяженность оруденения.

Ожидаемые прогнозные ресурсы по вторичным ореолам рекомендуется оценивать согласно следующему уравнению: $Q = 1/K \cdot M/40 \cdot H$, где K — коэффициент пропорциональности; M — продуктивность ореола.

Оценка прогнозных ресурсов по потокам рассеяния (площадные объекты) может выполняться по формуле [А. П. Соловов, В. А. Бородин, 40]:

$$Q = 1/KK^1 \cdot \frac{1}{40} H \sum_{i=1}^m M_i^1,$$

где $\sum_{i=1}^m M_i^1$ — сумма устойчивых продуктивностей смежных водотоков; H — глубина оценки, выбираемая по геологическим данным. Величины K^1 и K определяются опытно-методическими работами (например, K^1 для Au и Ag 0,7; W и Bi 1,1; Pb 1,2; Sn и As 1,3; Zn 2,2; величина K для золото-серебряных объектов — около 1).

При использовании указанных уравнений следует учитывать характер геологических объектов, для которых выполняется оценка ресурсов. Оценка прогнозных ресурсов кат. P_1 , P_2 производится для конечных объектов поисков — проявлений и месторождений полезных ископаемых по данным интерпретации геохимических ореолов. Уверенно это можно сделать для штокверковых и стратиформных прожилково-вкрапленных месторождений. Для промежуточных объектов — аномальных геохимических полей, в пределах которых конечные объекты только прогнозируются, может быть выполнена лишь безобъектная (по А. П. Соловову) оценка прогнозных ресурсов кат. P_3 в пределах определенных геологических блоков.

Математические модели изображения геохимического поля в виде геохимических карт подразделяются на моноэлементные и полиэлементные. Последние включают следующие разновидности: аддитивные, мультипликативные и многомерные.

Как отмечают Л. А. Верховская и Е. П. Сорокина [10], для описания полиэлементного скалярного геохимического поля целесообразны следующие конструктивные модели:

- аддитивная модель $\xi(z) = c(z) + \gamma(z)$;
- мультипликативная модель $\xi(z) = c(z) \cdot \psi(z)$;

в) аддитивно-мультипликативная модель $\xi(z) = [c(z) + \delta(z)] \times \psi(z)$,
 где $c(z)$ — детерминированная составляющая; $\gamma(z)$, $\psi(z)$, $\delta(z)$ — случайные составляющие с различными вероятностными характеристиками.

В настоящее время наиболее широко развиты моноэлементные и мультипликативные модели геохимических полей, для построе-

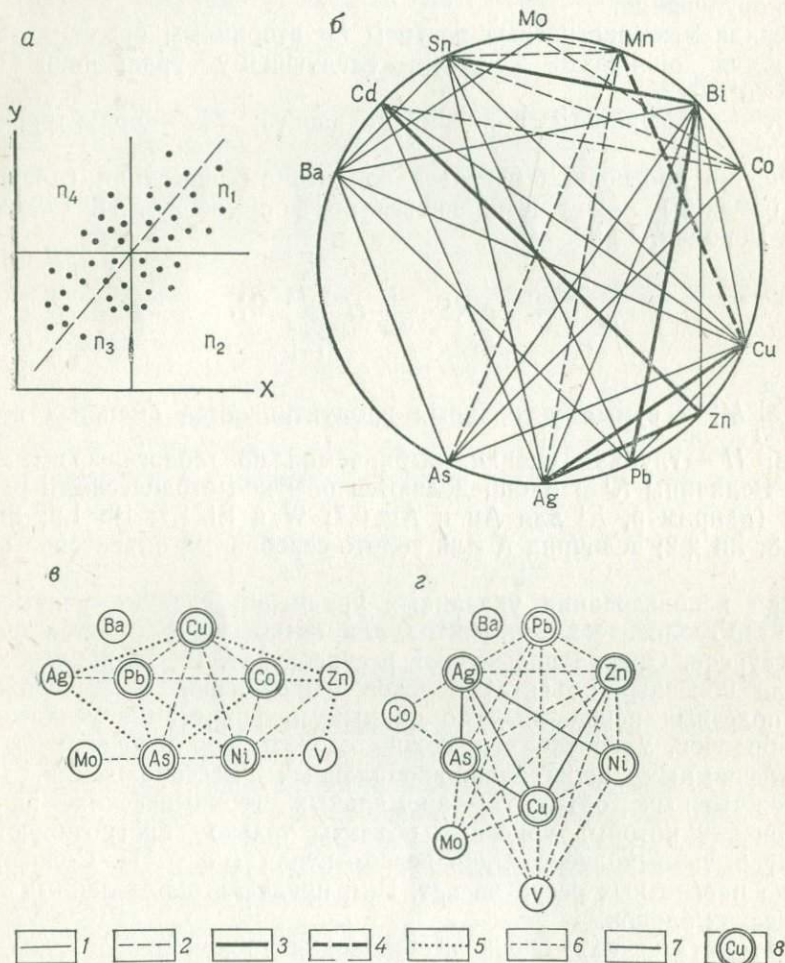


Рис. 5. Графические модели отображения коэффициентов корреляции.

а — схема определения коэффициента по корреляционному графику, по Н. И. Соловьеву,
 б — круговая корреляционная диаграмма элементов-индикаторов медноколчеданного месторождения, по А. П. Соловьеву; значимые связи: 1 — положительные ($r_{xy} > 0,5$); 2 — отрицательные ($r_{xy} < -0,5$); корреляционные графы элементов-примесей гидротермальных метасоматитов в пределах серноколчеданных (в) и медно-цинковых (г) рудных тел (Г. А. Вострокнутов): 5 — слабые связи ($r_{xy} < 0,5$), 6 — умеренные связи ($0,5 < r_{xy} < 0,8$), 7 — сильные связи ($0,8 < r_{xy} < 1$); 8 — элементы, составляющие корреляционные ядра

ния которых используются как ручная обработка данных, так и обработка на ЭВМ. Разрабатываются способы построения многомерных моделей геохимических полей с помощью автоматизированной системы на ЭВМ [В. Н. Евдокимова и др., 16].

Математические модели связи между химическими элементами в геохимических полях составляются на основе корреляционного анализа (парная и множественная корреляция). Корреляционные связи между элементами-индикаторами могут быть отображены в виде графических моделей различного типа. На модели полей корреляции (рис. 5, а) по оси абсцисс нанесены значения содержаний (или логарифмы содержаний) одного элемента, по оси ординат — другого.

Каждая точка в поле расположена на пересечении линий содержаний двух элементов. Осредняющая линия поля указывает на характер корреляционной связи между элементами — положительной или отрицательной. Для вычисления величины коэффициента корреляции на графике проводят еще две прямые, параллельные осям координат и соответствующие средним значениям содержаний (\bar{X} и \bar{Y}). Затем подсчитывают число точек, заключенных в квадрантах $N_1 = n_1 + n_3$, $N_2 = n_2 + n_4$; коэффициент корреляции оценивают по формуле

$$r_{x,y} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}\right).$$

Для вычисления коэффициентов корреляции на ЭВМ используют программы, с помощью которых получают матрицы парных коэффициентов корреляции (табл. 5), на основе которых может

Таблица 5

Матрица парных коэффициентов корреляции между логарифмами содержаний химических элементов для рудного интервала, вскрытого скважиной на медноколчеданном месторождении «50 лет Октября» [43]

Элемент	Cu	Pb	Zn	Co	Mo	As	Ag	Mn	Ba	Cd	Sn	Bi
Cu	1,00	0,26	0,53	0,05	-0,01	0,48	0,89	-0,50	0,22	0,37	0,35	0,43
Pb		1,00	-0,06	-0,12	0,02	0,35	0,14	0,13	0,41	-0,02	0,28	0,74
Zn			1,00	-0,15	-0,15	-0,14	0,67	-0,15	0,04	0,74	0,42	0,27
Co				1,00	0,12	0,25	0,07	-0,24	0,06	-0,25	-0,35	0,17
Mo					1,00	0,14	0,08	-0,35	0,32	-0,13	0,23	0,13
As						1,00	0,42	-0,31	0,20	-0,15	0,09	0,28
Ag							1,00	-0,41	0,03	0,49	0,33	0,35
Mn								1,00	0,17	-0,09	0,20	0,09
Ba									1,00	-0,06	0,35	0,47
Cd										1,00	0,41	0,23
Sn											1,00	0,62
Bi												1,00

быть построена модель в виде круговой диаграммы (рис. 5, б). Некоторые исследователи, например Г. А. Вострокнутов, рекомен-

дуют построение корреляционных графов по данным вычисления парной корреляции (рис. 5, в, г).

Более полный геохимический анализ связей между химическими элементами определенно геохимического (геологического) объекта может быть дан путем построения корреляционных графов парной корреляции на основе периодической системы Менделеева (рис. 6). На приведенном графе отражены корреляционные

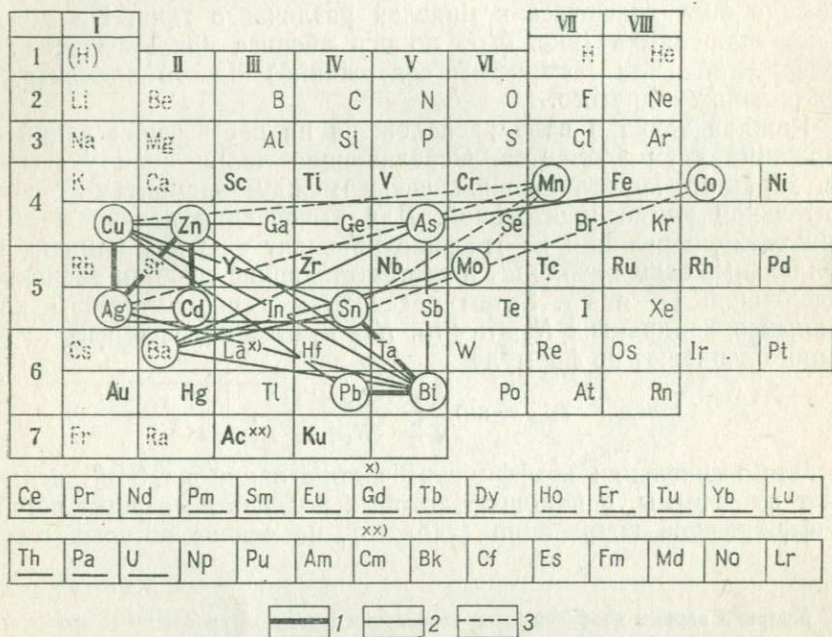


Рис. 6. Модель парной корреляции, построенная на основе периодической системы Д. И. Менделеева.

Корреляционные связи значимые: положительные: 1 — тесные ($r_{xy} > 0,5$); 2 — заметные; 3 — отрицательные (обозначения элементов см. рис. 2)

связи между элементами для того примера, который рассмотрен ранее по медноколчеданному месторождению «50 лет Октября». Здесь отчетливо выделяются две ассоциации элементов, имеющих положительные тесные корреляционные связи. Первая ассоциация включает элементы семейств *d*-халькофилов (медь, серебро, цинк, кадмий); вторая ассоциация — элементы семейств *p*-халькофилов и литофилов (свинец, висмут, олово). Между этими ассоциациями отмечается заметная положительная связь, что свидетельствует об едином процессе формирования рудного месторождения. Отрицательные связи существуют между элементами этих двух ассоциаций и марганцем, который, по-видимому, не характерен для процесса рудообразования. Заметная положительная связь кобальта и мышьяка с главными ассоциациями может указывать на

то, что эти элементы присутствуют в виде примесей в некоторых сульфидных минералах рудных тел месторождения. Связи бария только с мышьяком, молибденом, оловом и висмутом, если учитывать положение этого элемента в периодической системе, не вполне понятны. Для решения этого вопроса необходимы данные детальных минералогических микроскопических исследований.

Множественная корреляция позволяет составить модель связи между неизвестной величиной и рядом известных величин. Например, для определения неизвестной величины глубины эрозионного среза геохимической аномалии (оруденения) используются известные данные о содержании в аномалии ряда элементов. Расчет множественной корреляции может быть сделан по уравнениям множественной регрессии.

В. Ф. Мягковым разработана геометро-статистическая модель геохимического поля рудных тел на основе геохимического метода парагенетического анализа руд. Относительное положение различных типов геохимических полей в рудном теле оценивается через косинус угла между градиентами, который тождествен коэффициенту корреляции [5]. Этот метод может быть использован и для интерпретации геохимических полей и аномалий, связанных с рудными телами месторождений различных полезных ископаемых.

Математическая модель зональности геохимических полей и аномалий, используемая для определения глубины их эрозионного среза, основана на вычислении коэффициента зональности.

Для мультипликативных ореолов (аномалий) коэффициент зональности определяется следующим уравнением [25]:

$$I = \frac{P \cdot M_i}{P \cdot M_j} \text{ или } Y = \frac{P \cdot \bar{C}_i}{P \cdot \bar{C}_j},$$

где $P \cdot M_i$, $P \cdot \bar{C}_i$ — произведения продуктивностей (средних содержаний) ореолов по надрудным элементам; $P \cdot M_j$, $P \cdot \bar{C}_j$ — то же, для подрудных элементов (рудных, нижнерудных).

По данным В. В. Поликарпочкина и Л. В. Таусона, количественная характеристика вертикальной зональности графически выражается несовпадением максимумов концентраций различных элементов или разной величины их градиентов по тому или иному направлению (рис. 7, а). А. П. Соловов и А. В. Гаранин предлагают ориентироваться на такие соотношения между содержаниями рудных элементов, которые монотонно изменяются с глубиной (рис. 7, б).

Физико-математические модели гидрохимических ореолов и аномалий рассмотрены в работах С. П. Албула. Для прогноза характера морфологии и структуры гидрохимических аномалий предложены расчетные формулы, основанные на теории диффузионно-фильтрационного распределения рудных элементов в водах. Формулы приводятся для различных процессов — одномерной фильтрации подземного потока через рудное тело ограниченного размера и др.

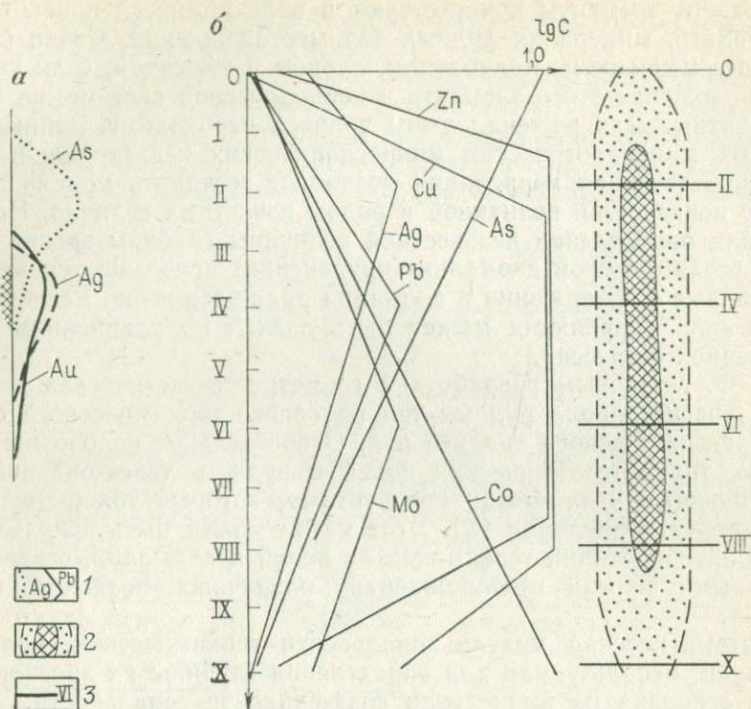


Рис.7. Графики концентрации химических элементов с моделями вертикальной зональности эндогенных геохимических ореолов:

a — по максимуму распределения содержаний (В. В. Поликарпочкин и Л. В. Таусон), *b* — по монотонно изменяющимся содержаниям (А. П. Соловов и А. В. Гаранин). 1 — содержание элементов; 2 — рудное тело и его первичный ореол; 3 — уровни (горизонты) модели оруденения

Наиболее полно вопросы использования математического аппарата для количественного анализа геохимических полей изложены в работе Р. И. Дубова [22]. Он, в частности, отмечает, что «... описание геохимических полей математическими формулами традиционного, классического вида пригодно лишь в относительно простых случаях. Для удовлетворения запросов практики необходимо применение новых способов, относящихся к так называемым численным методам...». К таким способам относится математическое моделирование геохимических полей с помощью одномерных (линейных) и двумерных (круговых) палеток, метода сеток и др.

В целом модели геохимических полей любого типа должны рассматриваться по отношению к объектам, для которых известны или могут быть разработаны геологические модели.

Для конечных объектов поисков — месторождений полезных ископаемых геологические модели отражают их генетические и формационные типы. По отношению к ним и должны интерпретироваться и оцениваться геохимические аномалии по всем качест-

венным и количественным параметрам. Например, по данным Р. Р. Ивлева и др. [17] для молибден-медного штокверка месторождения Актогай построены объемные геохимические модели распределения 16 химических элементов. На базе ЭВМ (БЭСМ-4) была сформирована объемная числовая матрица, которая послужила основой для построения моно- и полиэлементных карт и решения других прогнозных задач.

Как справедливо считают некоторые исследователи [Т. Г. Мулдагалиев и др., 31], если, например, поверхностная геохимическая аномалия соответствует реставрируемой на глубине благоприятной структурно-литологической модели, то такая аномалия является перспективной; аномалия, соответствующая неблагоприятной геологической модели, может быть бесперспективной.

Промежуточные объекты поисков — аномальные геохимические поля различного типа и масштаба могут характеризовать разные объекты — продуктивные, петрогенные, ландшафтные, техногенные. Для аномальных геохимических полей, отнесенных к категории продуктивных, необходимо разрабатывать геологические модели, соответствующие перспективным районам, зонам, структурам. Петрогенные аномальные геохимические поля интерпретируются по геологическим моделям интрузивов, толщам или горизонтам вулканогенных, осадочных или метаморфических пород. Ландшафтные аномальные геохимические поля интерпретируются и оцениваются с учетом типов геохимических барьеров.

КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Геохимические методы, предназначенные для изучения и оценки геохимических полей и аномалий, включают следующие основные операции: отбор, обработку и анализ геохимических проб, выбор элементов-индикаторов, статистическую обработку результатов анализов, графическое изображение результатов, интерпретацию геохимических полей и аномалий.

По условиям отбора геохимических проб или получения результатов анализов геохимические методы могут быть подразделены на три группы: дистанционные, контактные, контактно-дистанционные.

В соответствии с общей классификацией поисковых методов [5] основные группы геохимических методов могут быть объединены в четыре больших класса: космические, воздушные (аэрометоды), наземные и подводные. В каждом классе и группе геохимических методов выделяются их разновидности по типу изучаемых геохимических полей (табл. 6).

В основе применяемых и разрабатываемых геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых лежат свойства атомов химических элементов, а также возможности способов анализа геохимических проб или технических систем измерения параметров геохимического поля.

Классификация геохимических методов

Группа методов	Класс методов			
	Космические	Воздушные (аэрометоды)	Наземные	Подводные
Дистанционные	Космоспектрозональные	Аэроспектрозональные, аэrorадиометрические (аэрогаммаметрические и аэрогаммаспектрометрические), аэроатмохимические, аэрозольные		
Контактные	Космолитохимические		Литохимические, гидрохимические, биогеохимические, атомохимические, радиогеохимические (гаммаметрические, гаммаспектрометрические), ядерногеохимические	Литохимические
Контактно-дистанционные	Космоядерногеохимические		Ядерногеохимические	Ядерногеохимические

Дистанционные геохимические методы поисков

Дистанционные методы, в основу которых положены измерения параметров геохимических полей на определенной дистанции от изучаемых объектов, могут быть подразделены на космические и воздушные (аэрометоды). Главная цель тех и других методов — изучение планетарных и региональных геохимических полей и выделение на их фоне такого же масштаба аномалий в пределах провинций и районов развития полезных ископаемых.

Космические геохимические методы. В настоящее время определяются пути развития геохимических исследований из космоса. Предварительно в этот класс геохимических методов могут быть включены спектрозональные съемки поверхности Земли, осуществляемые с космических кораблей типа «Салют» и «Союз».

Сопоставление космических снимков позволяет выделять поля развития растительности определенного типа в связи с особенностями водонасыщенности почв и рыхлых отложений и в зависимо-

сти от концентрации химических элементов в исходных горных породах.

Намечаются пути геохимической интерпретации планетарных и региональных полей распространения определенных типов геологических образований и связанных с ними полезных ископаемых. Контрольные спектрозональные снимки, выполненные с самолетов, служат для интерпретации результатов космической съемки и дальнейшего ее развития.

В ряде американских работ по изображениям со спутника «Ландсат» предприняты попытки проследить связь между рудными месторождениями и характерным фототонном поверхности, выявленным визуально или методом усиления с помощью электронно-вычислительной техники. При изучении железорудных месторождений (шт. Вайоминг) был опробован метод отражения, который заключается в сопоставлении яркости отражения, получаемой от различных объектов в разных полосах спектра. Значительная спектральная разница между богатыми и бедными железом породами, хорошо выявляющаяся на космических снимках, позволила провести исследования для обнаружения богатых железом зон в штатах Калифорния и Невада. Интересные результаты использования космических снимков получены при изучении известного медно-порфинового месторождения Сайндак в Пакистане и при прогнозировании подобных месторождений на соседних территориях.

Аэрогеохимические методы. В классе этих методов, кроме спектрозональной аэрофотосъемки, выделяются методы, дистанционно фиксирующие аномалии химических элементов, обладающих высокой радиоактивностью или повышенной летучестью. С помощью этих методов можно изучать геохимические поля регионального и локального типов.

Аэрогаммаспектрометрический метод (АГСМ) основан на измерении не только суммарной естественной радиоактивности геологических объектов, но и отдельных составляющих (уран, торий, калий). Отчетливая естественная радиоактивность проявляется только для тех элементов, которые обладают очень высоким избытком нейтронов в ядре (уран, торий). Калий относится к элементам с повышенным избытком нейтронов среди порообразующих элементов. Так как этот элемент высококларковый, то он относится к элементам, обладающим заметной естественной радиоактивностью. Особенно отчетливо это фиксируется в метасоматитах, содержащих в значительных количествах калиевые минералы. Например, по данным [36], в кварц-адуляр-серпичитовых метасоматитах содержание калия достигает 6—8 % при фоне 2—3 % во вмещающих кислых эффузивах.

Таким образом, в настоящее время пока только три химических элемента (уран, торий, калий) создают отчетливые радиогеохимические аномалии, которые можно выявлять при благоприятных условиях дистанционными методами. К ним относится АГСМ, с помощью которого изучают радиогеохимические поля

этих элементов в суммарном или отдельном вариантах [7]. Отчетливые аэрогадогеохимические аномалии фиксируются в полуметровом слое коренных пород при мощности рыхлых отложений не больше 2—3 м.

На основе радиогеохимических особенностей В. П. Воробьев и др. [7] разработали группировку рудных формаций, которые могут быть выявлены при использовании АГСМ. Обобщая приведенные в этой группировке данные, можно наметить две группы формаций, различающихся между собой по соотношению главных компонентов: 1) эндогенную группу, включающую грейзеновые и карбонатитовые месторождения тантала, ниобия, бериллия, вольфрама, молибдена, олова, редких земель — с $\text{Th}:\text{U} > 5$ и гидротермальные месторождения золота, серебра, меди, свинца и цинка с $\text{K}:\text{Th} > 1$; 2) экзогенную группу, включающую месторождения бокситов с $\text{Th}:\text{K} > 5$, и месторождения фосфоритов с $\text{U}:\text{Th} > 1$.

Для измерения параметров аэрогадогеохимических полей применяются аэрогаммаспектрометры, предварительная интерпретация результатов определений которых производится автоматически на бортовых устройствах [7].

Особенности применения АГСМ при поисках месторождений некоторых видов полезных ископаемых показаны на рис. 8.

Аэроатмогеохимическая ртутная съемка, выполняемая пока в экспериментальных вариантах, относится к дистанционным геохимическим методам поисков не только ртутных, но и месторождений других видов полезных ископаемых, содержащих ртуть. По данным Б. П. Абрамовского и др., подобная аэросъемка велась с помощью атомно-абсорбционного газоанализатора ИМГРЭ-4, установленного на самолете ИЛ-14. Накопление ртути осуществлялось из струи воздуха на золотом струнном сорбенте. Порог чувствительности — 10^{-10} г/м³ при расходе воздуха 100 л и времени накопления 6 мин. Высота полета 100—200 м. При обнаружении аномальных зон они детализировались дополнительными полетными маршрутами поперек направления ветра. Аномалии над рудопроявлениями ртути $3 \cdot 10^{-7}$ г/см³ при фоне $(1-4) \cdot 10^{-9}$ г/м³. Полученные результаты показывают, что уже в настоящее время возможно проведение самолетных геолого-геохимических исследований поискового направления. Однако при этом необходимо учитывать изменчивую характеристику аномалий паров ртути в зависимости от типа объекта поисков и др.

Аэрозольный геохимический метод, предложенный в 1960 г. О. Вейссом [18], основан на открытии факта присутствия в воздухе мельчайших частиц обнажающихся на земной поверхности минерализованных горных пород. Эти частицы образуют аэрозоли, в которых чувствительным анализом удается определить элементы, содержащиеся в составе полезных ископаемых. Отбор аэрозольных проб производится с самолета с помощью специальных пробоотборников, представляющих собой рамку из алюминиевых труб, на которые наматываются нейлоновые ни-

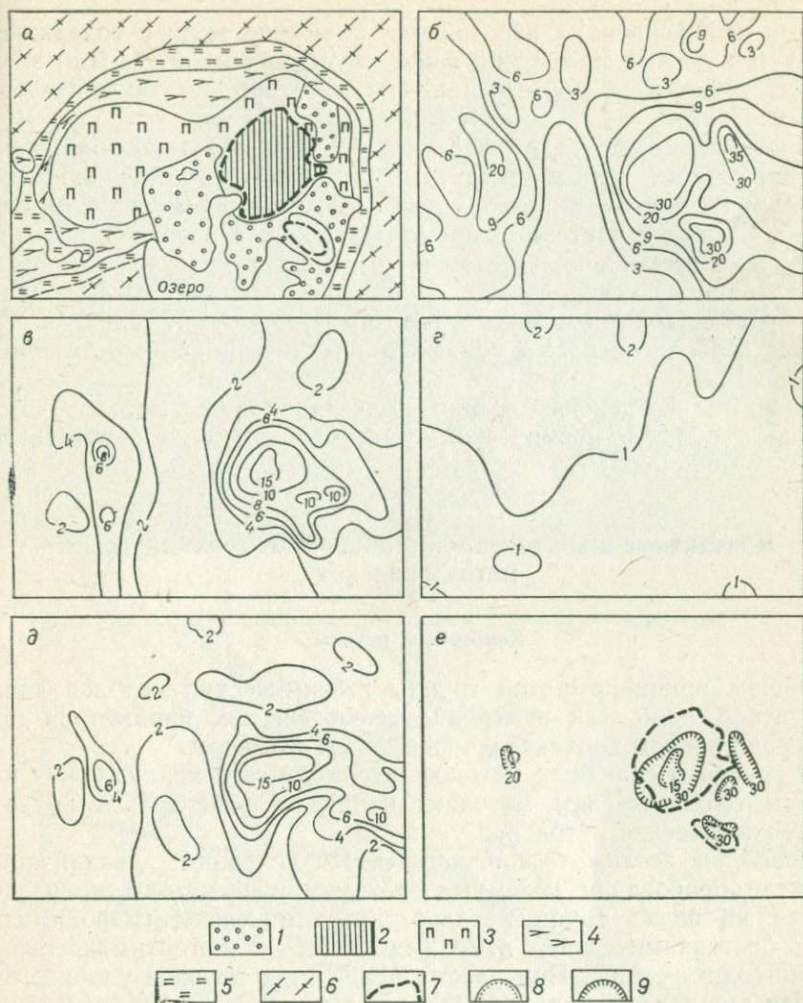


Рис. 8. Характер регистрации карбонатитового редкометалльного месторождения аэрогаммаспектротометрической съемкой [7].

Карты: а — геологическая; б — содержания Th 10^{-4} %; в — содержания U, 10^{-4} %; з — содержания K, %; д — гамма-поля, мкР/ч; е — интерпретационная.
 1 — четвертичные отложения; 2 — карбонаты и апатит-форстерит-магнетитовые породы; 3 — пироксениты; 4 — амфиболы и мелтегиты; 5 — фенитизированные гнейсы; 6 — гранито-гнейсы; 7 — контуры месторождения; участки с максимальным содержанием полезного ископаемого: 8 — уран, 10^{-4} %, 9 — торий, 10^{-4} %

ти. Рамки соединяются в пакеты, подвешиваемые под самолетом на буксирных лесках на высоте около 100 м. При скорости полета 160—320 км/ч полимерные нейлоновые нити в струе воздуха становятся электростатическими, способными удерживать аэрозоли на своей поверхности. После полетов рамки-пробоотборники передаются для спектрального анализа. Над медными руд-

никами зафиксирована аэрозольная аномалия меди с содержанием от 100 до 400 млн.⁻¹ при фоне от 16 до 85 мин.⁻¹. Для этого метода существует много ограничений, которые связаны с метеорологическими условиями проведения съемок и др.

Дистанционные геохимические методы обладают большими преимуществами перед контактными методами в отношении изучения планетарных и региональных геохимических полей и аномалий. Однако в настоящее время для поисков полезных ископаемых практически используется один из этих методов — аэрогаммаспектрометрическая съемка. В целом благоприятны возможности аэроатмогеохимического метода по парам ртути и других элементов, особенно в новых модификациях дистанционных лазерных методов [34].

Главные перспективы развития дистанционных методов намечаются в области космической спектрозональной и аэроспектрозональной съемок.

Контактные и контактно-дистанционные геохимические методы поисков

Контактные методы

Общим принципом этой группы геохимических методов является отбор проб или измерение геохимических параметров при непосредственном контакте с опробуемым объектом.

В группе контактных методов ведущее место принадлежит наземным геохимическим методам; начинают развиваться подводные геохимические методы.

Наземные геохимические методы. По условиям локализации объекта опробования наземные геохимические методы подразделяются на шесть групп методов: литохимические, гидрохимические, биогеохимические, атмохимические, радиогеохимические и ядерногеохимические. При рассмотрении этих методов удобнее будет для каждого из них описать способы отбора и обработки проб или способы измерения геохимических параметров. Анализы геохимических проб, обработку результатов анализов и графическое оформление рационально изложить одновременно для всех методов.

Литохимические методы поисков. В зависимости от геологического строения, стадии поисков, ландшафтных условий выделяются следующие виды литохимического опробования: литохимическое опробование рыхлых отложений — донное, склоновое и глубинное; литохимическое опробование коренных пород — поверхностное и глубинное.

Донное литохимическое опробование применяется для изучения и оконтуривания аномалий, локализующихся вдоль узких современных или древних водотоков. В связи с этим сам метод поисков получил название литохимических поисков по потокам рассеяния [25]. Пробы отбираются из донных отложений

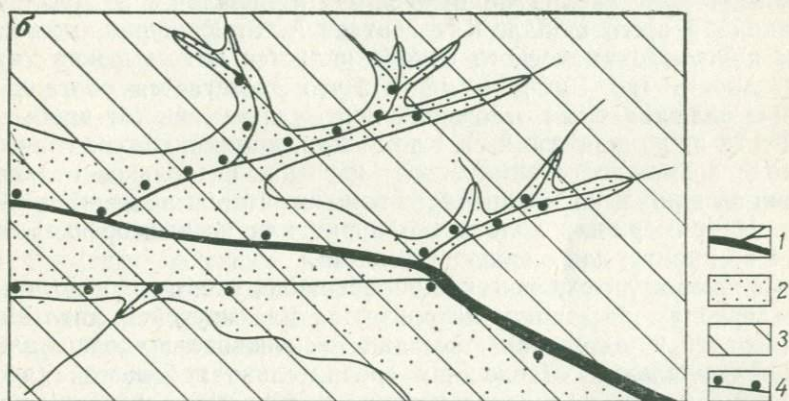


Рис. 9. Литохимическое опробование аллювиальных отложений в горном районе. *а* — долина реки с притоками, *б* — схема сети литохимического опробования «по потокам рассеяния». 1 — современные водотоки, 2 — аллювиальные отложения («потоки»), 3 — склоновые отложения и коренные породы, 4 — места отбора литохимических донных и шлиховых проб

современных водотоков или из отложений пересохших русел (рис. 9).

Масса пробы может колебаться от 25—50 до 100—300 г (в золоторудных районах). После ситования на базе партии масса больших проб сокращается до 100 г. Отбор пробы производится простейшими инструментами — лопатами, ложками и совками. В пробу отбирается илесто-глинистая фракция аллювиальных отложений, сорбирующая значительную часть ионов и коллоидных

частиц многих химических элементов. Для некоторых элементов, например для золота, следует учитывать возможность их концентрации в песчаной фракции. По данным П. Н. Кошмана и П. Н. Югай, в некоторых районах золоторудных месторождений установлены следующие особенности. Наличие золота в донных осадках зависит не от сорбирующей способности илистого (глинистого) и органического вещества, а от количества мелких частиц свободного золота. Это доказывается тем, что в песчанистой фракции содержится золота больше (от 0,3—0,6 до 1—5 г/т), чем в песчано-илистой фракции (0,02—0,05 г/т). Оптимальным для опробования считается мелкозернистый песок размером 0,25—0,5 мм. Некоторые исследователи считают, что следует использовать так называемый шлихо-геохимический метод, при котором осуществляется промывка шлиховых проб из песчаных фракций. Обычно промывают два стандартных лотка вместимостью по 0,02 м³. В некоторых случаях при малом количестве тяжелой фракции промывается по 5—10 лотков. После промывки легкая фракция отделяется в бромформе; тяжелый остаток разделяется на магнитную, неэлектромагнитную и электромагнитную фракции. При массовых шлихо-геохимических поисках производится геохимический анализ не отдельных минералов, а различных фракций и всего шлиха. Как считает А. В. Кастерин, достоинством шлихо-геохимического метода является его высокая чувствительность (до 10⁻⁷% и менее), что достигается обогащением пробы аллювиальных отложений при ее промывке (от пробы массой в 32 кг до шлиха в 2 г). Кроме того, при шлихо-геохимическом методе возможно геохимическое изучение не только отдельных фракций шлиха, но и минералов-концентраторов полезных элементов. Например, для золота это пирит или псевдоморфозы лимонита по пириту, для олова — турмалин.

Склоновое литохимическое опробование, т. е. поиски по вторичным ореолам рассеяния, используется для изучения литохимических полей и выделения аномалий в элювиально-делювиальных и пролювиальных отложениях сравнительно небольшой (до 2—3 м) мощности. Для таких условий практически доказано проявление геохимических аномалий на поверхности или непосредственно под почвенным слоем.

На склонах, закрытых глыбовым элювио-делювием (курумик), литохимические пробы отбираются из мелкозернистой фракции отложений (мелкозем) между глыбами и обломками («суффозионные ореолы», по Тайсаеву [14]). На склонах с элювиально-делювиальными отложениями, представленными суглинком, пробы отбираются из представительного горизонта с глубины 30—40 см. При этом следует учитывать возможное перемещение геохимических аномалий вниз по склону [39]. Пробы отбираются лопатами, кайлами, ледорубами, пробоотборниками. Масса пробы 25—50 г, в районах развития золоторудных месторождений она увеличивается от 100 до 300 г.

Глубинное литохимическое опробование рыхлых отложений

проводится на значительной глубине от поверхности, обычно в нижней части рыхлых отложений, где наиболее отчетливо фиксируются геохимические аномалии, связанные с коренными породами. Опробование рекомендуется осуществлять в нижних частях склонов долин при мощности рыхлых отложений свыше 2—3 м, в широких пойменных частях речных долин, в предгорных впадинах и других депрессионных структурах, заполненных рыхлыми несцементированными или слабо сцементированными отложениями, мощность которых достигает 10—20 м и более. К комплексу опробуемых отложений должны быть отнесены глинисто-щебенистые образования коры выветривания коренных пород, также являющиеся представительными горизонтами для литохимического опробования. Для глубинного литохимического опробования применяется специальное бурение или используются скважины геологического картирования и другого назначения.

По данным Б. П. Алексеева, в закрытых районах Южного Урала глубинные геохимические поиски проводятся при помощи шнекового (85—90 %) и специального колонкового (10—15 %) бурения. Для отбора проб шнеками скважины забуриваются в представительный горизонт глинисто-щебенистой коры выветривания; при колонковом бурении — на 5—10 м в коренные породы. Проба отбирается по керну или шламу. Масса пробы 100—150 г. На площадях, неблагоприятных для глубинных литохимических поисков, где в составе рыхлых отложений преобладают гравийно-галечниковые или валунно-галечниковые образования, рекомендуется отбор шлихо-геохимических проб по железо-марганцевым стяжениям из водоносных горизонтов рыхлых отложений.

Обработка литохимических проб из рыхлых отложений заключается в сушке и ситовании (0,25—0,5 мм) на базе партии. Может применяться также мокрое ситование, при котором проба смывается на сите водой в мешочек и мокрой отправляется в лабораторию. Лабораторная проба после сушки проверяется на кап-паметре (определяется магнитная восприимчивость) и на приборе «Ореол» (определяется радиоактивность). Затем часть пробы измельчается (0,1—0,07 мм) и сокращается для отбора навесок на анализ.

Литохимическое опробование коренных пород («литохимический метод поисков по первичным ореолам» [25]) выполняется для изучения первичных эндогенных, экзогенных и метаморфогенных геохимических полей и выявления аномалий, связанных с полезными ископаемыми, а также для расчленения и корреляции отдельных комплексов осадочных, вулканогенных, интрузивных и метаморфических образований.

Поверхностное литохимическое опробование коренных пород, нередко называемое сколковым опробованием коренных пород, выполняется на естественных обнажениях и в поверхностных неглубоких выработках — канавах, расчистках, шурфах.

Как рекомендуется в Инструкции [25], отбор проб производится методом пунктирной борозды путем точечной отбойки 5—

6 мелких кусочков (сколков) размером 3—4 см примерно через одинаковые расстояния (0,5—2 м) друг от друга. Кусочки объединяются в одну пробу массой 150—200 г. Каждая проба должна характеризовать отдельную разновидность пород. В случае необходимости получения шлиха масса пробы увеличивается до 0,5—1 кг. Особое внимание обращается на опробование зон измененных пород и тектонических разрывных нарушений, даек интрузивных пород. Особое внимание рекомендуется уделять опробованию корок гидроокислов железа в зонах разрывных нарушений (Т. Т. Тайсаев [14]).

Глубинное литохимическое опробование коренных пород выполняется по керну буровых скважин и в подземных горных выработках с целью изучения геохимических полей и аномалий, фиксируемых на определенной глубине от поверхности, в толще коренных образований. Методика опробования определяется стадией и задачами работ.

На I стадии глубинное литохимическое опробование коренных пород в закрытых районах проводится в процессе глубинного геологического картирования. Пример глубинного литогеохимического опробования керна картировочных скважин приводится по данным Н. И. Резникова.

Скважинами были вскрыты докембрийские образования, погребенные под покровым рыхлых четвертичных отложений мощностью от 20 до 50 м и более. Геохимические исследования предусматривали решение двух задач: изучение геохимической характеристики докембрийских образований и оценку перспектив рудоносности картируемой площади. Первая задача решалась путем отбора пунктирной бороздовой пробы по керну определенных разновидностей пород. Для получения необходимого числа проб по каждой разновидности выбирался интервал опробования, в соответствии со следующим расчетом: $30 = L/l$, где 30 — минимальное число проб, необходимое для геохимической характеристики пород; L — вскрытая мощность (по всем разрезам) опробуемой разновидности; l — выбранный интервал опробования керна для всех скважин, вскрывающих эту разновидность.

Для решения второй задачи проводилось опробование потенциально рудоносных образований: зон разломов, зон гидротермально измененных пород, эндо- и экзоконтактовых зон интрузивных тел. Участки разреза, вскрывающие эти образования, опробовались по всему интервалу 3—5 геохимическими пробами. Пробы отбирались также пунктирной бороздой, масса пробы 150—200 г. Измельчение пробы — до 1 мм, после квартовки до 50 г, истирание до 200 меш.

На II стадии собственно поисковых работ глубинное литохимическое опробование коренных пород выполняется главным образом по керну поисковых и поисково-оценочных скважин. Интервалы отбора пунктирных проб принимаются в зависимости от опробуемого объекта. Так, глубинное геохимическое опробование в юго-восточной части Зырянского района производилось, по данным В. П. Кауна, следующим образом: по рудным зонам богатого оруденения интервал опробования 1 м, по бедным вкрапленным зонам 2—5 м, по петрографическим разностям пород при больших мощностях однотипных пород 5—10 м.

На III—IV стадиях разведочных работ глубинное литохимическое опробование коренных пород осуществляется по керну

скважин и подземных горных выработок. Методика опробования керна аналогична вышеописанной. Литохимическое опробование подземных горных выработок рекомендуется производить пунктирной бороздой, ориентированной вкрест простирания рудных тел (зон). Интервал опробования выбирается в зависимости от конкретных геологических условий 1, 5 или 10 м. Объединенная проба с интервала состоит из 5—6 кусков (сколков) размером 3—4 см². Масса объединенной пробы не более 150—200 г, для определения золота — до 500 г.

Для выяснения вопроса об ассоциациях химических элементов в рудном теле (зоне), которые могут иметь место в геохимическом ореоле, рекомендуется использовать дубликаты бороздовых (рудных) проб, взятых в забоях при проходке горных выработок по простиранию рудных тел.

Обработка литохимических проб коренных пород заключается в предварительном их дроблении до 1 мм, а затем в истирании сокращенной части пробы до 0,1—0,07 мм. Рационализировать геохимическое опробование керна коренных пород из картировочных, поисковых, разведочных и эксплуатационных скважин можно путем применения способов, разработанных в Свердловском горном институте. Здесь Н. Н. Дерябин изготовил портативный станок для отбора геохимических проб путем выпиливания в керне борозды (глубина 1 мм) при воздушном охлаждении породообразующего инструмента и одновременном сборе пылесосом материала распила в качестве пробы. Породообразующий инструмент — отрезной круг с зернами карбида кремния на бакелитовой связке, продуктами разрушения которого являются «нейтральные» для пробы элементы Si, C, H. Минимальная масса пробы равна массе пробы для спектрального анализа.

Гидрохимические методы поисков применяются для выявления и оконтуривания геохимических аномалий в водах — поверхностных и подземных. Объектами гидрохимического опробования могут быть: поверхностные воды рек, ручьев, болот и озер, подземные воды источников, колодцев, шурфов, скважин. В районах со слабо развитой гидросетью иногда опробуются талые воды, березовый сок; в северных районах — наледи. Однако главными объектами опробования являются поверхностные воды и подземные воды источников для изучения региональных гидрохимических полей и аномалий, связанных с полезными ископаемыми, а также подземные воды скважин при поисках скрытых месторождений или тел полезных ископаемых.

Для отбора гидрохимических проб характерны определенные особенности в зависимости от дальнейшей их обработки. Пробы для анализа в полевых условиях отбираются объемом от 10—100 мл до 0,5 л и помещаются в специальные сосуды (пробирки, цилиндры и др.); пробы для концентрирования сухого остатка на месте отбора — 0,5—1,0 л. Такой же объем необходим для проб, предназначенных для транспортировки в стационарные лаборатории, где выполняется полный анализ воды. Эти пробы отбирают

ся в полиэтиленовую или стеклянную посуду. Из буровых скважин гидрохимические пробы отбираются специальными пробоотборниками объемом 0,5—1,0 л.

Опыт использования гидрохимического метода поисков показывает, что он приобретает большое практическое значение при соблюдении следующих условий: основная часть проб обрабатывается и подготавливается к анализу на месте отбора проб в полевых гидрохимических лабораториях типа МЛАВ, ПЛАВ, «Комар-2»; в полевых лабораториях выполняются общие наиболее простые анализы проб на некоторые макрокомпоненты (SO_4^{2-} , HCO_3^- и др.) и сумму некоторых макрокомпонентов (Cu, Pb, Zn); в стационарные лаборатории направляются только сухие остатки или концентраты, а также пробы воды для полного химического анализа ее.

Биогеохимический метод поисков подразделяется на собственно биогеохимический (фитогеохимический) и геоботанический.

Фитогеохимический метод основан на изучении геохимических полей в растительном покрове и выделении на их фоне аномалий, связанных с полезными ископаемыми. Сущность фитогеохимического метода заключается в отборе проб растительности — травяной или древесной, озоления проб путем сжигания, анализе золы, выявлении аномалий полезных и сопутствующих элементов в растительном покрове. Этот метод еще широко не распространен и до сих пор применяется как экспериментальный, так как имеет следующие недостатки: сложность отбора и обработки проб, потеря некоторых элементов при сжигании проб, зависимость результатов анализов от вида растительности и времени года. Однако в связи с развитием спектрональной космической и воздушной съемок, материалы которых, как указывалось, могут рассматриваться и с геохимических позиций, фитогеохимический метод вызывает определенный интерес. Значение его может особенно возрасти при комплексировании с геоботаническим методом, который основан на изучении ареалов (полей) развития растительных сообществ или отдельных видов растений с выделением аномалий, имеющих отношение к проявлениям полезных ископаемых. Например, в США [9] было обнаружено различие спектров отражения некоторых видов деревьев, растущих на площадях с нормальным геохимическим фоном и в контурах весьма контрастных почвенных аномалий меди и молибдена. Отмечены также аномалии специфических ассоциаций деревьев на площадях развития медно-порфириновых руд в области влажных труднопроходимых джунглей.

Поскольку эти особенности растительного покрова фиксируются на спектрональных космо- и аэроснимках, намечаются перспективы развития контактных фитогеохимических и геоботанических методов как методов геохимического обоснования и контроля интерпретации материалов дистанционных спектрональных

съемок. Следовательно, выполнение фитогеохимического и геоботанического методов должно планироваться на опорных площадях и участках, выделенных предварительно на спектрозональных снимках.

Методика фитогеохимического опробования подробно описана в ряде работ. Как рекомендует А. Л. Ковалевский [27], для получения навески золы в 0,2—0,5 г проба ветвей дерева должна быть не менее 50—100 г; проба коры, листьев, зеленых побегов и травянистых растений — около 50 г. Пробы отбираются с помощью ножей, садовых ножниц, сучкорезов. Для сжигания (озоления) проб в полевых условиях применяются различные сосуды: перфорированные металлические цилиндры, вставляемые в гнезда железной печи или подвешиваемые над костром, перфорированные озолители для сжигания в пламени паяльной лампы, металлические коробки медицинских стерилизаторов. А. Л. Ковалевский рекомендует отбирать фитогеохимические пробы коры путем высверливания «таблеток», удобных для транспортировки без предварительного озоления.

Геоботанический метод предусматривает специальное картирование по растениям-индикаторам, концентрирующим определенные химические элементы, а также по ареалам развития растительных ассоциаций, произрастающих на площадях распространения различных типов горных пород, в зонах тектонических нарушений, на участках проявлений полезных ископаемых.

Атмохимические методы поисков применяются для изучения и оконтуривания геохимических полей газовых компонентов и паров элементов в подпочвенном воздухе и подземных водах с целью выявления атмохимических аномалий, связанных с полезными ископаемыми.

По поисковому значению выделяются атмохимические методы косвенные и прямые. Косвенными методами, к которым относится газовая съемка, фиксируются поля и аномалии газовых компонентов, которые являются предпосылками поискового прогнозирования (углекислый газ, водород, метан, азот, сероводород, сернистый газ, гелий, аргон, радон). Аномалии этих газов, контролируя тектонически проницаемые зоны в земной коре, могут быть связаны с месторождениями различных полезных ископаемых.

Газовая съемка в поверхностном варианте ведется путем отбора проб подпочвенного воздуха из неглубоких (до 1,5 м) скважин, пробуренных мотобуром М-1 малым диаметром (62—64 мм). Пробы отбираются газоотборником, присоединенным к насосу Шинца и газоанализатору [47]. Газокерновая съемка проводится на участках с сильно увлажненными рыхлыми отложениями. Пробы воды для анализа газовых компонентов отбираются в плоские медицинские грелки (вместимостью 2—2,5 л), снабженные патрубками. Водно-гелиевая съемка осуществляется путем отбора воды из источников и скважин. Пробы сливаются в стеклянные бутылки вместимостью 0,33 л через резиновый шланг, опущенный до дна бутылки. Пробы могут храниться в лаборатории до анализа

не более 1—2 месяцев. Полевой анализ проб производится в специальных газоанализаторах системы ИНГЕМ-1.

Прямым атмохимическим методом выявляются аномалии паров некоторых химических элементов, являющиеся поисковым признаком на определенные полезные ископаемые. В настоящее время используются пары ртути, что и обусловило название этого метода — газортутная съемка. Она может использоваться для поисков месторождений ртути, а также месторождений тех полезных ископаемых, в которых ртуть является спутником основных полезных компонентов. Газортутная съемка выполняется с помощью пешеходного или автомобильного атомно-абсорбционного газоанализатора [48].

Один из таких приборов ИМГРЭ-4 включает: шнековый зонд с золотым сорбентом для поглощения паров, ртути, ручной насос из комплекта эманометра ЭМ-2, атомно-абсорбционный газоанализатор. Шнек погружается на глубину 0,3—0,4 м, насосом откачивается подпочвенный воздух, проходящий через золотой сорбент. В газоанализаторе сорбент отжигается для перевода ртути в пары, затем определяется содержание ртути, время измерения 3—4 мин.

Радиогеохимические методы в наземных вариантах позволяют фиксировать естественную радиоактивность геологических объектов, которая с геохимических позиций отражает наличие и относительные содержания в них радиоактивных изотопов трех главных элементов — урана, тория и калия. При суммарном определении концентраций этих элементов, т. е. при определении так называемой общей радиоактивности, используется обычная наземная гаммасъемка, выполняемая с помощью радиометров различных конструкций. При раздельном определении урана, тория и калия выполняется наземная гаммаспектрометрическая съемка специальными радиометрами. Ядернофизические (геохимические) методы будут рассмотрены в следующей главе, так как главное в их осуществлении — это анализ геохимических проб.

Подводные геохимические методы. В связи с расширением поисковых работ на акваториях морей и океанов возникла необходимость в использовании подводных геохимических методов. Некоторые виды полезных ископаемых могут быть обнаружены в прибрежных зонах или в глубинных зонах акваторий — олово, золото, минералы титана, циркон, монацит, сера, фосфориты, а также кобальт, никель и медь в железо-марганцевых конкрециях.

В 1969 г. Холмсом были опубликованы примеры геохимических карт, очерчивающих процент свободного титана в пробах со дна Мексиканского залива, глубина отбора проб по донным отложениям в среднем 10 см [18]. Подобная же карта составлена для циркония. В северной части Мексиканского залива с площади 275 000 км² было взято 1400 проб. На побережье Южной Каролины с площади 640 км² отбиралась одна проба на 10—25 км². Опыт литохимического опробования прибрежно-морских россыпей описан и для некоторых районов Советского Союза.

Техника отбора геохимических проб из рыхлых отложений морского дна определяется применяемыми техническими средствами: из керна буровых скважин, из рыхлого материала, подаваемого на корабль драгами, желонками и другими приборами. Контактные геохимические исследования донных отложений с помощью ядернофизических приборов могут быть выполнены на подводных аппаратах.

Контактно-дистанционные методы

Основным принципом этих методов является получение данных анализа на определенной дистанции от прибора-анализатора, контактирующего с объектом изучения. В эту группу методов могут быть включены радиогеохимические и ядерногеохимические методы, используемые для геохимического каротажа скважин, а также для опробования донных отложений, скрытых под водами озер, морей и океанов. К этой же группе должны быть отнесены космические геохимические методы изучения планет.

Применение контактно-дистанционной наземной гаммаспектрометрической съемки для оконтуривания рудных зон описано Ф. П. Кренделевым и др.

Исследования выполнены с помощью передвижной гаммаспектрометрической станции, в комплект которой входят сцинтилляционный датчик с кристаллом NaI (Tl) размером 70×80 мм и трехканальный анализатор. Связь датчика с анализатором осуществляется высокочастотным кабелем РК=50, длина которого позволяет производить измерения на удалении до 1 м от автомашины. Пороги чувствительности полевых измерений при экспозиции 5 мин составили: U (по Ra) — $0,3 \cdot 10^{-4}$ %, Th — $0,4 \cdot 10^{-4}$ %, K — 0,04 %.

Анализы геохимических проб

Содержания химических элементов в объектах геохимических поисков определяются анализом отобранных проб или без их отбора непосредственно в естественном залегании объекта. Анализ геохимических проб производится частично в полевых условиях и главным образом в стационарных лабораториях. Анализы геохимических проб весьма разнообразны: спектральный эмиссионный анализ обычный или с предварительной подготовкой (обогащением) проб, атомно-абсорбционный, пламеннофотометрический, химический, колориметрический, хроматографический, радиометрический, ядернофизический, анализ газовых компонентов, пробирный.

Разработка отдельных видов анализов производится на основе параметров и свойств химических элементов. Содержания многих элементов семейства s-литофилов, характеризующихся низкими потенциалами возбуждения, определяются способом пламенной эмиссионной фотометрии, использующей относительно низкие температуры пламени ($1700-2200-3050$ °C). При определении в пробах присутствия и содержания элементов d-литофилов требуется применение спектрального эмиссионного анализа, который основан на ионизации атомов в высокотемпературной плазме дуги

угольных электродов (температура около 3800 °С). Определение содержаний элементов с низкими кларками (например, золота, платиноидов) требует предварительного обогащения проб (химико-спектральный анализ) или применения пробирного анализа, основанного на плавке проб (пиromеталлургический анализ). Раздельное определение химических элементов с близкими радиусами ионов (например, лантаноиды) выполняется специальными методами, в то время как обычным спектральным анализом геохимических проб удается определить только лантан, церий и иттербий. Сложным при анализе является определение содержаний в геохимических пробах многих элементов семейств *p* (хлор, бром, иод, сера, фосфор, фтор, бор). Эти элементы в большинстве случаев определяются химическими методами.

Бурно развивающиеся способы ядернофизического анализа, основанного на измерении характеристик ионизирующих излучений, возникающих под воздействием внешних источников излучения, имеют свои ограничения при применении их к геохимическим поискам. Например, современным прибором «Гагара» определяются содержания элементов, расположенных после элемента с атомным номером 20, т. е. после кальция. Вместе с тем имеются специальные ядернофизические приборы для определения бериллия, бора, алюминия.

В гидрохимических пробах легче определяются содержания отдельных микроэлементов, а их суммарное количество, например, сумма меди, свинца и цинка. Это возможно сделать с помощью колориметрического (дитизионного) анализа.

Анализ атмосферических проб требует использования атомно-абсорбционного способа (пары ртути) или специальных способов определения газовых компонентов (углекислого газа, гелия, сероводорода и др.) в оптических, хроматографических приборах и др.

Имеются различия в применении определенных видов анализов геохимических проб в разных странах, обусловленные историей развития геохимических методов поисков и техническими возможностями. Например, в СССР ведущим видом анализа геохимических проб является спектральный эмиссионный, в США — атомно-абсорбционный.

Рассмотрим некоторые особенности отдельных видов анализа геохимических проб.

Спектральный эмиссионный приближенно-количественный анализ геохимических проб на 40 или 30 элементов может производиться в объеме 10 % от общего числа геохимических проб, анализируемых для данного района, площади, участка. Главная часть проб (90 %) анализируется на 12—16 элементов, которые выбираются с учетом геохимической специализации изучаемых объектов.

Практика геохимического опробования, выполняемого на разных стадиях и подстадиях геологоразведочных работ, показывает, что подобное распределение анализируемых проб вполне достаточно для составления геохимических карт и разрезов, а также

для их геологической интерпретации и оценки; 10 % полных анализов обеспечивают получение детальной характеристики исследуемых объектов. Увеличение числа полных анализов по сравнению с предлагаемым приводит к неоправданным затратам, так как общие объемы геохимического опробования бывают нередко весьма значительными, измеряемыми десятками и сотнями тысяч проб.

Повышение чувствительности спектрального анализа некоторых элементов достигается предварительным химическим или минералогическим обогащением проб. Например, для золота при обычном спектральном анализе чувствительность определения $3 \cdot 10^{-4} \%$, что соответствует 3 г/т, т. е. промышленному содержанию в рудах. В геохимических пробах содержание золота во много раз меньше. Поэтому применяется специальная подготовка проб по методике Н. И. Сафронова: растворение пробы в царской водке при температуре 70—75 °С; фильтрование раствора через активированный уголь; озоление угля в муфельной печи при температуре 500—600 °С; спектральный анализ золы. Такой метод, получивший название спектрозолотометрического, спектрохимического или химико-спектрального, позволяет повысить чувствительность определения золота в геохимических пробах до $3 \cdot 10^{-7} \%$.

Специальные виды спектрального анализа выполняются для повышения чувствительности определения ртути, сурьмы, мышьяка, висмута, фтора. Повышение чувствительности определения некоторых элементов достигается применением и других видов анализа. Например, ртуть определяется на атомно-абсорбционном спектрофотометре РАФ-4 чувствительностью $1 \cdot 10^{-8} \%$; сурьма — нейтронно-активационным методом чувствительностью $5 \cdot 10^{-5} \%$, золото — радиохимическим методом чувствительностью $5 \cdot 10^{-8} \%$; платиноиды — хроматографическим чувствительностью $(1-3) \cdot 10^{-5} \%$.

Определение содержаний в геохимических пробах высококларковых элементов (алюминий, кремний, титан, железо, марганец, магний, кальций) требует «ослабления» проб путем перемешивания их с буфером (угольный порошок особой чистоты), в который введен элемент сравнения. Определение высококларковых элементов в геохимических пробах может применяться при поисках бокситов и некоторых других полезных ископаемых.

Пламеннофотометрический эмиссионный анализ применяется для определения содержания в геохимических пробах следующих элементов семейства s-литофилов (чувствительность в %): Li— $5 \cdot 10^{-5}$, Rb— $1 \cdot 10^{-3}$, Cs— $5 \cdot 10^{-4}$, K— $1 \cdot 10^{-2}$, Na— $1 \cdot 10^{-2}$.

Атомно-абсорбционный спектрофотометрический анализ имеет ряд преимуществ перед спектральным (высокая чувствительность определения некоторых элементов). Вместе с тем он имеет и недостатки: необходимость перевода пробы в раствор, большой набор катодных ламп для определения каждого элемента.

Анализы геохимических проб, выполняемые в полевых условиях. В будущем анализ геохимических проб будет выполняться не-

посредственно на месте наблюдения. В настоящее время в полевых условиях производится анализ геохимических проб в ограниченных масштабах и не во всех организациях одинаково. Литохимические пробы в некоторых экспедициях предварительно анализируются на главные компоненты района (например, медь, свинец, цинк) колориметрическим (дитизионовым) методом. В районах развития стратиформного прожилково-вкрапленного свинцового оруденения может применяться экспресс-анализ геохимических проб или естественных обнажений карбонатных пород микрохимическим способом. Надежной и простой является микрохимическая реакция на фосфор для экспресс-анализа литохимических проб осадочных отложений, перспективных на фосфориты. Люминесцентный анализ на вольфрам, связанный с шеелитом, должен выполняться для литохимических проб в районах развития подобного оруденения с помощью люминескопов типа «Шеелит» или ЛСП-101. С целью повышения концентрации в пробах шеелита применяют промывку проб большой массы (один лоток) и получения шлиха, который просматривается под люминескопом.

Экспресс-анализ на ртуть производится в полевых условиях на приборах РАФ-4 или ИМГРЭ-4.

Ядернофизический анализ литохимических проб начинается постепенно осваиваться и в полевых условиях с применением портативных приборов: РПС4-01 («Гагара»), «Минерал-4», «БРА-6», «Берилл-3», «Нейтрон-2» и др. Рассмотрим некоторые примеры использования ядернофизического анализа при геохимических поисках.

По данным Г. М. Жохова, рентгенорадиометрический метод (РРМ) применялся для выявления и оконтуривания аномалий элементов-спутников золота — мышьяка, сурьмы, серебра и свинца — при поисках золоторудных объектов. Мышьяк определялся на площадях развития проявлений золото-сульфидной формации; сумма металлов — на площадях развития золото-альбит-кварцевой формации. Рентгенорадиометрические измерения, выполнявшиеся на отобранных пробах и непосредственно в коренных породах, основаны на регистрации интенсивностей рентгеновского излучения в диапазоне 9,5—11,5 кэВ при анализе на мышьяк и в диапазоне 8,0—12,5 кэВ при анализе суммы элементов. Анализ производился на одноканальных анализаторах «Минерал-4», «БРА-6», «Гагара». Порог чувствительности измерений мышьяка и суммы сопутствующих золоту элементов в истертых и крупнодробленых пробах не менее 0,006 %, в керне и коренном залегании 0,01 %. Производительность РРМ за 6 ч: истертых и крупнодробленых проб — 200 определений, в коренном залегании — 150. При качественном выделении геохимических ореолов мышьяка или суммы металлов производительность РРМ возрастает в 3—5 раз.

Другой пример касается рентгенорадиометрического метода анализа для прогнозной оценки цезиеносности гранитных пегматитов.

По данным В. В. Гордиенко и др., в качестве минерала-индикатора цезиеносности пегматитов используется калиевый полевой шпат, отражающий геохимическую специализацию пегматитовой системы. Анализ по цезию выполняется на приборе «Гагара», снабженном специальной приставкой для регистрации рентгеновской флуоресценции цезия. В качестве эталонов применяются природные полевые шпаты с различным содержанием цезия (Cs_2O — от 0,08 до 0,4 %).

Бывает два типа эталонов: пластинка-монолит ($10 \times 10 \times 2$ см) и порошок. Для оценки потенциальной цезиеносности пегматитовой провинции или поля опробуются все типы пегматитов, а в пределах каждой жилы — калиевые полевые шпаты. При разведке рекомендуется «прослушивать» калиевые полевые шпаты во всех скважинах и горных выработках. При анализе минерала обеспечивается чувствительность порядка 0,005 % Cs_2O при короткой экспозиции (три измерения по 60 с).

Рентгенорадиометрический каротаж скважин осуществляется с помощью рентгенорадиометрических каротажных анализаторов (РРКА), разработанных В. А. Мейером и др. Нейтронный гамма-каротаж (НГК-С) и селективный гамма-каротаж (ГГК-С) используется для выделения хромитовых руд среди ультраосновных пород (рис. 10). По данным Б. Е. Милецкого и др., ядерно-физический каротаж (ЯФК) скважин позволяет перейти к комби-

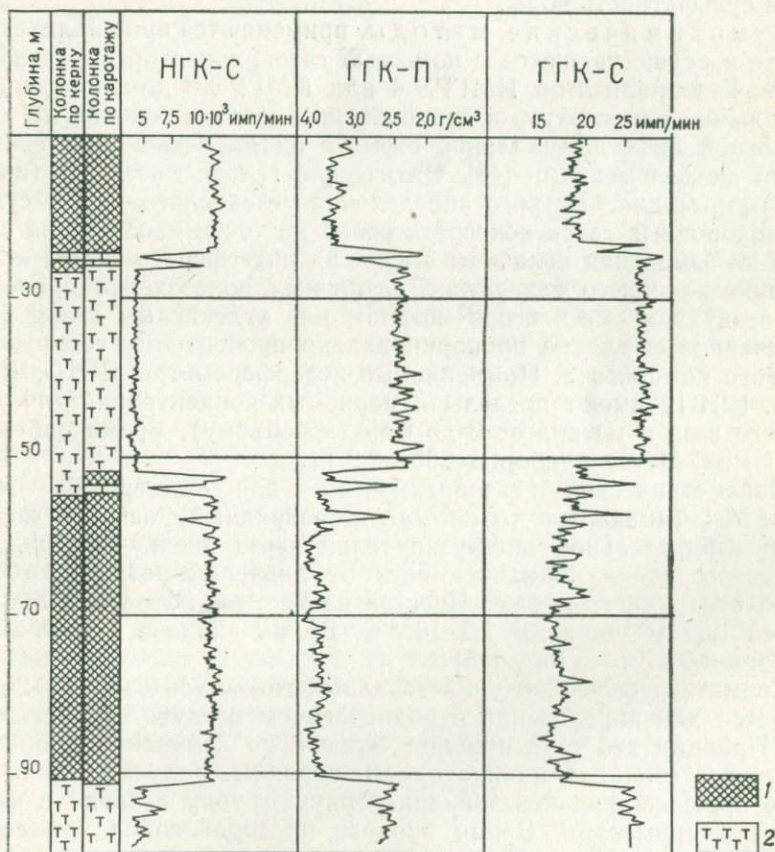


Рис. 10. Выделение и оценка хромитовых руд с помощью ядернофизических методов каротажа. По Б. Е. Милецкому и др.

1 — хромит, 2 — ультраосновные породы

нированному способу поисков глубоких залежей хромитов — бурению сплошным забоем с периодическим отбором керна и проведением ЯФК.

Гидрохимические пробы анализируются в полевых лабораториях, среди которых наиболее простой для полевых поисковых условий является лаборатория «Комар-2» (авторы Б. А. Колотов, В. Г. Малоглавец, В. С. Рынков, И. Ю. Соколов, Н. П. Догадина). Оборудование лаборатории рассчитано на выполнение анализов природных вод непосредственно у водоисточника. При этом могут определяться следующие компоненты: сумма металлов (Cu, Pb, Zn), рН, SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- .

Представляют интерес новые полевые лаборатории, подготавливаемые к производству: маршрутная лаборатория «Родник», помещаемая в рюкзаке (масса 3—4 кг), и лаборатория «Карманная» массой 200—300 г, с помощью которой определяются сумма металлов и сульфатность воды.

Атмохимические методы применяются при анализе проб в поле и осуществляются с помощью газоанализаторов различных типов. Газоанализатор ИМГРЭ-4 или ИМГРЭ-6 для определения содержания паров ртути в подпочвенном воздухе основан на двухканальной дифференциальной схеме с одним источником света и двумя фотоэлементами [48]. Оптические газоанализаторы (интерферометры) для быстрого определения углекислого газа и суммы углеводородных газов непосредственно на точке наблюдения основаны на измерении величины смещения интерференционной картины, происходящего вследствие различных показателей преломления воздуха и смеси его с метаном или углекислым газом [47]. Отмеченное смещение пропорционально процентному содержанию газового компонента. Применяемые интерферометры ШИ-3, ШИ-5, ИГА, ШИ-10 имеют пределы измеряемых концентраций для углекислого газа и метана от 0 до 6% (по объему). Время определения 1 мин. Масса приборов 1,35—2,2 кг.

Ионометрический газоанализатор для измерения гелия ИНГЕМ-1 (индикатор гелия магнитоэлектрический) основан на высокой избирательной диффузии гелия через ячейку-мембрану из кварцевого стекла в зависимости от давления разрядного тока магнитоэлектрического насоса. Чувствительность прибора для газовых смесей $1,5 \cdot 10^{-4}\%$, воды $1,5 \cdot 10^{-6}\%$. Время анализа 1 мин, масса прибора 3,8 кг (без батарей).

Хроматографический универсальный газоанализатор УГ-2 применяется для определения в подпочвенном воздухе сернистых газов. Принцип действия прибора основан на измерении длины окрашенного столбика индикаторного порошка, получаемого в процессе просачивания через индикаторную трубку воздуха с исследуемыми примесями. Время анализа на сероводород или сернистый газ 5 мин. Масса прибора 3,2 кг.

Хроматографические газоанализаторы УХ-1, УХ-2, ЛХМ-7А, ЛХМ-8МД и др. используются для точного определения содержания углеводородных газов и водорода. Чувствительность опреде-

лений колеблется в пределах 10^{-3} — 10^{-5} %. На этих же приборах может определяться и гелий, но с точностью 10^{-3} % [47].

Результаты анализов геохимических проб выписываются в специальные журналы и ведомости. При этом используются различные единицы измерения величин содержаний химических элементов — %, г/т, мкг/т, мг/л и др. (табл. 7).

Таблица 7

Единицы измерения содержаний элементов в геохимических пробах разного типа

Страна	Литохимические единицы				Гидрохимические единицы	Атмохимические единицы
	%	г/т	γ/г	млн. ⁻¹	мг/л	мг/л, мг/кг
СССР	+	+	+	—	+	+
США	—	+	+	+	+	+

Измерение содержаний преобладающего большинства химических элементов в процентах (весовых) в литохимических пробах имеет большое преимущество, так как соответствует единицам измерения кларков, а также единицам измерения промышленных содержаний в телах очень многих видов полезных ископаемых. В таблицах результатов анализа геохимических проб указываются содержания по декадам: n , $n \cdot 10^{-1}$, $n \cdot 10^{-2}$, $n \cdot 10^{-3}$ % и т. д. Содержания драгоценных металлов (золото, серебро, платина, платиноиды) могут приводиться в граммах на тонну, как это принято при выдаче результатов анализов поисковых, разведочных и промышленных проб. Результаты из граммов на тонну можно перевести в процент: $10 \text{ г/т} = 10^{-3}\%$, $1 \text{ г/т} = 10^{-4}\%$, $0,1 \text{ г/т} = 10^{-5}\%$ и т. д. Содержание некоторых редких элементов измеряется в мкг/г, что соответствует $1 \text{ мкг (микрограмм)} = 10^{-6} \text{ г}$. Единицы в частях на миллион переводятся: $1000 \text{ млн}^{-1} = 0,1\%$; $100 \text{ млн}^{-1} = 0,01\%$; $10 \text{ млн}^{-1} = 0,001\%$, $1 \text{ млн}^{-1} = 0,0001\% = 1 \text{ мкг/г}$.

Основная тенденция развития аналитической базы геохимических методов заключается в выполнении анализов проб в полевых условиях на месте геологических наблюдений. В настоящее время это может быть осуществлено только с помощью некоторых видов анализов, чувствительность определений и разрешающие возможности которых, однако, еще недостаточны. Поэтому наряду с развитием указанной тенденции должны сохраняться испытанные временем и практикой те виды анализов, которые выполняются в стационарных лабораториях.

Для достижения наибольшей эффективности геохимических поисков рекомендуется сочетание предварительных полевых анализов геохимических проб, выполняемых с меньшей точностью (или даже на сумму элементов), с основными анализами, производимыми в

стационарных лабораториях. Уменьшения разрыва во времени между отбором проб и их анализом в лабораториях можно достичь улучшением организации работ и получением результатов анализов первых партий проб в процессе полевых исследований.

При сопоставлении проектов на геохимическое опробование следует рационально сочетать получение полных сведений о геохимической характеристике геологических объектов с экономией средств на выполнение исследований.

Выбор элементов-индикаторов для поисков полезных ископаемых

Элементы-индикаторами называются химические элементы или их ассоциации, которые, являясь составными компонентами полезных ископаемых, создают вокруг их залежей геохимические ореолы, имеющие значение признака поискового прогнозирования. Среди них выделяются главные элементы-индикаторы и элементы-спутники (рис. 11). Химические элементы или их ассоциации, выделяющиеся повышенными или пониженными содержаниями в определенных геологических образованиях, позволяющими производить их геохимические сопоставления и корреляцию, называются (по З. А. Яночкиной) элементами-коррелятивами.

Каждый геологический объект, в том числе и месторождение полезного ископаемого, характеризуется определенной ассоциацией элементов-индикаторов (коррелятивов) или, иначе, своим «геохимическим спектром» элементов, как определяет А. П. Соловов. Определить такую ассоциацию относительно просто для известных районов, где ведутся разведочные и эксплуатационные работы на конкретных месторождениях. Значительно труднее это сделать в новых районах или на новых площадях известных районов, где выявляются аномальные геохимические поля сложного состава. Выбор

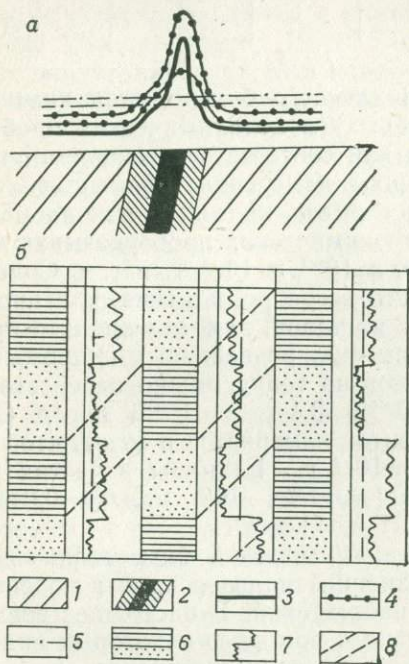


Рис. 11. Схемы отличий элементов-индикаторов (а) от элементов-коррелятивов (б).

1 — вмещающие породы; 2 — рудное тело и первичный геохимический ореол; графики распределения элементов-индикаторов; 3 — главный элемент, 4 — элементы-спутники, 5 — элементы фона; 6 — колонки горных пород; 7 — графики распределения элементов-коррелятивов; 8 — линии сопоставления пород по геохимическим параметрам

элементов-индикаторов связан также с характером применяемых геохимических методов и видом анализа геохимических проб.

При дистанционных методах комплекс определяемых элементов обусловлен возможностями самих методов. Например, при аэрогаммаспектрометрической съемке определяется три элемента: уран, торий, и калий; при аэропарортутной — ртуть. В контактных методах некоторые виды анализов имеют такое же значение (наземные гаммаспектрометрическая и парортутная съемки). При гидрохимических поисках с использованием полевого дитизионового анализа проб предусматривается выявление суммы металлов (медь, свинец, цинк). Атмохимические методы также ориентированы на определение содержаний конкретных газовых компонентов, являющихся индикаторами определенных геологических образований.

Более сложна задача выбора элементов-индикаторов при использовании результатов спектральных, атомоабсорбционных и других видов анализов, при которых определяется значительное число элементов (12—40). В настоящее время определились традиционные и новые направления в решении этой задачи. Традиционные направления включают следующие операции. Вначале производится выбор элементов для дальнейшей обработки («аномальные элементы»), а затем среди них выбираются элементы-индикаторы, связанные с полезными ископаемыми, или элементы-коррелятивы, характерные для конкретных типов коренных пород. В соответствии с рекомендациями Мингео СССР выбор элементов, подлежащих обработке, и выделение индикаторов должны производиться с учетом уровня концентрации элементов в анализируемых объектах, чувствительности применяемых анализов, особенностей распределения элементов в фоновых и аномальных объектах. В обработку включаются химические элементы, если чувствительность анализа обеспечивает получение «значащих» цифр не менее чем в 20 % проб. Выделяются три группы объектов по сложности геохимического строения: 1) территории (объекты) простого строения, геохимически однородные (1—3 разности геохимического фона); 2) территории (объекты) средней сложности, геохимически неоднородные (4—6 разностей геохимического фона), 3) территории (объекты) геохимически сложные (7 и более разностей геохимического фона).

Рассмотрим схему последовательности выбора «аномальных элементов» для дальнейшей обработки и выбора элементов-индикаторов.

Выбор «аномальных элементов» начинается с визуального просмотра журнала анализов геохимических проб с целью установления геологических и геохимических параметров ожидаемых полей. Для новых районов выделение «аномальных элементов» может быть сделано по резко выделяющимся значениям их содержаний на фоне однообразных содержаний других элементов. В приведенной для примера табл. 8 видно, что такими «аномальными элементами» являются свинец, цинк и медь. Для них средние ариф-

Выбор «аномальных элементов» по журналу анализов геохимических проб,
 $n \cdot 10^{-3} \%$

Номер пробы	Be	Li	Pb	Zn	Cu	Au	Ni
1	0,3	2	2	1	4	—	1
2	0,5	4	5	3	2	—	2
3	0,3	3	10	5	6	—	1
4	0,3	2	15	20	30	—	1
5	0,5	3	25	30	20	—	1
6	0,5	2	30	40	50	—	2
7	0,3	5	35	40	50	—	2
8	0,3	3	2	3	2	—	1
Среднее	0,37	3	15,2	17	20,5	—	1,3

метические содержания резко отличаются от большинства отдельных содержаний. Для других элементов (бериллий, литий, никель) величины средних содержаний близки к отдельным их значениям. Отсутствие золота в анализах не может свидетельствовать об отсутствии этого элемента в пробах, так как чувствительность анализа ($n \cdot 10^{-3} \%$), достаточная для других элементов, слишком низка для определения золота. Поэтому если на золото не был выполнен специальный химико-спектральный анализ, приведенные результаты не могут считаться окончательными.

Для известных районов, где ведутся поиски скрытого оруденения, при выборе аномальных элементов необходимо помнить о возможных слабоконтрастных геохимических аномалиях. Они могут маскироваться среди однообразных значений содержаний некоторых элементов, которые должны подвергаться более тщательному изучению.

Выбранные «аномальные элементы» подвергаются дальнейшей статистической обработке. При этом, в зависимости от поставленных задач, производится группировка выборок по типам опробованных геологических объектов. Анализы проб рыхлых отложений (аллювиальных и склоновых) обрабатываются все, без разделения для выявления аномалий, связанных с полезными ископаемыми. Анализы проб из коренных пород должны быть предварительно сгруппированы по типам пород.

Выбор элементов-индикаторов (коррелятивов). В геологически изученных районах с эксплуатируемыми месторождениями, для которых изучены геохимические ореолы, выбор элементов-индикаторов из комплекса «аномальных элементов» осуществляется по аналогии.

Например, известные в районе золоторудные месторождения сопровождаются комплексными ореолами и потоками следующих элементов: золото, серебро, свинец, цинк, медь, марганец, молибден, олово, мышьяк, сурьма, ртуть, барий, никель, ванадий, кобальт, хром, вольфрам, висмут, бериллий. Первые 11 элементов образуют выдержанные ореолы и рассматриваются как элементы-

индикаторы (геохимический спектр) золотого оруденения. Другие 8 элементов, начиная с бария, формируют ореолы, приуроченные к фланговым частям рудного поля за пределами известных рудных тел. Поэтому они не включены в категорию элементов-индикаторов.

Для другого района развития золотого оруденения определение комплекса элементов-индикаторов выполнено путем корреляционного анализа. Установлено, что в пределах первичных геохимических ореолов рудных тел отмечается прямая тесная положительная корреляционная связь между содержаниями золота и такими элементами, как серебро, мышьяк, сурьма, висмут, теллур, ртуть, медь, свинец, цинк, которые считаются элементами-индикаторами золота. Наряду с этим выявлен комплекс элементов, имеющих отрицательную корреляцию с золотом (никель и кобальт), обусловленную выщелачиванием этих элементов из пород основного и ультраосновного состава.

В ранее не известных районах с простыми геохимическими полями выделение элементов-индикаторов также не вызывает особых затруднений. Например, в районах развития ртутно-сурьмяного оруденения главными элементами-индикаторами могут считаться ртуть и сурьма. В районах проявления медно-никелевого оруденения «аномальные» концентрации никеля, меди и кобальта, отмечаемые в журналах анализов геохимических проб, могут рассматриваться как доказательство того, что эти элементы относятся к категории элементов-индикаторов указанного оруденения.

В новых районах и на новых площадях известных районов, где отмечаются сложный комплекс «аномальных элементов» и сложное геологическое строение, выбор элементов-индикаторов — задача довольно трудная. При решении ее требуется учитывать возможность связи рассматриваемых элементов с различными видами полезных ископаемых или различными типами месторождений одного и того же вида полезного ископаемого. В связи с этим необходимо и выбирать определенные комплексы элементов-индикаторов. Последовательность выбора элементов-индикаторов в этих случаях можно представить в таком виде: вычисление статистических параметров для ранжирования элементов в определенные ряды по их значению в «аномальном комплексе»; геохимическая классификация рядов по возможной их принадлежности к прогнозируемым видам полезных ископаемых или типам их месторождений. Для выполнения первой операции необходимо построить предварительную геохимическую карту с выделенными на ней геохимическими аномалиями рассматриваемых элементов. Ранжирование элементов в ряды («мажоритарные ряды», по М. А. Зубову) может производиться в соответствии с величиной нормированной продуктивности по геохимическому фону или продуктивности каждого элемента к суммарной продуктивности всех других элементов.

На разведываемых или эксплуатируемых месторождениях при наличии большого объема данных по геохимическому опробованию не только поверхности, но и глубоких горизонтов, для выбора элементов-индикаторов рекомендуется использовать удобный графический метод геохимических спектров А. П. Соловова (см. рис. 4).

А. М. Эленбоген предлагает выбирать элементы-индикаторы

рудных месторождений путем анализа корреляционных матриц со-
держаний химических элементов в геохимических пробах метода-
ми главных компонент и кластерного анализа.

Как ранее отмечалось, геохимические классификации элемен-
тов, отраженные в периодической системе Д. И. Менделеева, по-
зволяют прогнозировать комплекс элементов-индикаторов в новых
районах или на новых площадях известных районов. В семействах
p- и *d*-халькофилов присутствуют элементы-индикаторы большин-
ства сульфидных месторождений постмагматического генезиса.
Зная положение района в геохимической (металлогенической) про-
винции, можно прогнозировать комплекс элементов-индикаторов.
Например, для золотоносной провинции, поставив золото на первое
место, предполагается следующий ряд элементов-индикаторов (см.
рис. 2): золото, ртуть, таллий, свинец, висмут, теллур, сурьма, оло-
во, индий, кадмий, серебро, медь, цинк, галлий, германий, мышь-
як, селен. Наличие или отсутствие отдельных элементов из этого
ряда будет связано с геохимическими особенностями провинции,
но в целом этот ряд практически доказан многочисленными при-
мерами известных месторождений, в том числе и указанными ран-
нее. Среди элементов этого ряда следует искать и элементы-инди-
каторы месторождений меди, свинца и цинка, ртути и сурьмы,
олова. Появление в геохимических пробах этого ряда *d*-литофи-
лов и *d*-siderофилов может свидетельствовать о наличии их в ви-
де элементов-примесей в сульфидных минералах. Например, в пи-
рите и пирротине нередко отмечаются примеси никеля и кобаль-
та. Некоторые элементы могут отражать содержания их в мине-
ралах вмещающих пород (цирконий, ванадий и др.).

В провинциях развития редкометалльного оруденения элемен-
та-индикаторами являются *d*- и *s*-литофилы — цирконий, гафний,
ниобий, тантал, рублидий, цезий и др. Появление в геохимических
пробах халькофилов обычно свидетельствует о проявлении суль-
фидов в рудах подобных месторождений.

В районах хорошо изученных рудных полей и месторождений
некоторые исследователи выделяют несколько групп элементов-
индикаторов, которые должны определяться на разных стадиях
геологоразведочных работ. Например, для одного из районов раз-
вития свинцово-цинковых месторождений скарновой формации ре-
комендуется выделять четыре группы элементов-индикаторов, про-
являющихся на отдельных этапах рудного процесса (табл. 9).

Для данного примера при детальных поисках желательны оп-
ределение и обработка результатов анализов по 25 элементам-ин-
дикаторам; на подстадии поисково-оценочных работ — 16 элемен-
там; при проведении разведочных работ достаточно анализировать
геохимические пробы на 13 элементов-индикаторов.

Новое направление в решении задачи выбора элементов-инди-
каторов (коррелятивов), разрабатываемое в Иркутском универ-
ситете (В. Н. Евдокимова) и Институте геохимии СО АН СССР
(В. В. Поликарпочкин), коренным образом изменяет весь процесс
обработки результатов анализов геохимических проб [16].

Дифференцированный анализ геохимических проб на разных стадиях поисковых и разведочных работ. По В. И. Сафронову

Подстадии и стадии геолого-разведочных работ	Анализируемые элементы-индикаторы этапов:			
	рудообразования	скарнообразования	перераспределения при пропилитизации	транспортировки рудного вещества
Детальные поиски	Pb, Zn, Ag, Cu, Sn, As, Sb, S, Hg, Ni, V, Cr, Co	Mn, Fe, B	K, Na, Al, Ca, Li, Rb, S	Cl, F
Поисково-оценочные работы	То же	То же	—	—
Разведка	»	—	—	—

Это направление, названное «методом многомерных полей» полностью основано на использовании ЭВМ. При этом выполняется классификация получаемых данных, выделяются геохимические классы, в каждом из которых ассоциации химических элементов ранжируются по коэффициенту контрастности, т. е. отношению наблюдаемых или вычисленных величин к фону: 1) W/10—30, Bi/19—20, Sn/14, As/10—12, Ag/2—8, Zn/2—3; 2) Ag/26—77, Pb/3—7, Bi/2—3, Sn/1,8—2,3, Cu/1,7—2, Li/1,3—1,7 и т. д.

В первом классе данных примеров ведущим элементом является вольфрам, висмут и др., во втором — серебро и т. д. На основании этого составляются карты геохимических классов.

Метод многомерных полей имеет определенные преимущества при выборе элементов-индикаторов (коррелятивов), так как этот процесс осуществляется машиной автоматически. Вместе с тем этот метод имеет немало недостатков, которые можно установить из характеристики метода, даваемой самими авторами: выделенные классы не вполне идентичны геохимическим ассоциациям; классы, выделяемые в потоках рассеяния, могут быть обусловлены смешением материала из различных объектов; для выделения геохимических ассоциаций необходима дополнительная интерпретация.

Развивая новое направление в решении задачи выбора элементов-индикаторов (коррелятивов) геохимических полей, не следует отказываться и от традиционных направлений в этой проблеме.

Сочетание нового и традиционного направлений позволит в дальнейшем выработать наиболее рациональный путь определения ассоциаций элементов-индикаторов (коррелятивов), соответствующих геохимическим особенностям конечных и промежуточных объектов геохимических поисков.

Статистическая обработка материалов геохимических методов

Основной задачей математико-статистической обработки материалов геохимических методов, основанной на принципах математической статистики и теории вероятностей, является вычисление общих статистических параметров геохимических полей, к которым относятся: S_f — местный геохимический фон; S_a — минимально аномальные содержания; КК — кларки (коэффициенты) концентрации; S^2 — дисперсия; r — коэффициенты корреляции и др.

Главная тенденция определения перечисленных параметров заключается в постепенном переводе всех операций на выполнение с помощью ЭВМ по специальным программам. Вместе с тем, не исключена из применения ручная обработка геохимических данных, особенно графическими и простейшими аналитическими способами с использованием электронных микрокалькуляторов различных типов. Эта методика представляет интерес при обработке небольших выборок, для предварительного анализа цифрового материала, а также для освоения сущности процесса статистической обработки геохимических данных молодыми специалистами и студентами.

Вопросам математико-статистической обработки геохимических материалов посвящено большое число опубликованных работ, а также методических указаний и инструкций. Поэтому в данной работе эти вопросы не рассматриваются.

Графическое оформление материалов геохимических методов

В соответствии с основными подразделениями геохимических полей, выделенных Р. И. Дубовым [21], на графических документах могут быть отображены следующие геохимические параметры: распределения концентраций химических элементов S_x , S_f , S_a ; неоднородностей геохимических полей и степени связи химических элементов (дисперсия, коэффициент корреляции, коэффициент зональности и др.).

Геохимические поля на графических документах изображаются в одномерном пространстве — геохимические графики, колонки; в двумерном пространстве — геохимические карты; на вертикальной плоскости — геохимические разрезы; в трехмерном пространстве — геохимические модели.

Способы изображения геохимических полей могут быть ручные и машинные, выполняемые на специальных приставках к ЭВМ (например, графопостроителях «Атлас», «Картимат», «Калкомп», «Феранти»).

Общая последовательность составления графических документов контактных геохимических методов включает следующие основные операции. Вначале составляются графические документы, отражающие поля точек с данными геохимического опробования (график-разноски, карты-разноски и др.), а затем графические

документы, отображающие геохимические поля и аномалии по различным параметрам (геохимические графики, карты и т. д.).

На картах и разрезах-разносках показываются точки отбора геохимических проб с данными анализа в той градации, которая указывается на полях этих документов (рис. 12). На основе этих

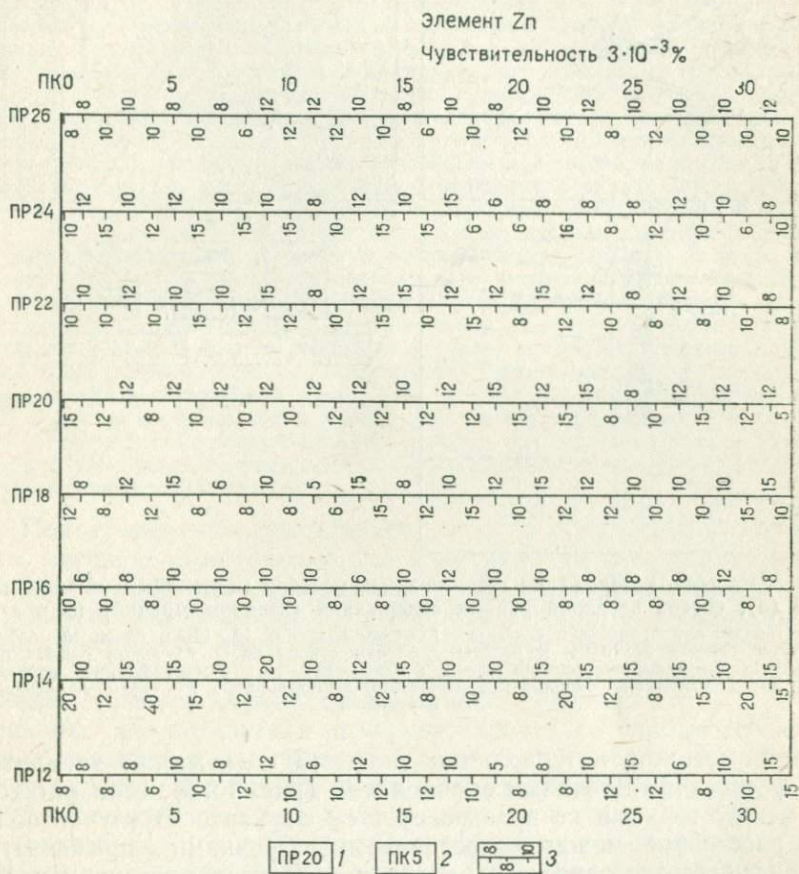


Рис. 12. Карта-разноска с данными литохимического опробования склоновых элювиально-делювиальных отложений.

1 — профиль опробования, 2 — пикет (точка отбора проб), 3 — содержания элементов

документов составляются геохимические карты и разрезы. Геохимические потоки вдоль речных долин переносятся так называемым ленточным способом, при котором интервал концентрации дается разной толщиной линии (рис. 13, а). Для изображения полиэлементного потока используются разные цветные или штриховые линии. Геохимическое поле на карте или на разрезе изображается методом изолиний (изоконцентрации), которые наносятся по выделенным при статистической обработке интервалам. Изолинии про-

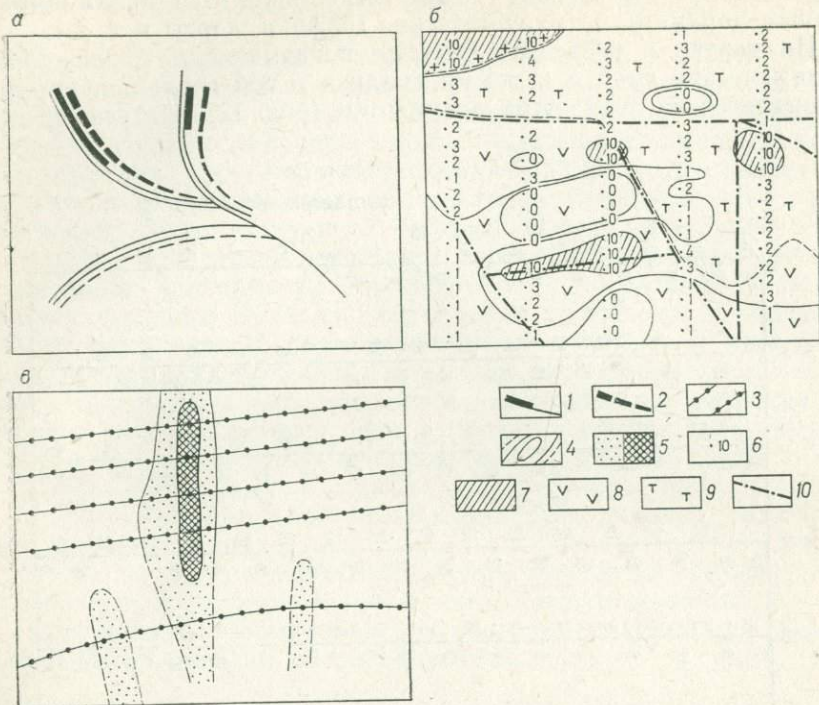


Рис. 13. Способы изображения геохимических полей и аномалий: ленточный способ (а); способ изолиний равных содержаний (изоконцентраций) (б и в).

1—1 — геохимические потоки в аллювии: 1 — свинца ($2-10$) $10 \cdot 10^{-3}$ и более $10 \cdot 10^{-3}$ %), 1 — цинка ($20-50$) $50 \cdot 10^{-3}$ % и более); 3 — точки отбора проб; 4 — линии равных концентраций; 5 — аномалии серебра ($2-10$ и $10-20 \cdot 10^{-3}$ %); 6 — содержание бериллия (10^{-4} %); 7 — аномалия бериллия; 8 — андезитовые порфириты; 9 — туфы; 10 — разрывные нарушения

водятся методом интерполяции значений содержаний элементов между соседними точками опробования (рис. 13, б), если расстояние между точками не превышает 1 см на карте. В случае больших расстояний между сопоставляемыми точками применяется ограниченная экстраполяция, которая допускает многовариантные решения при проведении изолиний. Еще менее точно изображение поля за пределами точек опробования, когда может использоваться метод неограниченной экстраполяции (рис. 13, в). Для построения карт в изолиниях некоторые исследователи рекомендуют специальные универсальные графические интерполяторы. На приставках-графопостроителях к ЭВМ могут быть выполнены такие же изображения геохимического поля в изолиниях. Для этого требуется для каждой точки опробования предварительно вычислить координаты. В зарубежной практике [21] для подготовки данных о координатах точек опробования используются специальные шифраторы. С их помощью координаты точек переносятся с топографической основы на перфоленту для дальнейшей обработки на ЭВМ.

Составление геохимических моноэлементных карт может про-

изводиться двумя способами: при выделении только одних аномалий и при использовании всех интервалов содержаний, т. е. при составлении полной карты геохимического поля.

Рассмотрим пример, который относится к площади, сложенной гранитами верхнепалеозойского возраста, залегающими среди среднепалеозойских вулканогенно-осадочных пород. Восточная часть площади перекрыта рыхлыми четвертичными отложениями, геохимическое опробование которых выполнено на тех участках, где они имеют мощность не более 3 м. На геохимической карте бериллия, составленной при оконтуривании минимально аномальных содержаний, отмечается 14—15 небольших изолированных геохимических аномалий, приуроченных к рыхлым отложениям эрозийных ложбин вблизи выходов биотитовых гранитов (рис. 14, а). Большинство аномалий в западной части площади расположено в двух ложбинах у подножия водораздельного гребня, на котором обнажены топаз-кварцевые жилы, содержащие вольфрамит, берилл и другие минералы. На геохимической карте, составленной с выделением всех интервалов содержаний (рис. 14, б), слабые аномалии бериллия оконтуривают обнаженные участки гранитного интрузива в западной и северной частях площади. В то же время обнаженный участок вмещающих пород на юго-востоке площади характеризуется наличием в рыхлых отложениях только нескольких весьма небольших аномалий бериллия, положение которых не имеет связи с контурами интрузива. Таким образом, данный вариант карты отражает более полную картину геохимического поля распределения бериллия, позволяющую делать вывод о генетической связи этого элемента с гранитами. Кроме того, морфология отдельных слабых аномалий бериллия, имеющих почти меридиональное простирание, может свидетельствовать об их связи с разрывными нарушениями того же направления в гранитах. Это подтверждается совпадением некоторых аномалий с жилными телами почти меридионального простирания.

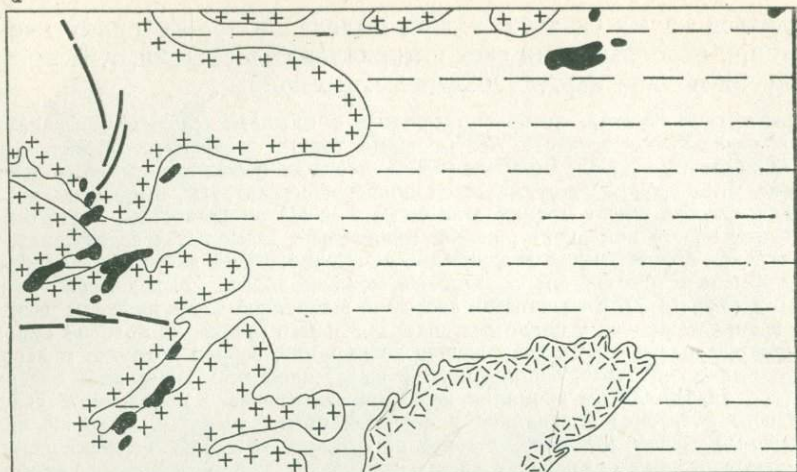
Полиэлементные геохимические карты и разрезы, изображающие распределение параметров концентрации нескольких элементов, составляются следующими способами. Первый заключается в изображении параметров концентрации комплекса химических элементов на одной карте (разрезе) разными условными обозначениями (штриховыми, цветными). Второй предусматривает изображение мультипликативных показателей, предложенных С. В. Григоряном. Эти показатели позволяют усиливать слабые геохимические аномалии и получать обобщенные геохимические аномалии определенной ассоциации химических элементов. Последовательность вычисления мультипликативных показателей такова: первая операция — для каждой точки опробования производится перемножение содержание элементов и сложение степеней (табл. 10);

Таблица 10

Вычисление мультипликативных содержаний ассоциаций
пяти химических элементов [43]

Место пробы	Pb, 10 ⁻³ %	Zn, 10 ⁻² %	Cu, 10 ⁻³ %	Ag, 10 ⁻⁵ %	Ba, 10 ⁻² %	Pb×Zn×Cu× ×Ag×Ba, 10 ⁻¹⁶ % ⁵
0	2,29	1,19	4,04	8,30	6,05	553
1	2,29	1,22	4,00	8,46	5,86	554
2	2,24	1,19	3,98	8,36	5,75	510
...

а



б

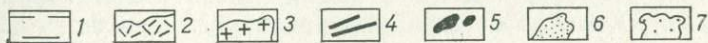
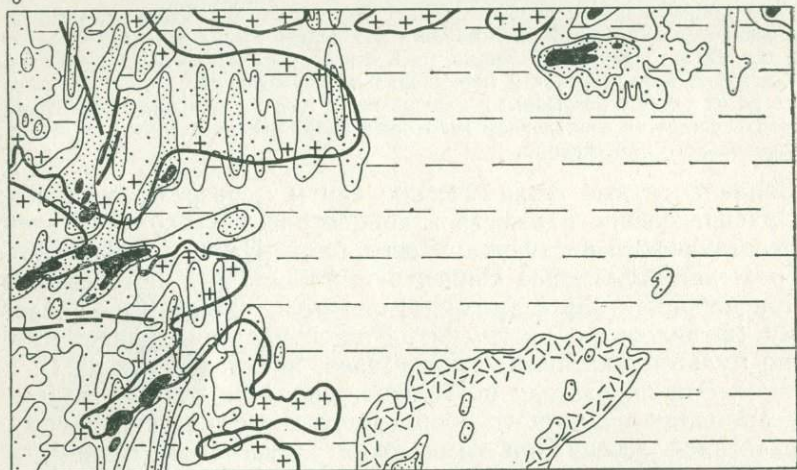


Рис. 14. Схемы геохимического поля эндоконтактной зоны гранитного интрузива, составленные с выделением контрастных геохимических аномалий (а) и всех интервалов содержаний (б).

1 — четвертичные рыхлые отложения значительной мощности; 2 — туфы и лавы; 3 — граниты; 4 — топаз-кварцевые жилы; геохимические аномалии бериллия в рыхлых отложениях небольшой мощности: 5 — контрастные ($C_x > C_a$), 6 — слабые ($C_\Phi < C_x < C_a$), 7 — очень слабые ($C_k < C_x < C_\Phi$)

вторая — определение мультипликативного C_Φ графическим путем на вероятностном планшете или по программе, исключая из выборки проб явно аномальные содержания по карте или по таблице.

Геохимическая карта (разрез) составляется в изолиниях значений произведений содержаний ассоциации элементов. К фоновым могут быть отнесены участки с минимальными значениями

мультипликативных показателей. Во избежание влияния различных порядков содержаний отдельных элементов мультипликативные ореолы и аномалии рекомендуется изображать в нормированных показателях.

Перед выполнением полиэлементных расчетов и построений с применением мультипликативных показателей необходимо выбрать ассоциации химических элементов, которые будут участвовать в расчетах. С. В. Григорян предложил объединять в одну ассоциацию элементы-индикаторы надрудные, рудные и подрудные для объектов, которые по предыдущим исследованиям или по аналогии характеризуются определенными ассоциациями элементов. Более общий принцип выбора ассоциации химических элементов для такой цели может быть основан на семействах элементов периодической системы применительно к данному геологическому объекту. Во всяком случае, следует избегать объединения в ассоциации таких элементов, которые относятся к разным генетическим образованиям.

Изображения геохимических полей параметров их неоднородности и степени связи между химическими элементами отражают распределение таких статистических показателей как дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициент корреляции и др. Для примера на рис. 15 приведены карта дисперсии логарифмов концентрации свинца и сопоставляемые с ней карта концентрации того же элемента и схематическая карта одного из районов Сибири.

Как отмечает Р. И. Дубов, на карте распределения концентраций свинца центральная группа месторождений отмечается вытянутой зоной повышенных значений концентраций с осевой линией, изгибающейся на участках с оруденением. На карте дисперсии аномалии также приурочены к тем же участкам, но здесь отмечается разделение поля на почти прямоугольные блоки с границами, имеющими преимущественно северо-восточное и северо-западное простирание. Это картина геохимического поля находится в соответствии с гипотезой о связи месторождений района с блоковой тектоникой, которая подчеркивается неоднородностью распределения свинца в горных породах отдельных тектонических блоков.

Представляют интерес для дальнейшей геохимической и геологической интерпретации и оценки карты коэффициентов корреляции между отдельными парами химических элементов. Коэффициент корреляции между парой сопоставляемых элементов может быть определен графическим способом, по карте градиентов геохимического поля, предложенным В. Ф. Мягковым. Для этого на картах усредненных концентраций сравниваемых элементов разбивается квадратная сеть, в узлах которой восстанавливается вектор проекции градиента поля в сторону возрастания функции. Кальки таких карт для двух элементов накладываются друг на друга и измеряется угол между векторами для двух элементов. Определяются косинусы углов. Среднее значение косинусов всех углов равно коэффициенту корреляции сопоставляемых полей. По величине коэффициента определяется теснота связи между парой сопоставляемых химических элементов.

Составляются карты и таких статистических показателей, как

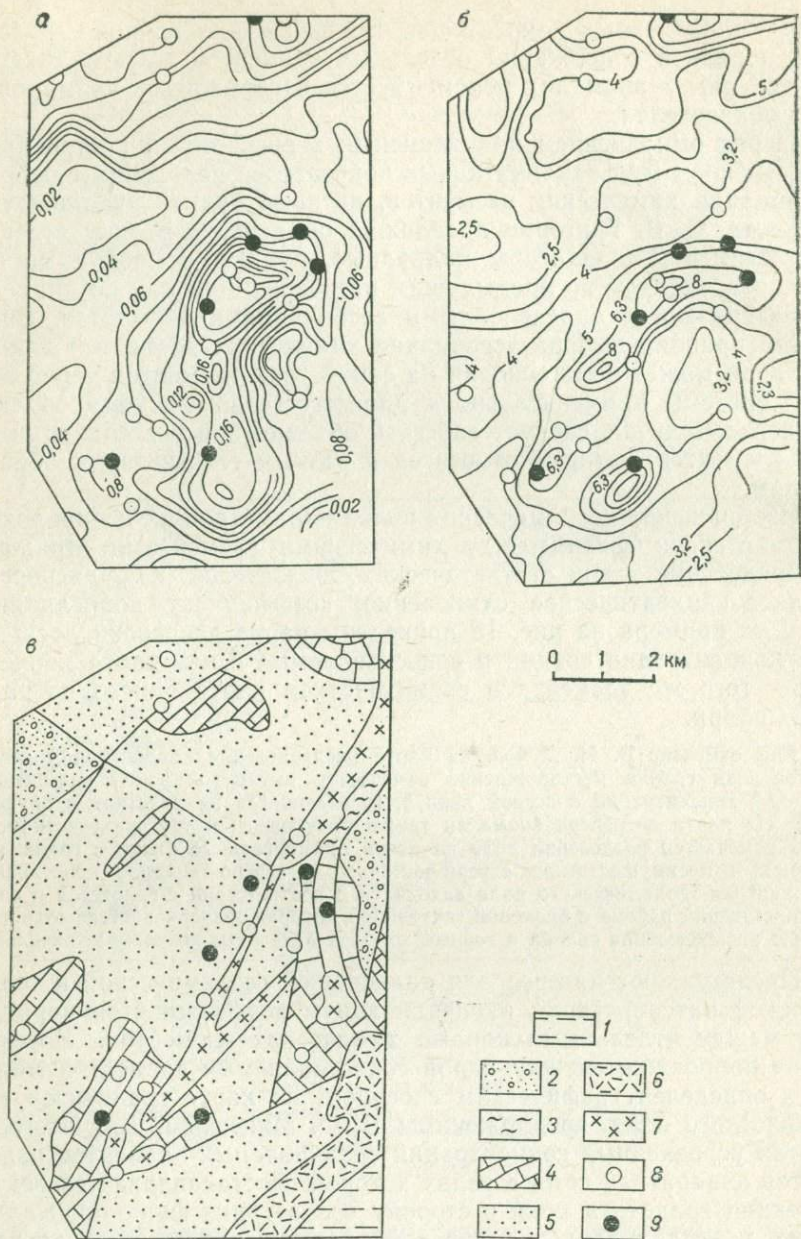


Рис. 15. Карты дисперсии логарифмов концентрации свинца (а), концентрации свинца (б) и геологического строения (в) для одного из районов [22].
 1 — четвертичные отложения; 2 — песчаники (юра); 3 — аргиллиты (девон); кембрий; 4 — доломиты, 5 — сланцы; 6 — порфиронды; 7 — верхнеюрские гранодиорит-порфиры; 8 — рудопроявления; 9 — месторождения

коэффициент зональности K_z геохимических аномалий. Для составления таких карт в каждой точке опробования проставляется величина коэффициента, вычисляемого по соответствующей формуле.

Карта коэффициентов зональности составляется также в изолиниях и может применяться для определения глубины эрозионного среза геохимических аномалий и проявлений полезных ископаемых.

Составление геохимических разрезов

Геохимические разрезы представляют собой двумерное изображение геохимического поля в вертикальной плоскости. На I стадии региональных геологосъемочных работ геохимические разрезы могут составляться при проведении глубинного геологического картирования. На II стадии необходимость в их составлении возникает при осуществлении поисковых и поисково-оценочных работ. Наибольшее значение геохимические разрезы приобретают на стадиях разведки, когда появляется большое число глубоких пересечений, по которым может быть проведено геохимическое опробование.

Геохимические разрезы и карты составляются путем объединения сходных интервалов содержаний химических элементов способом интерполяции между соседними профилями опробования.

Применять этот способ можно при составлении геохимических карт по достаточно плотной сети опробования на поверхности относительно обнаженного района. Значительно труднее это сделать для геохимических разрезов, составляемых по редкой сети скважин. В этом случае приходится использовать способ ограниченной экстраполяции, при которой возникают многовариантные решения.

Рассмотрим некоторые примеры геохимических разрезов, составленных в двух вариантах для каждого из трех геологических объектов, которыми являются скрытые (погребенные и слепые) эндогенные месторождения сульфидных руд.

Объект 1. Свинцово-цинковое колчеданное месторождение, залегающее в вулканогенно-осадочных породах палеозоя и погребенное под толщей рыхлых неоген-четвертичных отложений мощностью около 100 м (рис. 16, а). По данным геохимического опробования керна скважин, пробуренных при глубинном геологическом картировании и поисках, изучены экзогенные геохимические ореолы свинца, цинка, меди, серебра, мышьяка, кобальта, молибдена в рыхлых отложениях над погребенным месторождением. По этим данным составлены геохимические разрезы в двух вариантах. По первому из них в западной части объединены аномальные интервалы по скважинам таким образом, что геохимические ореолы продолжают линии падения рудного тела по его восстанию, выходя на современную поверхность (рис. 16, б). Согласно второму варианту на разрезах объединены те же интервалы по скважинам, но в горизонтальном направлении, параллельно поверхности коренных пород и отдельных горизонтов рыхлых отложений (рис. 16, в). Сопоставим правомерность построения геохимических разрезов по указанным двум вариантам. В первом — видно желание автора вывести геохимические аномалии на поверхность и тем самым облегчить поиски погребенных месторождений путем проведения поверхностной геохимической съемки. Однако при этом нарушается связь геохимических ано-

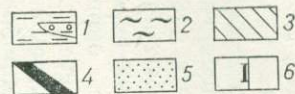
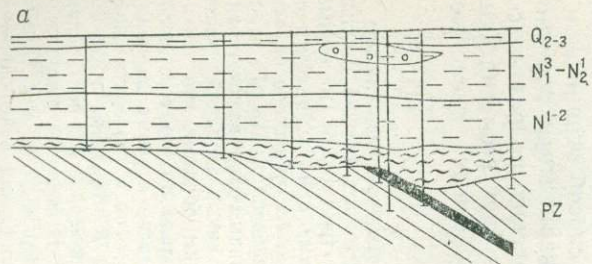
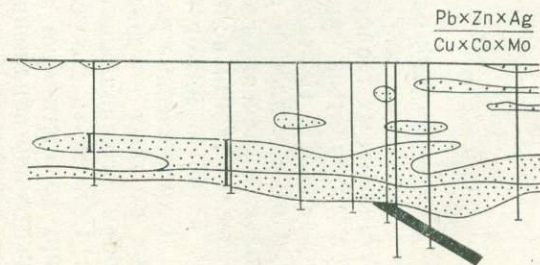
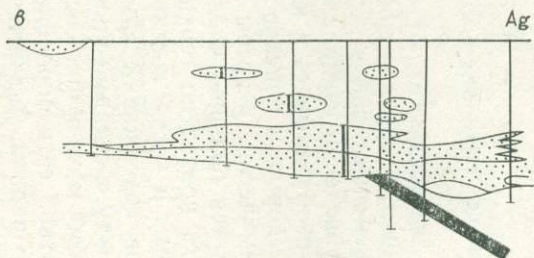
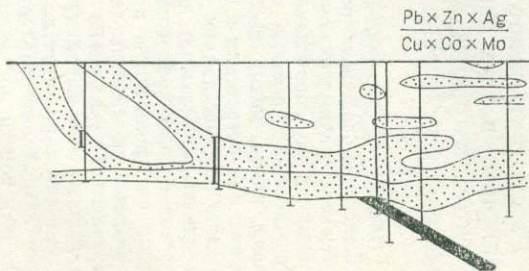
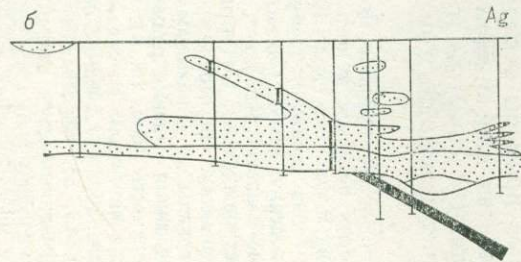


Рис. 16. Геохимические разрезы экзогенных ореолов погребенного свинцово-цинкового месторождения (а), составленные в двух вариантах (б, в). При составлении вариантов разрезов использованы данные литохимического опробования И. Ф. Мясникова и Г. И. Хорина.

1 — рыхлые отложения, 2 — кора выветривания, 3 — коренные породы; 4 — рудные тела, 5 — экзогенные ореолы; 6 — сопоставляемые интервалы опробования керна скважин



малей с геологическим строением покрова рыхлых отложений и подстилающих пород. Отсутствует также соответствие секущего положения экзогенных геохимических аномалий не только к горизонтальному залеганию рыхлых отложений, но и к подобному положению горизонтов подземных вод.

Второй вариант более правдоподобен, так как положение геохимических аномалий соответствует условиям формирования рыхлой толщи и подземных вод. К нижней части неогеновых отложений приурочены наиболее значительные и выдержанные геохимические аномалии, переходящие в кору выветривания коренных пород. Эти аномалии и должны являться главным поисковым признаком погребенного оруденения. Отдельные небольшие изолированные геохимические аномалии, располагающиеся в более высоких горизонтах рыхлых отложений, имеют, по-видимому, различное происхождение, связанное с движением подземных вод, наличием геохимических барьеров. Поэтому такие аномалии, и особенно те из них, которые расположены на поверхности, не могут служить достоверными признаками погребенного на значительной глубине оруденения. Надежное выявление его может быть сделано лишь при глубинном геохимическом опробовании керн картировочных и поисковых скважин. При этом будет увеличена стоимость работ, но не придется затрачивать средства на проверку многочисленных поверхностных или близповерхностных ландшафтных и техногенных геохимических аномалий.

Объект 2. Слепое медноколчеданное месторождение, залегающее на глубине около 600 м от поверхности в среднепалеозойских вулканогенно-осадочных породах (рис. 17, а). Месторождение разведано большим числом глубоких скважин, расстояние между которыми относительно невелико, но в то же время не закрывает возможностей для составления разных вариантов геохимических разрезов, отражающих и различные точки зрения на генезис месторождения.

Первый вариант геохимических разрезов составлен с позиции вулканогенно-осадочного происхождения колчеданных руд (рис. 17, б). Здесь геохимические аномалии меди, цинка и мышьяка обволакивают рудные тела, продолжаясь ниже их в виде столбов в рудовмещающих породах. В перекрывающей месторождение свите туфов и туфопесчаников выделяются самостоятельные горизонтально расположенные геохимические аномалии, не связанные с рудными телами. Это должно свидетельствовать о том, что в процессе образования перекрывающей свиты формировались свои геохимические аномалии, связанные с накоплением в этой свите прослоев сульфидов.

Второй вариант геохимических разрезов для этого объекта, построенный по тому же профилю скважин, характеризуется наличием узких крутопадающих геохимических ореолов и аномалий, отходящих от рудных тел и пересекающих не только рудовмещающие породы, но и свиту перекрывающих туфов и туфопесчаников (рис. 17, в). Здесь во всех изученных геохимических ореолах меди, цинка, мышьяка и ртути отмечается увеличение интенсивности концентраций при приближении к рудным телам. Это достаточно определенно указывает на генетическую связь геохимических ореолов с оруденением. Морфология ореолов обусловлена крутопадающими разрывными нарушениями, признаки которых обнаруживаются при документации керн скважин. Местами вдоль этих нарушений встречается сульфидная минерализация. Приведенные данные позволяют сделать заключение о том, что оруденение и сопровождающие его ореолы сформировались позже накопления пород перекрывающей свиты и потому не могут рассматриваться как связанные с вулканогенно-осадочным процессом. Наиболее вероятен вывод о гидротермальном эпигенетическом генезисе месторождения и окружающих его геохимических ореолов.

Объект 3. Слепое медно-никелевое месторождение приуроченное к пологозалегающему интрузиву габброидов, расположенному среди осадочных и вулканогенных пород (рис. 18, а). Первый вариант геохимических разрезов (рис. 18, б) характеризуется крутопадающими геохимическими ореолами никеля, меди и других элементов, отходящими вверх от рудоносного интрузива. Внутри последнего отмечается тенденция к увеличению концентрации никеля и меди сверху вниз. На первый взгляд, приведенные построения являются единственно правильными, но при более детальном рассмотрении они вызывают сомнение. Во-первых, подобная морфология ореолов свойственна пост-

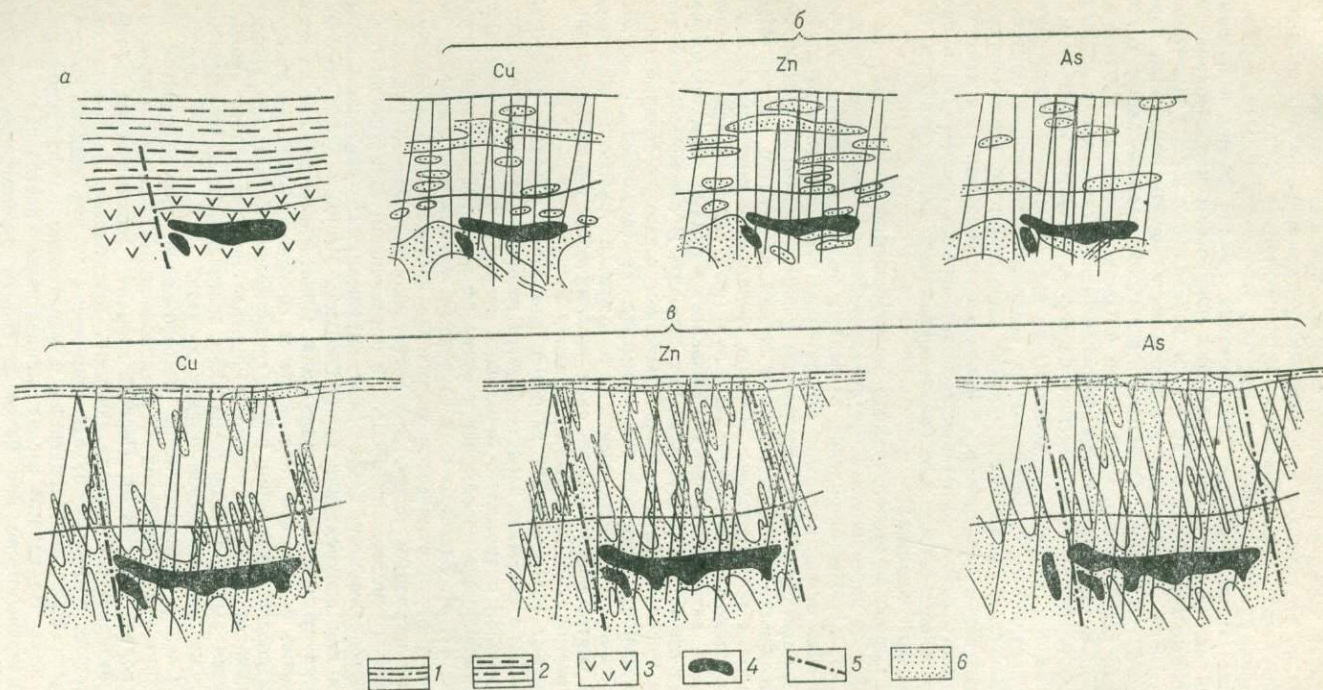


Рис. 17. Геохимические разрезы эндогенных ореолов для слепого медноколчеданного месторождения (а), составленные в двух вариантах (б, в). При составлении вариантов разрезов использованы данные литохимического опробования Г. Н. Засухина и Б. П. Алексева.

Отложения: 1 — рыхлые, 2 — туфогенно-осадочные; 3 — вулканиты; 4 — рудные тела; 5 — разрывные нарушения; 6 — эндогенные ореолы

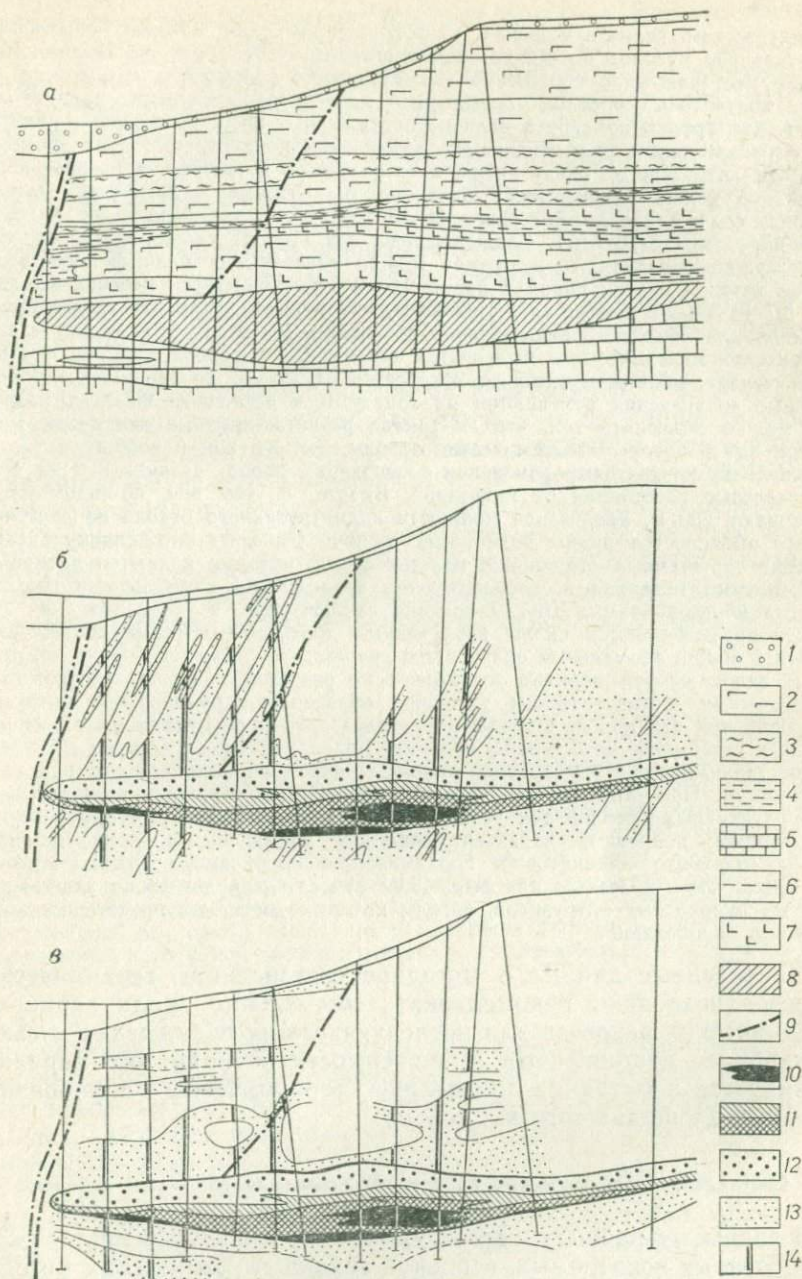


Рис. 18. Геохимические разрезы эндогенных ореолов для слепого медно-никелевого месторождения (а), составленные в двух вариантах (б, в). При составлении вариантов разрезов использованы данные литохимического опробования О. П. Разгонова, Л. К. Прохоровой и Э. А. Драмшева.

1 — рыхлые отложения; 2 — базальты покровные; 3 — туфы; 4 — аргиллиты, песчаники; 5 — известняки; 6 — бурые угли; 7 — долериты; 8 — габбро-долериты рудоносного интрузива; 9 — разрывные нарушения; 10 — руды сплошные; 11 — руды вкрапленные; геохимические ореолы никеля; 12 — внутриинтрузивные, 13 — околоинтрузивные, 14 — сопоставляемые интервалы опробования по скважинам

магматическим гидротермальным месторождениям, для которых обычно распространение ореолов по востанию на несколько сотен метров. В данном же случае месторождение собственно магматического генезиса, для которого развитие контактовых ореолов ограничено менее значительными параметрами. Во-вторых, трудно объяснить наличие протяженных ореолов никеля и меди над интрузивным телом при отмечаемом увеличении концентрации этих элементов в самом интрузиве не снизу вверх, а сверху вниз. В-третьих, в разрезе надинтрузивной толщи присутствуют базальты (пикритовые и др.), для которых фоновое содержание никеля равно $26 \cdot 10^{-3} \%$, что в два раза выше кларка в этих породах ($13 \cdot 10^{-3} \%$). Следовательно, эти породы являются аномальными по содержанию никеля. То же самое можно сказать и о меди, фоновое содержание которой в этих породах равно $9,5 \cdot 10^{-3} \%$ при кларке в основных породах $8,7 \cdot 10^{-3} \%$. В целом представляется, что первый вариант геохимических разрезов для объекта 3 недостаточно обоснован. По второму варианту в экзоконтактной зоне интрузива выделяется геохимический ореол сложной формы в виде «чехла», мощность которого колеблется от 10—20 до 140—170 м. Максимальные ее значения отмечаются на западном и восточном флангах разреза. Это можно объяснить тем, что на западе развиты крупные разрывные нарушения, вдоль которых геохимические ореолы, так же как и вообще метасоматические экзоконтактные изменения вмещающих пород, развивались на более значительные расстояния от интрузива. Вместе с тем они, по-видимому, не превышают 200 м. Увеличение мощности надинтрузивного ореола на восточном фланге объясняется рядом возможных причин. Одна из них — наличие здесь, в толще терригенных отложений, пластов углей, которые являются активными адсорбентами металлов и, следовательно, возможными аномальными геохимическими образованиями. Другая причина заключается в том, что на этом фланге прослеживаются силлы интрузивных долеритов, которые также могли повысить общий аномальный облик всего разреза.

В целом второй вариант геохимических разрезов больше соответствует геологическим и генетическим условиям образования рудоносного интрузива и вмещающих его пород. Отсюда могут следовать и рекомендации по использованию геохимических методов поисков. Более надежным должно быть глубинное геохимическое опробование коренных пород на определенном уровне от поверхности. При этом особое внимание необходимо обращать на исключение из продуктивных ореолов тех геохимических аномалий, которые приурочены к базальтовым покровам, характеризующимся повышенными концентрациями главных элементов-индикаторов. Геохимическое опробование рыхлых отложений может быть полезным для выявления относительно неглубоко залегающих скрытых рудоносных интрузивов, ореолы которых достигают представительного горизонта опробования.

Приведенные данные о методике составления геохимических разрезов позволяют рекомендовать составление ряда вариантов геохимических разрезов для последующего их обсуждения и выбора наиболее достоверного. В зависимости от принятого варианта планируется и методика дальнейшего геохимического опробования на новых площадях того же района.

Составление геохимических карт и графиков для закрытых районов

В закрытых районах, где отсутствуют выявленные месторождения полезных ископаемых, основная задача геохимических методов исследований заключается в подготовке геохимических данных для прогнозирования и направления поисковых работ. В этих районах ведется глубинное геологическое картирование, которое сопровождается геохимическим опробованием керна скважин. Геохимические карты поверхности коренных пород составляются по редкой,

а иногда и весьма неравномерной сети скважин. Все это обуславливает составление геохимических карт, на которых выделяются только самые общие и наиболее заметные черты геохимического поля, представляющие интерес для прогноза и поисков. Для этой цели, например, особенно подходит способ построения карт мультипликативных показателей. Опыт использования этого способа описан Л. С. Галецким, С. В. Григоряном и др. для закрытых районов Украинского щита. Построение карты мультипликативных геохимических аномалий производилось по данным спектрального анализа проб, отобранных по керну скважин из верхней части погребенного кристаллического фундамента. Средние содержания были вычислены для верхнего (10—15 м) интервала коренных пород.

Для расчета мультипликативных показателей в каждой пробе производилось перемножение абсолютных содержаний (в процентах) группы элементов, что равноценно сложению логарифмов содержаний. Вычислительные операции осуществлены в ИМГРЭ на ЭВМ «Урал-14» по программе, разработанной С. В. Григоряном и др. Составлялись геохимические карты общих и частных мультипликативных аномалий. Общие включают от 15 до 25 элементов, частные представлены группами элементов, объединяющими ассоциации элементов по особенностям геохимических свойств и типовой специализации.

Примеры карт мультипликативных аномалий, составленных по такой методике, приведены на рис. 19. На рис. 19,а показана карта общих мультипликативных аномалий, построенных по 25 химическим элементам. Отмечаемое здесь усиление аномалий в южной части площади более контрастно выглядит на карте частных мультипликативных аномалий элементов-индикаторов редкометальной минерализации (рис. 19,б). Наблюдается расширение аномалий и усиление их интенсивности в южной части. По мнению автора, это отражает северное продолжение крупных аномальных зон за пределами данной площади, где известно месторождение редкометалльных руд. На геохимическом графике, построенном для одной скважины и выданном на печать ЭВМ, отмечается уменьшение с глубиной интенсивности мультипликативных аномалий в вертикальном разрезе (рис. 19,в).

Геохимические карты мультипликативных аномалий позволяют выделять потенциально рудоносные участки, а также перспективные тектонические зоны и другие геологические образования в условиях закрытых районов при неравномерной сети геохимического опробования.

Гидрохимические карты имеют свои особенности. На них показываются нормальные поля вод различного состава, области питания и направления движения подземных и поверхностных вод, гидрогеохимические аномалии отдельных элементов-индикаторов или суммарные аномалии их ассоциаций, а также некоторых компонентов-индикаторов (SO_4^{2-}), рН и др. Для иллюстрации приведем гидрохимические карты (рис. 20 и 21), составленные для разных стадий работ по материалам Г. А. Голевой [20].

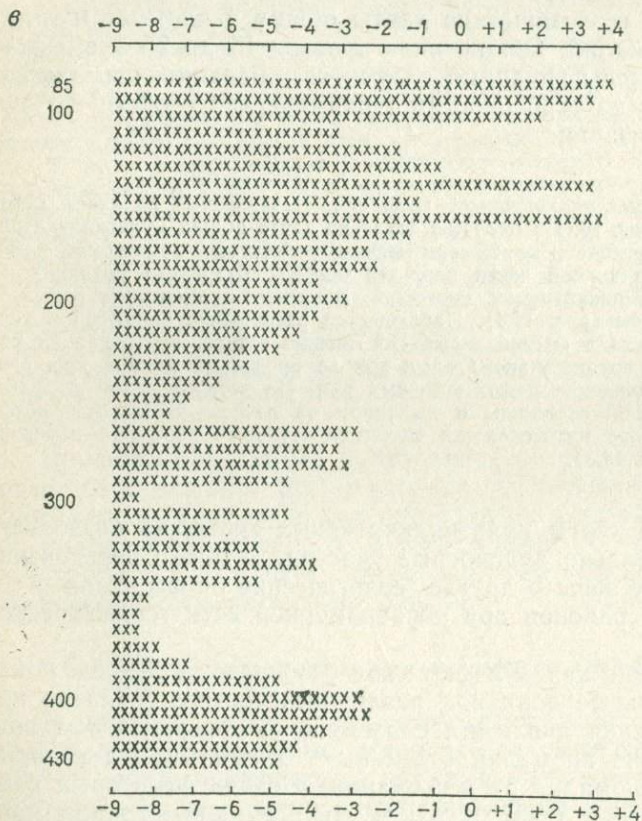
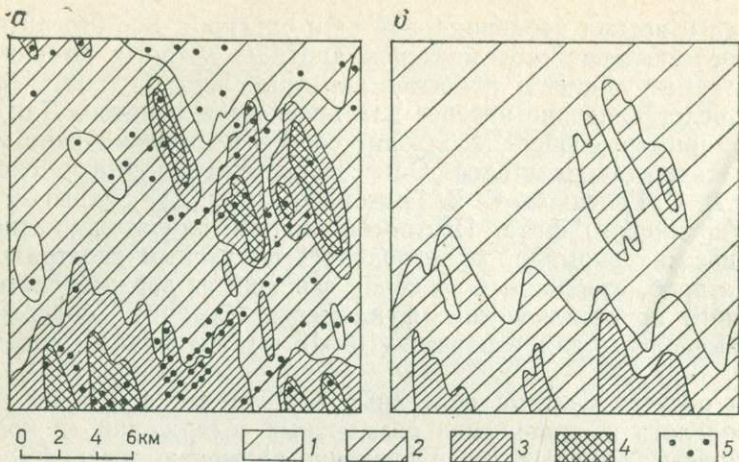


Рис. 19. Мультипликативные аномалии площади докембрийских образований, погребенных под платформенным чехлом. По Л. С. Галецкому и др. Карта для ассоциации Th, Be, Yb, La, Ce (б), график логарифмов результатов для 25 элементов по скважине (выдан на печать ЭВМ) (в).

1, 2, 3, 4 — градации абсолютных значений произведений содержаний химических элементов; 5 — картировочные скважины

Рис. 20. Региональная гидрохимическая карта [20]

Площади распространения различных типов вод: 1 — гидрокарбонатных натриевых с минерализацией до 1 г/л, 2 — гидрокарбонатных кальциевых (до 2,5 г/л), 3 — гидрокарбонатно-хлоридных кальциевых (до 1 г/л), 4 — азотных соленых (до 7 г/л), 5 — сульфатных алюминиево-железистых (до 21 г/л); 6 — области питания вод; гидрохимические аномалии: 7 — в поверхностных водотоках, 8 — в трещинных водах; литохимические аномалии: 9 — в рыхлых отложениях, 10 — в коренных породах; 11 — направление движения вод; 12 — водоупорные фоновые и аномальные

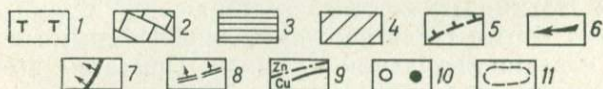
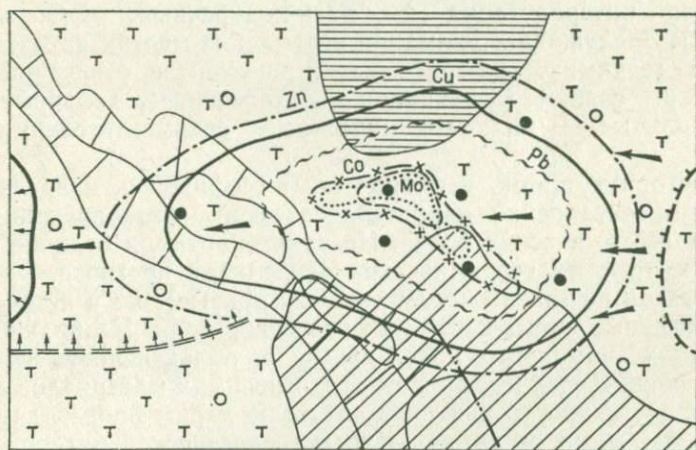
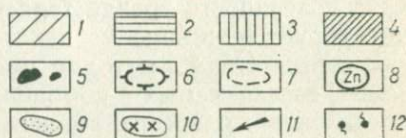
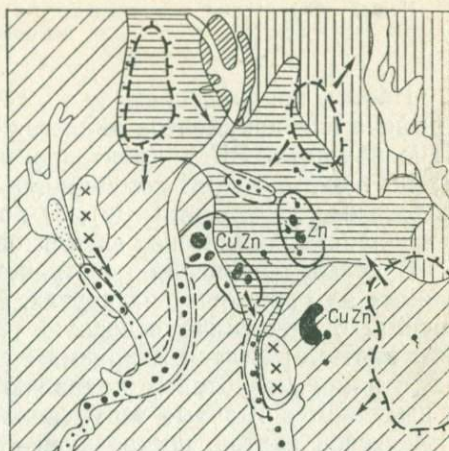


Рис. 21. Детальная гидрохимическая карта [20]

1 — туфы; 2 — известняки; воды азотные гидрокарбонатные с минерализацией 0,5—0,8 г/л; 3 — воды азотные гидрокарбонатно-хлоридные (0,6 г/л); 4 — воды азотно-кислородные гидрокарбонатно-сульфатные; подземные воды; 5 — области питания, 6 — направление движения, 7 — открытые очаги разгрузки, 8 — скрытые очаги разгрузки; 9 — гидрохимические ореолы; 10 — водоупорные фоновые и аномальные; 11 — прогнозируемая рудная залежь

Новым направлением в области составления геохимических графических документов является построение геохимических карт: 1) с помощью ЭВМ (поверхности тренда, многомерные поля); 2) по геохимическим ассоциациям элементов (литофильные, халькофильные, сидерофильные); 3) по так называемым «естественным ассоциациям химических элементов», и т. д.

С целью обобщения пространственных закономерностей, показанных на геохимических картах, составляются карты поверхности тренда, отражающие основную тенденцию геохимического поля. Эти карты относятся к приемам сглаживания геохимического поля, с помощью которых подавляются несущественные отклонения и выделяются главные черты поля. По сравнению с обычной геохимической картой, построенной по всем интервалам содержания, карта поверхности тренда теряет многие детали, но в то же время акцентирует внимание на некоторых закономерностях.

В соответствии с методом многомерных полей на геохимических схемах, составляемых с помощью ЭВМ, выделяются поля развития определенных классов химических элементов. Опубликованы примеры составления таких геохимических схем по результатам опробования речных потоков, склоновых рыхлых отложений и коренных пород [16]. В отличие от обычного ленточного способа изображения аномалий в потоках, методом многомерных полей выполняется интерпретация и в междуречных пространствах (рис. 22). Заслуживает внимания стремление многих авторов к построению геохимических графических документов, отвечающих геохимическим связям (ассоциации — литофильные, халькофильные, сидерофильные, магмогеохимические, седиментогеохимические и др.).

В настоящее время, учитывая опыт геофизиков, назрела необходимость составления карт геологической интерпретации аномальных геохимических полей. На таких картах, в отличие от выше рассмотренных геохимических основ карт прогноза, должны показываться не только продуктивные (рудные), но и петрогенные и ландшафтные аномальные геохимические поля. Изображение на картах этих аномальных полей повышает объективность интерпретации и оценки всех имеющихся геохимических материалов и обеспечивает возможность каждому читателю карты производить анализ ее независимо от автора. Карты геологической интерпретации аномальных геохимических полей составляются путем сравнения геохимических карт с геологическими, ландшафтными и петрографическими картами изучаемой площади. При этом выполняются следующие операции: сравниваются параметры аномальных полей с общими кларками химических элементов для определенных геологических образований; выясняются геологические и ландшафтные условия локализации аномальных полей конкретных ассоциаций химических элементов; оконтуриваются аномальные геохими-

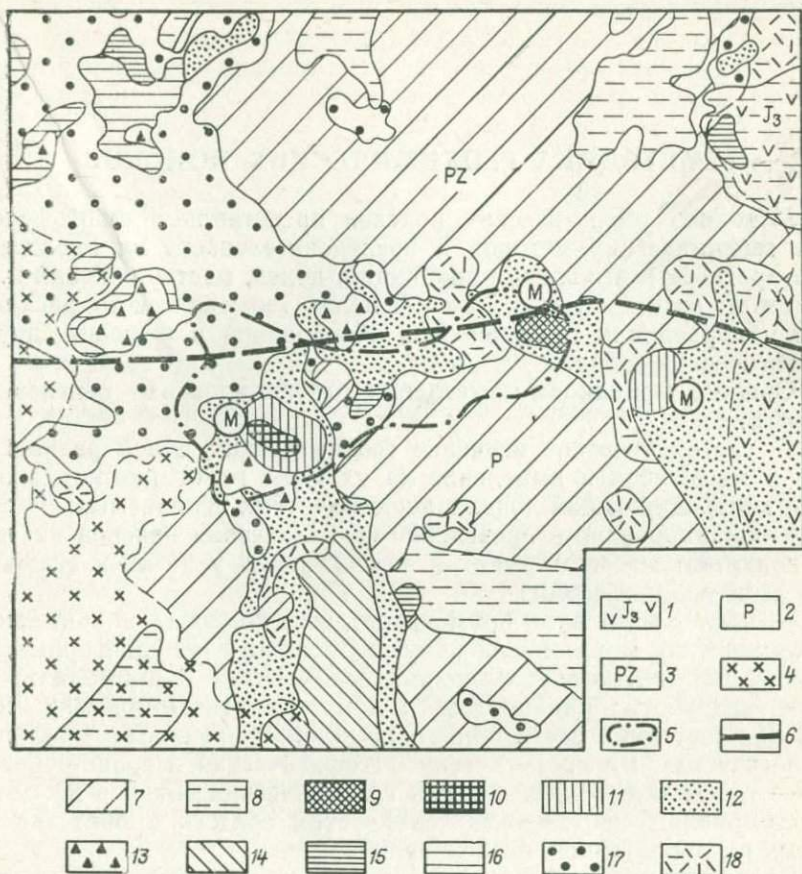


Рис. 22. Геохимическая схема (по потокам рассеяния) Хаткхарангинского района, составленная на ЭВМ методом многомерных полей [16]

1 — вулканиды; 2 — песчано-сланцевые породы P; 3 — сланцы PZ; 4 — гранодиориты T; 5 — скрытый контур гранитного интрузива; 6 — разлом. Геохимические классы: 7 — содержания ниже фона; 8 — для ряда элементов (Ag, Cu, Zn и др.) содержания ниже фона; 9 — W/10—130, Bi/19—20, Sn/14, As/10—12, Ag/5—8, Pb/3—4, Cu/3, Zn/2—3, Be/2, Li/2; 10 — Bi/56, Ag/19, As/10, W/8, Sn/8, Cu/8, Pb/4, Zn/4, Li/3, Y/2; 11 — Bi/7—26, Ag/7—28, Pb/3—6, Sn/2—3, Cu/2—4, Zn/2—2.5, As/1.4—2.2, Li/1.5—2; 12 — Ag/26—77, Pb/3—7, Bi/2—3, Y/2—4, Zn/2—4, Sn/1.8—2.3, Cu/1.7—2, Li/1.3—1.7; 13 — Ag/5—12, Pb/3—5, Bi/3—5, Sn/2—4, Zn/1.7—2.3, W/2—3, Li/1.4—2, Y/1.6—2; 14 — Ag/10—176, Sn/9—87, Bi/6—46, Pb/4—40, Zn/4—32, As/3—32, W/3—12, Cu/3—5; 15 — Y/5—30, La/3—13, Ag/2—17, Zr/2—5, Be/1.5—6; 16 — Ag/13—20, Y/4—6, La/3—3.4, Zr/2—3, Be/1.7, Cu/1.8—2.1; 17 — Ag/5—6, Y/2.2—2.3, Bi/2.1—2, Cu/4—1.8, W/1.8, La/1.7, Li/1.5; 18 — Ag/3—6, Bi/2—4, Pb/1.7—2.2, Cu/1.8—2, Zn/1—1.7, Sn/1.5. Фоновые содержания (в %): Sn — $3 \cdot 10^{-4}$, Pb — $1 \cdot 10^{-3}$, Zn — $3.7 \cdot 10^{-3}$, Cu — $2.4 \cdot 10^{-3}$, Ag — $3.4 \cdot 10^{-3}$, As — $3.4 \cdot 10^{-3}$, Bi — $1.6 \cdot 10^{-3}$, W — $5 \cdot 10^{-3}$, Be — $5 \cdot 10^{-3}$, Li — $3.8 \cdot 10^{-3}$, Y — $2 \cdot 10^{-3}$, Zr — $2 \cdot 10^{-2}$, La — $5 \cdot 10^{-3}$; M — местоорождение

ческие поля петрогенные, ландшафтные, продуктивные (рудные); выделяются участки для постановки поисковых работ в пределах перспективных продуктивных (рудных) аномальных геохимических полей.

МЕТОДИКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

Методика геохимических поисков представляет собой сочетание геохимических методов и последовательность их проведения для прогноза и выявления провинций, полей, месторождений и тел полезных ископаемых, а также в целях геохимического расчленения и корреляции геологических образований и решения других геологических задач.

Общими принципами методики геохимических поисков являются:

— систематическое изучение геохимических полей разных типов и масштабов и выделение на их фоне геохимических аномалий, контролирующей локализацию полезных ископаемых;

— планирование и проведение геохимических поисков на основе конкретных геологических и ландшафтных условий и стадийности выполняемых работ;

— последовательное применение дистанционных и контактных геохимических методов для получения данных о планетарных, региональных и локальных геохимических полях и аномалиях;

— разработка рационального комплекса геохимических методов как составной части общего комплекса поисковых методов — геологических, минералогических, геофизических и горно-буровых;

— повышение эффективности геохимических поисков на основе использования современных технических средств проведения полевых и лабораторных исследований.

Среди отмеченных принципов методики геохимических поисков большое значение имеет принцип планирования и проведения их на основе геологических и ландшафтных условий конкретных районов, площадей и участков с учетом стадии или подстадии работ.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ЛАНДШАФТНЫЕ УСЛОВИЯ ВЕДЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

Геологические условия определяются положением района в региональных тектонических структурах, типом осадочных, магматических и метаморфических формаций, а также ожидаемыми типами месторождений, выделяемыми по характеру создаваемых ими геохимических аномалий.

Для надежного выделения аномалий на фоне аномальных геохимических полей необходимо знать общий характер нормальных геохимических полей, типичных для определенных геологических полей.

На плитах с платформенным чехлом геохимические поля наиболее простые и характеризуют распределение химических элементов в плоскости преимущественно одного горизонта, свиты или толщи осадочных или вулканогенных пород (рис. 23, а). Геохи-

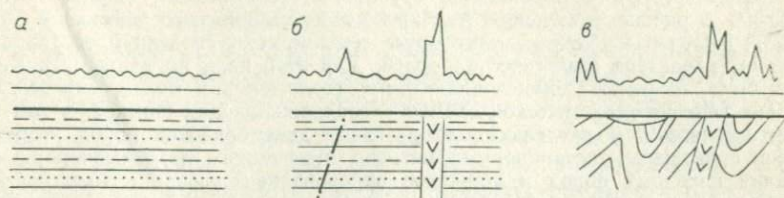


Рис. 23. Характер геохимического поля (график) в зависимости от геологического строения: на плитах с ненарушенным чехлом (а), с чехлом, пересеченным разрывными нарушениями и интрузивами (б), в складчатых зонах (в)

мическое поле будет более сложным на площадях развития секущих интрузивных или субвулканических тел, а также вдоль зон тектонических разрывных нарушений, пересекающих платформенный чехол (рис. 23, б). На щитах и в складчатом фундаменте древних платформ геохимическое поле характеризуется особой сложностью, требующей применения наиболее детальных исследований. В складчатых зонах фанерозоя структура геохимических полей изменяется в зависимости от степени обнаженности района, строения разреза вулканогенных и осадочных отложений, минералогеохимических особенностей интрузивных образований, наличия или отсутствия разрывных тектонических нарушений (рис. 23, в).

Таким образом, характер геохимических полей тесно связан с типами геологических полей, определяемых составом слагающих пород, тектоническими структурами, интрузивными образованиями.

На фоне региональных геологических полей выделяются геологические аномалии, связанные с месторождениями полезных ископаемых, которые имеют свои геохимические параметры. По характеру создаваемых геохимических аномалий месторождения полезных ископаемых подразделяются на ряд групп, указанных в табл. 3.

Выделенные группы месторождений отражают группировки химических элементов, в которых химические элементы, создающие отчетливые геохимические аномалии, относятся к низкокларковым элементам, а создающие неотчетливые геохимические аномалии — к высококларковым.

В целом для разработки методики геохимических поисков необходимы знания о характере геологических полей определенных объектов и соответствующих им геохимических полей и аномалий.

В новых районах предварительное прогнозирование типа геохимических полей и аномалий для разработки методики геохимических поисков может производиться на основании дешифрования

ния аэрофотоматериалов и аэрогеофизических и аэрогеохимических данных с последующим уточнением в процессе проведения наземных полевых работ.

Например, при осуществлении групповой геологической съемки масштаба 1:200 000 в районе сочленения Анабарского докембрийского массива с Тунгусской синеклизой Сибирской платформы геохимические поиски проектировались с учетом характера геологических полей. Для этой цели по данным В. К. Волкова была составлена обобщенная схема геологических полей, определяющих условия ведения геологической съемки и сопровождающих поисков, в том числе и геохимических. В пределах поля развития докембрийских пород рекомендовалось проведение дистанционных методов и наземного литохимического опробования коренных пород и шлиховое опробование аллювия. Поле развития осадочных отложений платформенного чехла, местами прорванного отдельными интрузивными телами щелочных — ультраосновных пород, должно быть обследовано дистанционными методами и наземным литохимическим опробованием аллювиальных потоков. В поле моренных отложений рационально применять гидрохимические поиски, так как литохимическое опробование в этих условиях не может дать определенных результатов.

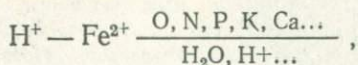
Геологические условия при разработке методики геохимических поисков являются наиболее важными и определяющими, однако знания их недостаточно для разработки рациональной методики геохимических поисков. Необходимо учитывать также и ландшафтные условия.

Принимая во внимание хорошо известные определения понятий о ландшафтах Б. Б. Полынова, М. А. Глазовской и А. И. Перельмана, можно дать определение «ландшафтного поля» по аналогии с другими видами полей.

Ландшафтное поле — это часть экзогенной зоны земной поверхности с определенным типом рельефа, горных пород, вод, почв и растительности, в пределах которой происходят миграция химических элементов и формирование геохимических полей и аномалий экзогенного типа. По масштабу проявления ландшафтные поля могут подразделяться на планетарные, региональные и локальные. Планетарные ландшафтные поля отражают климатические (термические, по [37]) пояса: тропические, субтропические, умеренно теплые, умеренно холодные, субарктические, арктические. Региональные ландшафтные поля соответствуют биоклиматическим зонам и провинциям, среди которых выделяются: арктические пустыни, тундры, лесотундры, тайга, лесостепи, полупустыни, пустыни, влажные тропики, субтропики, сухие тропики и субтропики.

В пределах отдельных типов ландшафтных полей А. И. Перельман выделил классы ландшафтов по особенностям водной миграции: кислые и кислые глеевые, карбонатные, кальциево-натриевые, солонцовые, гипсовые, содовые, соленосно-сульфидные. Кроме того, выделяются различные промежуточные классы. По соотношению типоморфных элементов и ионов, мигрирующих в ландшафтах, составляется геохимическая формула ландшафта, в числителе которой — элементы, дефицитные в ландшафте, в знаменателе — элементы, избыточные в ландшафте. Приведем пример геохимиче-

ской формулы ландшафта торфяных болот с кислым классом водной миграции:



где H, Fe — типоморфные элементы и ионы.

Региональные ландшафтные поля изображаются на специальных картах геохимических ландшафтов и картах районирования по ландшафтным условиям. Для территории СССР составлена под редакцией А. И. Перельмана «Карта геохимических ландшафтов СССР» в масштабе 1 : 20 000 000 (физико-географический атлас мира, 1964 г.), часть которой для подзоны средней тайги в пределах Европейской части СССР показана на рис. 24. В преде-

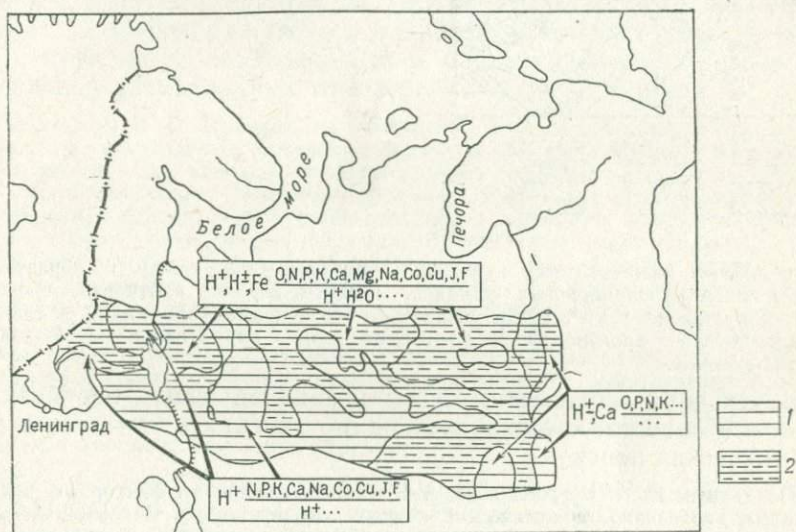


Рис. 24. Карта геохимических ландшафтов для подзоны средней тайги европейской части СССР.

Классы ландшафтов: 1 — кислый, 2 — кислый глеевый

лах крупных регионов СССР составляются карты геохимических ландшафтов и карты районирования по ландшафтным условиям ведения геохимических поисков. Примером такой карты является карта районирования по условиям ведения геохимических поисков Селенгинского среднегорья, составленная Т. Т. Тайсаевым (рис. 25).

В зависимости от типа региональных ландшафтных полей разрабатывается методика геохимических поисков. Рассмотрим некоторые примеры.

В районах влажных тропических ландшафтов ряда стран (Панама, Малайзия) рекогносцировочные геохимические поиски могут вестись по долинам рек, где можно передвигаться на лодках. Остальная территория покрыта густым лесным покровом и трудно проходима. По данным К. Лепетелье [18], опробо-

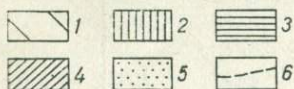
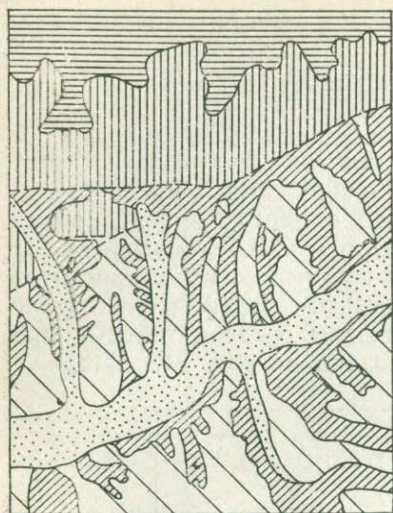


Рис. 25. Карта районирования Селенгинского среднегорья по ландшафтным условиям ведения поисков. По Т. Т. Тайсаеву.

Открытые районы, ландшафты: 1 — степные и лесостепные низкорослые, мощность рыхлых отложений 0,5–1,5 м; 2 — таежные среднегорные; 3 — полузакрываемые районы, таежные и подгольцовые, мощность рыхлых образований 2–3 м; закрытые районы: 4 — степные и лесостепные (3–20 м), 5 — луговые и лугово-болотные речных долин (10–30 м); 6 — разломы

вание донных аллювиальных отложений производилось главным образом из лодки, интервал опробования составлял 0,90 км, общая плотность опробования — 2 пробы на 1 км². После выделения геохимических аномалий в аллювиальном потоке производилось литохимическое опробование на локальном участке склонов.

В условиях тропических пустынь аридной зоны опробование имеет особенности, которые необходимо учитывать при проведении геохимических поисков.

По данным В. А. Бугрова и М. А.-К. Морси, основными факторами, осложняющими проведение геохимических поисков в пустынях Северной Африки, являются: разубоживание современных рыхлых образований золовыми песками, вызывающее необходимость выбора фракций опробуемого материала; слабое развитие почвенного покрова и ускоренное удаление рыхлого материала со склонов гор; резкое обогащение тяжелыми минералами аллювиально-делювиальных отложений и часто хорошая обнаженность коренных пород. С учетом изложенных факторов геохимические поиски на первом этапе осуществляются в виде литохимической съемки по сухим руслам (вади), где опробуются аллювиальные отложения потоков; плотность опробования — 1 проба на 1 км². Это может обеспечить выявление крупных месторождений, имеющих выход на современную эрозионную поверхность, так как геохимические потоки имеют эффективную протяженность от 1,5 до 15–18 км. На втором этапе проводится литохимическое опробование склоновых рыхлых отложений или коренных пород в зависимости от характера ландшафта. Наиболее универсальна фракция рыхлых отложений (–1 + 0,25 мм). Учитывая преобладание минеральной формы рассеяния рудного вещества, в этих условиях широко используется шлиховое опробование (предварительное и контрольное) для всех видов геохимического опробования.

Степные ландшафты характеризуются развитием рыхлых отложений аллохтонного типа, закрывающих иногда значительные территории. Для таких районов большое значение приобретает глу-

бинное литохимическое опробование по керну картировочных и поисковых скважин.

По данным Б. П. Алексева, в степных закрытых районах Южного Урала представительным горизонтом геохимического опробования является глинисто-щебенистый горизонт коры выветривания, залегающий на глубинах от 3—5 до 30—40 м и более от современной поверхности. Уверенно выявить этот горизонт можно только при глубинной литохимической съемке по керну скважин.

Поверхностная литохимическая съемка в степных районах должна осуществляться на обнаженных площадях. В связи с отсутствием в районах постоянных водотоков отпадает необходимость в литохимическом опробовании по аллювиальным потокам.

В условиях горно-таежных ландшафтов литохимический метод по аллювиальным потокам может дополняться специальным опробованием корочек гидроокислов железа и марганца на гальках и валунах. Для горно-тундровых ландшафтов этот метод исключается, но появляется необходимость в литохимическом опробовании элювиально-делювиальных отложений и коренных пород.

По данным В. В. Домчака, на Полярном Урале в горно-тундровых ландшафтах, где преобладают физические процессы выветривания, а современный рельеф относительно молодой, руды на выходах окислены слабо. Это обусловлено восстановительными (глеевыми) условиями в почвах и коре выветривания, возникающими благодаря близкоповерхностному залеганию многолетнемерзлых пород и обводненности рыхлых образований. Экзогенные ореолы в таких ландшафтах контрастны и локальны, а соотношение в них элементов близко к таковому в эндогенных ореолах и рудах. Поэтому геохимическое опробование элювиальных отложений может здесь отражать геохимические поля и аномалии в коренных объектах. Более сложными для разработки методики геохимических поисков представляются горно-таежные ландшафты Северного Урала. Здесь наблюдаются более отчетливые признаки химического выветривания и зоны окисления на рудных объектах. В пределах геохимических полей отмечается разделение химических элементов на отдельные ассоциации, различающиеся по условиям миграции в экзогенных условиях.

Для умеренно холодных таежных ландшафтов и субарктических тундровых ландшафтов, где развита многолетняя мерзлота, или криолитозона (криос — холод, лед), отмечаются и другие специфические особенности, которые необходимо учитывать при проведении геохимических поисков. По данным В. М. Питулько и С. Л. Шварцева, экзогенные геохимические поля и аномалии могут искажаться за счет так называемых криогенных дислокаций — бугров пучения, «медальонов» вымораживания и др. Эти образования создают мозаичность криогенных ландшафтов и требуют, по мнению авторов, «северного» варианта методики геохимических работ.

Близкими к субарктическим и умеренно холодным типам ландшафтов являются высокогорные ландшафты — горно-лесные, субальпийские, альпийские и нивальные.

В известных горнопромышленных районах методика геохимических поисков определяется характером не только природных, но и так называемых «культурных» ландшафтов (дороги, отвалы, стоки и т. д.), которые ограничивают или исключают применение некоторых геохимических методов — гидрохимических по поверхно-

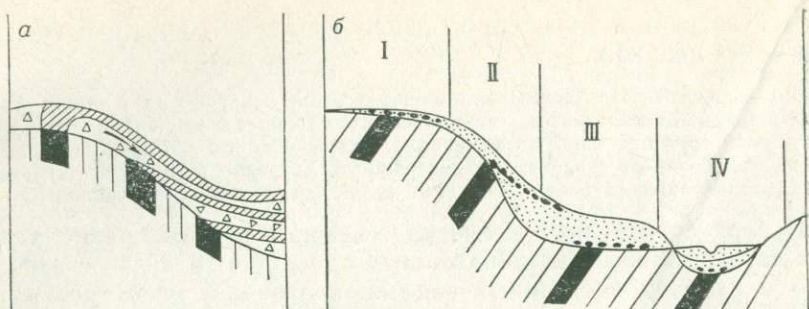


Рис. 26. Схемы положения экзогенных геохимических ореолов в элементарных ландшафтах склонов:

а — зависимость глубины залегания дефлюкционных ореолов от положения рудных тел на склоне [39]; б — типы элементарных ландшафтов (М. А. Глазовская и А. И. Перельман).

I — элювиальный (автономный), II — трансэлювиальный, III — супераквальный, IV — субаквальный

ственным водам, литохимических — по аллювиальным потокам, а иногда склоновым отложениям.

Локальные ландшафтные поля, являющиеся составной частью региональных ландшафтных полей, представляют собой сочетание элементарных ландшафтов. По определению Б. Б. Польшова, элементарный ландшафт — это один элемент рельефа, сложенный одной породой или рыхлыми отложениями и покрытый определенным растительным сообществом. По условиям миграции химических элементов М. А. Глазовская выделяет четыре группы элементарных ландшафтов: 1) элювиальный (автономный) — повышенных частей рельефа, 2) трансэлювиальный — склонов, 3) супераквальный (надводный) — нижних частей склонов с близким уровнем грунтовых вод, 4) субаквальный (подводный — местных водоемов (рек, озер). По данным А. И. Перельмана, различия между автономными, надводными и подводными ландшафтами заключаются в характере аккумулятивных процессов. В автономных они ограничиваются аккумуляцией из горных пород и атмосферы, а в надводных и подводных ландшафтах имеет место еще аккумуляция веществ из грунтовых и подземных вод.

Каждый тип элементарного ландшафта и их сочетание имеют специфические особенности развития минералогических и геохимических аномалий, связанных с месторождениями полезных ископаемых, и характеризуются различными возможностями применения отдельных геохимических методов.

Исследованиями В. В. Поликарпочкина [39] установлено, что на склонах формируются дефлюкционные геохимические ореолы и аномалии в связи с перемещением (течением) рыхлых отложений вниз по склону. При этом в зависимости от положения тел полезных ископаемых на склоне (рис. 26, а) могут возникать ореолы, выходящие на поверхность, и погребенные. Учитывая это, а также

вышеуказанные группы элементарных ландшафтов, можно привести обобщенную схему возможного положения геохимических ореолов в элементарных ландшафтах склонов (рис. 26, б). Эта схема показывает, что на участках развития элювиального ландшафта большое значение должно иметь литохимическое опробование по коренным породам и элювию. На участках трансэлювиального ландшафта может применяться литохимическое опробование рыхлых склоновых отложений под почвенным слоем. В нижних частях склона, где отмечается супераквальный ландшафт, литохимические пробы необходимо отбирать в основании рыхлых отложений, т. е. проводить глубинное геохимическое опробование, если мощность рыхлых отложений превышает 2—3 м. Здесь же возможно применение и гидрохимического метода по водным источникам, окаймляющим склон. В условиях субаквального ландшафта обычно используются метод опробования аллювиальных потоков, гидрохимический метод и глубинное опробование на участках широких долин, где предполагается наличие погребенного оруденения. Для разработки методики геохимических поисков в пределах локальных ландшафтных полей составляются карты (схемы) ландшафтных условий ведения поисковых работ.

Представляет большой интерес принцип районирования локальных и региональных ландшафтных полей по категориям трудности ведения геохимических поисков, предложенный В. И. Красниковым, Ю. В. Шарковым и А. С. Миляевым. В основу карт такого районирования положено выделение площадей с одинаковым расположением геохимических аномалий относительно дневной поверхности. При этом вводятся следующие понятия: «представительный горизонт», «достаточный поисковый уровень», «критическая мощность рыхлого покрова» (рис. 27, а).

Представительный горизонт — часть разреза рыхлых отложений, в которой экзогенные геохимические ореолы (аномалии) наиболее устойчивы.

А. Н. Еремеев [24], который впервые ввел это понятие, под «представительным горизонтом» для опробования подразумевал наиболее приближенный к дневной поверхности горизонт надежного и максимального площадного развития ореолов рассеяния. Достаточный поисковый уровень — поверхность в верхней части геохимического ореола (аномалии), достижение которого современными средствами возможно и достаточно для оценки наличия полезного ископаемого. Критическая мощность рыхлого покрова — максимальная мощность, рыхлых отложений, при которой фиксируются открытые, т. е. выходящие на поверхность геохимические ореолы (аномалии).

В. И. Красниковым и Ю. В. Шарковым выделены четыре категории площадей по трудности геохимического опробования: I категория — обнаженные площади с открытыми геохимическими ореолами (аномалиями), мощность рыхлых отложений меньше критической; II категория — площади с ослабленными у поверхности геохимическими ореолами (аномалиями), перекрытыми рых-

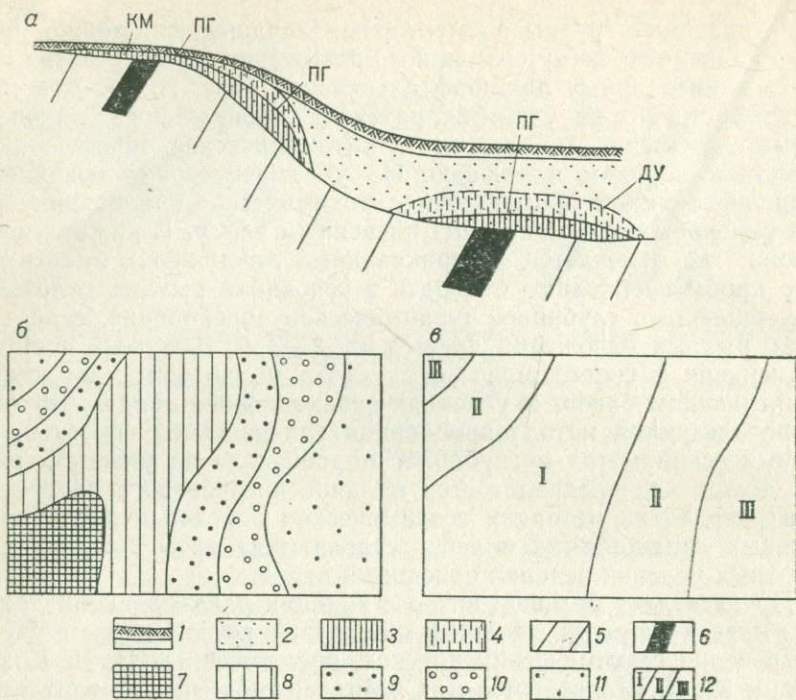


Рис. 27. Разделение ландшафтных полей по категориям трудности ведения геохимических поисков. По В. И. Красникову и Ю. В. Шаркову.

a — разрез, *б* — карта мощностей рыхлых отложений, *в* — карта районирования. 1 — почвенный слой, 2 — рыхлые отложения; экзогенные ореолы: 3 — контрастные, 4 — слабые; 5 — коренные породы; 6 — рудные тела; мощности отложений (в м): 7 — до 1,5, 8 — 1,5—2,5, 9 — 2,5—5,0, 10 — 5—10, 11 — 10—25; 12 — категории трудности ведения геохимических поисков; КМ — критическая мощность; ПГ — представительный горизонт; ДУ — достаточный поисковый уровень

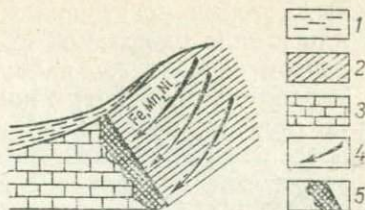
лыми отложениями, мощность которых несколько больше критической: III категория — площади с погребенными ореолами (аномалиями), перекрытыми рыхлыми отложениями мощностью 20—30 м; IV категория — площади с глубоко погребенными геохимическими ореолами (аномалиями), перекрытыми рыхлыми отложениями мощностью в десятки-сотни метров.

На основании карты мощностей рыхлых отложений (см. рис. 27, б) строится карта районирования по категориям трудности поисков (см. рис. 27, в).

При составлении ландшафтных карт и разработке геохимических поисков следует учитывать развитие не только продуктивных геохимических аномалий, связанных с полезными ископаемыми, но и ландшафтных геохимических аномалий, возникающих на геохимических барьерах. По данным А. И. Перельмана, в экзогенной зоне выделяются несколько типов геохимических барьеров. Кислые барьеры, возникающие при резком уменьшении pH; на них осаждаются аниогенные элементы — кремний, селен, молибден,

Рис. 28. Геохимический барьер (щелочной) на контакте бескарбонатных пород с известняками. По А. И. Перельману.

1 — делювий, 2 — бескарбонатные породы, 3 — известняки; 4 — направление движения вод, 5 — геохимический барьер



германий и др. Щелочные барьеры, образующиеся при резкой смене кислой среды на щелочную; при этом концентрируются железо, кальций, магний, марганец, барий, стронций, хром, цинк, медь, никель, кобальт, свинец, кадмий и др. Особо контрастные щелочные барьеры возникают на контакте силикатных и карбонатных пород (рис. 28). Характерны они и для зоны окисления сульфидных руд в известняках. Интересны двусторонние геохимические барьеры, образующиеся на участках встречной миграции вод. Известны сорбционные геохимические барьеры (например, на железо-марганцевых корочках), испарительные барьеры в солончаках и над уровнем подземных вод, сероводородные, глеевые и др. Все они имеют значение для разработки методики и интерпретации геохимических поисков.

Ландшафтно-геохимическое картирование для получения материалов при разработке методики геохимических поисков и принципов интерпретации геохимических полей и аномалий в зависимости от масштаба разделяется на обзорное, региональное и детальное (специализированное).

Обзорное картирование геохимических ландшафтов выполняется в масштабах 1:20 000 000 — 1:1 000 000 путем обобщения мелкомасштабных карт: космо- и аэросъемок, карт топографических, почвенных, геоморфологических, растительности.

Региональное среднемасштабное (1:200 000 — 1:50 000) ландшафтно-геохимическое картирование ведется с целью составления карт ландшафтно-геохимических и карт условий проведения геохимических поисков. Осуществляется геологосъемочными партиями попутно с геологической съемкой. Включает следующие этапы: предварительное картирование по данным дешифрирования аэрофотокарт, топокарт, почвенных, геоморфологических карт и других материалов; полевые ландшафтные наблюдения во время региональной съемки и предварительных поисков; дополнения и уточнения предварительных карт и составление варианта ландшафтно-геохимических карт и карт условий ведения геохимических поисков.

Детальное (специализированное) ландшафтно-геохимическое картирование (1:50 000, 1:25 000) выполняется специальными ландшафтными партиями и отрядами по следующим этапам: предварительное картирование на основе мелкомасштабных карт — ландшафтно-геохимических, топографических, аэрофотокарт, геологических и геоморфологических; полевые специализированные

работы, которые могут проводиться в виде профильных пересечений или в виде площадной съемки на эталонных участках. В том и в другом случаях эти работы ведутся путем проходки неглубоких выработок (0,5—2 м) с документацией всех компонентов ландшафта (порода, почва, кора выветривания, растительность, вода, мерзлота, рельеф, геохимические барьеры). В выработках ведется литохимическое опробование по отдельным горизонтам рыхлых отложений. На поверхности выполняется картирование границ

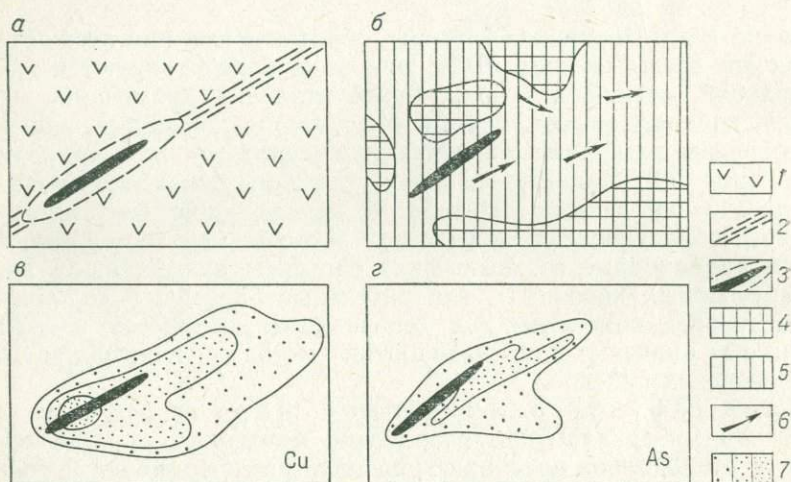


Рис. 29. Пример сводных графических документов, отражающих результаты геохимических поисков. По В. В. Домчаку.

а — схематическая геологическая карта, *б* — ландшафтная схема; *в* и *г* — карты геохимических ореолов. 1 — серпентиниты; 2 — разрывные нарушения; 3 — рудное тело; 4 — элювиальный ландшафт (щебень, глыбы); 5 — трансэлювиальный ландшафт (делювиальные отложения); 6 — направление сноса рыхлого материала; 7 — экзогенные геохимические ореолы

элементарных ландшафтов. По всем полученным данным полевых наблюдений и камеральной обработки составляются ландшафтно-геохимические карты и карты районирования территории (района, площади) по категориям трудности ведения геохимических поисков.

В геологических отчетах, где имеются разделы о результатах геохимических поисков, рекомендуется приводить сводную графическую документацию, в том числе схематическую геологическую карту, ландшафтную или ландшафтно-геохимическую карты, карты геохимического поля или геохимических аномалий (рис. 29).

Геологические и ландшафтные условия определяют рациональные комплексы геохимических и других поисковых методов. В процессе проведения геохимических поисков одни методы сохраняют свое значение длительное время, другие — применяются в ограниченных масштабах, третьи — не выходят из стадии экспериментов (рис. 30).

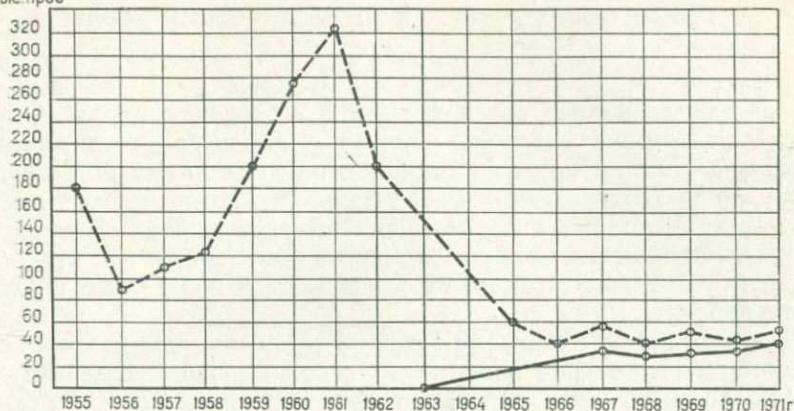
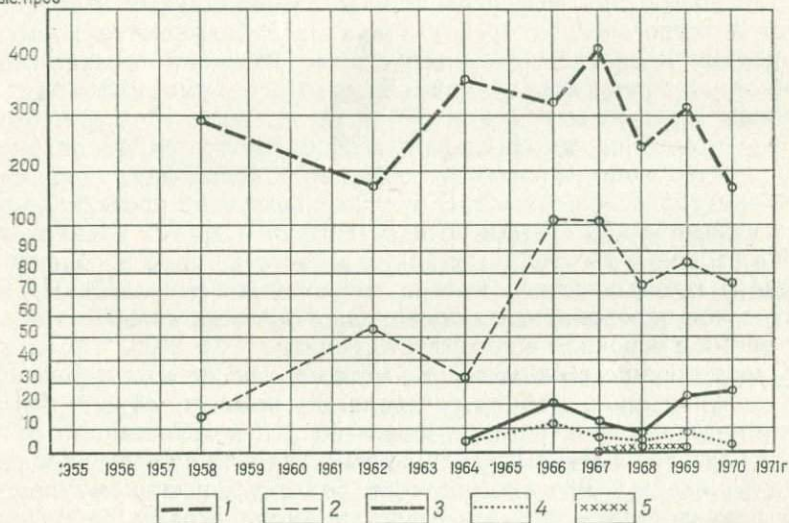
Тыс. проб **б**Тыс. проб **а**

Рис. 30. Диаграммы, отражающие применение различных геохимических методов в ПГО Дальгеология (а) и Башкиргеология (б). По Э. Г. Абисалову и В. В. Домчаку.

1—3 — литохимическое опробование: 1 — по рыхлым склоновым отложениям, 2 — по аллювиальным потокам, 3 — по коренным породам; 4 — гидрохимическое опробование; 5 — биогеохимическое опробование

Например, в ПГО Дальгеология в 1958—1964 гг. использовались два метода — литохимическое опробование по склоновым отложениям и по аллювиальным потокам. Затем начали применять литохимическое опробование по коренным породам и гидрохимический метод; предпринимались попытки использования биогеохимического метода. В ПГО Башкиргеология, ведущем работы в условиях закрытых районов Южного Урала, вначале активно использовалось литогеохимическое опробование по склоновым рыхлым отложениям (см. рис. 30, б), но в 1962—1963 гг. роль поверхностных геохимических съемок резко падает и отмечается рост объемов глубинного литохимического опробования по коренным породам и коре выветривания.

МЕТОДИКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ НА СТАДИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГЕОЛОГОСЪЕМОЧНЫХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ

Основной задачей геохимических методов на I стадии — стадии региональных геологосъемочных и геофизических работ — является подготовка исходных данных о характере геохимических полей и аномалий крупных регионов или отдельных районов для расчленения геологических образований и прогноза полезных ископаемых. Методика геохимических поисков определяется тектоническим положением района, степенью обнаженности, характером рельефа и ландшафта, а также масштабом и подстадией проводимости работ.

Для каждой из подстадий I стадии геохимические работы могут выполняться в опережающем или сопутствующем геологической съемке варианте. Эти работы предусмотрены в соответствующих инструкциях и указаниях.

Для повышения эффективности геологосъемочных и поисковых работ в геологических организациях разрабатываются новые модификации и совершенствуются старые методики геохимических поисков, дополняющие и развивающие основные положения инструкций и руководств.

На подстадии региональных геофизических работ опережающим дистанционным методом является площадная аэрогамма-спектрометрическая съемка. В будущем возможно проведение аэроатмогеохимической съемки по парам рутити и других элементов.

На второй и третьей подстадиях в качестве опережающего контактного геохимического метода может быть использовано литохимическое опробование аллювиальных потоков, которое в настоящее время в основном сопутствует съемке.

Опережающие геохимические методы, так же как и региональные геофизические работы, позволяют выявить общую картину геохимического поля региона или района и в зависимости от конкретных тектонических и ландшафтных условий дать ему предварительную оценку. Это способствует более эффективному проведению всех последующих геологических и поисковых работ.

Сопутствующими геологической съемке геохимическими методами на I стадии являются литохимическое опробование аллювиальных и элювиально-делювиальных склоновых отложений, коренных пород, а также гидрохимическое опробование.

При выполнении геологической съемки масштабов 1:200 000 и 1:50 000 в складчатых зонах горных районов обычно применяется систематическое литохимическое опробование аллювиальных потоков одновременно с шлиховым опробованием и выборочное литохимическое опробование коренных пород одновременно с геологическими наблюдениями по маршрутам (табл. 11).

Тектонические разрывные нарушения опробуются отдельно с целью изучения распределения химических элементов в возможных рудоконтролирующих зонах. В благоприятных ландшафтных условиях ведется гидрохимическое опробование, которое может

Таблица 11

Параметры сети литохимического опробования [25]

Масштаб	Расстояние между, км		Число проб
	потоками (профилями)	точками	

При опробовании по потокам

1:200 000	2	0,5	1
1:100 000	1	0,25	4
1:50 000	0,5—0,7	0,1—0,25	8

*При опробовании склоновых отложений
(по вторичным ореолам)*

1:50 000	0,5	0,05
1:25 000	0,25	0,05—0,04

опережать или сопровождать геологическую съемку. Параметры сети гидрохимического опробования определяются сложностью геологического строения. Например, для III категории сложности рекомендуется на 1 км² отбирать следующее количество проб: при масштабе работ 1:200 000—0,25; 1:50 000—2 и 1:25 000—4.

В степных открытых районах складчатых зон используется литохимическая съемка по элювиально-делювиальным рыхлым отложениям, которая сопровождает геологическую съемку масштаба 1:50 000. Сеть опробования 500×50 м. На закрытых площадях этих же районов ведется глубинное литохимическое опробование по сети 1000×100 м.

При групповой геологической съемке, являющейся в настоящее время главным видом геологосъемочных работ масштабов 1:200 000 и 1:50 000, геохимические поиски ведутся также в опережающем или сопровождающем вариантах. Опережающие геохимические поиски проводятся, например, партиями Александровской геохимической экспедиции с целью подготовки площадей для групповой геологической съемки масштаба 1:50 000. При этом ориентируются на выявление среднего или крупного месторождения, обнажающегося на поверхности. В связи с этим в предлагаемой методике вершины мелких ручьев, сухих русел и оврагов (распадов), относящихся к водотокам I и II порядков, не опробуются.

Для выполнения региональной литохимической съемки по аллювию в опережающем варианте в составе специализированной геохимической партии этой экспедиции выделялись 8 поисковых групп по два человека в каждой (ИТР и рабочий). Такая группа за сезон снимает 1000—1500 км² площади. Геологический осмотр участков выявленных аномалий выполнялся отрядом из 3—4 человек во главе с опытным геологом. Перед началом работ составлялась схема опробования площади. За каждой группой закреплялась полоса вдоль магистрального водотока, в пределах которой выделялись участки площадью по 100—150 км², которые обрабатывались группой с одной стоянки (примерно за

неделю). С одной стоянки на другую группа перемещалась с помощью вертолета, который арендовался партией на весь сезон (около 350 летных часов) на 10 тыс. км² (объем работы всей партии). Все перемещения групп согласовывались по радиосвязи. Группы обеспечивались радиостанциями типа «Карат». Для сокращения потерь времени при непогоде в 10—15 км от основных стоянок групп размещались металлические контейнеры (железные бочки с крышками) со всем необходимым (палатка, спальные мешки, продукты) для работы группы в течение 5—10 дней. При необходимости группа совершала пеший переход к такой базе и продолжала работу.

Подобная методика значительно повысила эффективность работ за счет резкого сокращения протяженности маршрутов (на 45 %) и повышения производительности труда. В итоге экспериментальных работ около 20 % изученной территории рекомендовано для проведения групповой геологической съемки масштаба 1:50 000, 5—6 % — для оценки геохимических аномалий, 2 % — для детальных поисков.

В закрытых районах платформ (плит) и складчатых зон геохимические методы используются при проведении 4-й подстанции I стадии геологоразведочных работ — глубинного геологического картирования. В пределах плит применяется главным образом литохимическое опробование керна структурных, поисковых и других скважин. Этот метод можно назвать литохимическим каротажем. Он проводится как по отложениям осадочного платформенного чехла, так и по породам фундамента. В некоторых случаях производится гидрохимический каротаж, существенно дополняющий комплекс геохимических исследований для выявления аномалий легкоподвижных элементов. Большое значение имеет контактно-дистанционный геохимический каротаж скважин с помощью ядернофизических приборов.

В закрытых районах складчатых зон с мощным покровом рыхлых четвертичных и неогеновых отложений глубинное геологическое картирование также сопровождается геохимическими исследованиями.

Для закрытых районов развиваются два направления в методике геохимического опробования.

Первое направление включает: 1) бурение картировочных или специальных скважин по сети, которая соответствует масштабу глубинного геологического картирования (например, для масштаба работ 1 : 50 000 эта сеть составляет 1000 × 250 м), глубина бурения определяется мощностью рыхлых отложений и проходкой 15—20 м по коре выветривания или коренным породам; 2) литохимическое опробование керна нижней части рыхлых отложений или верхней части коры или коренных пород; 3) выделение погребенных аномальных зон, перспективных для поисков месторождений определенных полезных ископаемых.

Второе направление [41] включает: 1) поверхностную литохимическую съемку подпочвенного слоя с глубины 20—40 см (сеть опробования для масштаба работ 1 : 50 000—500 × 50 м); 2) выделение слабых геохимических аномалий специальными анализами проб или математической обработкой данных спектральных анализов; 3) глубинную литохимическую съемку по 2—3 профилям на выявленных поверхностных аномалиях; 4) площадную глубинную

съемку на перспективных погребенных аномалиях. При этом ориентируются на выявление крупных погребенных месторождений, для которых предполагается проявление заметных геохимических аномалий на поверхности «через фильтр» покрова рыхлых отложений.

Сопоставление указанных направлений с данными их практического применения показывает, что второе направление имеет серьезные недостатки. Как отмечают В. М. Вильдяев и А. Н. Сайгаков [17], проведение поверхностных литохимических съемок в закрытых районах нецелесообразно, так как здесь выявляется большое число контрастных ландшафтных и техногенных геохимических аномалий в почвах. Первое направление — глубинного геохимического опробования закрытых районов является более эффективным, простым и надежным. В настоящее время это стало особенно очевидным, когда начали применять высокопроизводительный буровой комплекс ГКГ-100 и выполнять предварительный анализ геохимических проб непосредственно в поле с помощью рентгено-радиометрического анализа (РРА) на сумму химических элементов-индикаторов. По данным И. Ф. Мясникова и Ю. И. Кривопалова [17], производительность бурения таким комплексом возросла.

МЕТОДИКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ РАБОТ НА СТАДИИ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Стадия поисков месторождений полезных ископаемых подразделяется на три подстадии: общих поисков, детальных поисков и поисково-оценочных работ. В соответствии с целями и задачами этих подстадий разрабатывается методика работ и, в частности, методика геохимических поисков. В отличие от I стадии региональных исследований, когда ведутся предварительные поиски всех видов твердых полезных ископаемых, на II (поисковой) стадии работы ориентируются на определенный вид или ассоциацию полезных ископаемых, наиболее характерных для данного района и ожидаемых в пределах аномальных полей.

Общие поиски осуществляются на готовой геологической основе масштаба 1 : 50 000 (1 : 25 000) или 1 : 200 000 на площадях ранее выделенных аномальных геологических, минералогических, геофизических и геохимических полей. Цель этих работ — выявление участков для постановки детальных поисков.

В зависимости от конкретных геологических и ландшафтных условий района на подстадии общих поисков используются поверхностный или глубинный варианты геохимического опробования. Рациональный комплекс геохимических методов выбирается с учетом характера и отчетливости геохимических аномалий, создаваемых ожидаемым объектом поисков.

Параметры сети геохимического опробования при общих поисках включают ориентировку и плотность сети. При выполнении литохимического опробования ориентировка поисковой сети обу-

словлена формой аномальных геохимических (или других) полей. Она может быть линейной, изометрической или промежуточной. При линейной форме аномальное геохимическое поле пересекается профилями геохимического опробования вкрест простирания длинной оси. Для изометрического поля профили могут быть ориентированы в разных направлениях, но с учетом геологического строения площади.

Плотность сети геохимического опробования определяется в основном масштабом геологической карты площади, на которой выполняются эти работы. При этом в одних случаях разбиваются специальные профили для опробования, в других — опробование выполняется по маршрутам часто сложной конфигурации, зависящим от рельефа, обнажений коренных пород и пр.

Рассмотрим некоторые примеры методики литохимического опробования на подстадии общих поисков сначала для районов открытых, затем — закрытых.

Пример 1. Горный район с удовлетворительной обнаженностью, сложен вулканогенно-осадочными отложениями верхнего мела, прорванными интрузивными телами гранодиоритов, диоритов, граносиенитов, с которыми предполагается парагенетическая связь золотого оруденения. По данным регионального литохимического опробования аллювиальных отложений водотоков выявлены геохимические потоки спутников золота — серебро, свинец и другие элементы. На основании их пространственного положения оконтурены аномальные геохимические поля изометричной или овальной формы, приуроченные к экзоконтактным зонам интрузивных тел. В пределах этих аномальных полей проведены общие поиски с применением геохимического опробования: 1) по рыхлым склоновым отложениям по сети 500×50 м, ориентировка профилей северо-западная; 2) литохимическое опробование коренных пород по линиям геологических маршрутов; 3) отбор минералогических проб-протокочек. В итоге составлены геохимические карты, на которых оконтурены аномалии спутников золота, которые были выявлены и в аллювиальных потоках. В последних золото не обнаружено и потому не оконтурены его потоки в аллювии. Однако в склоновых отложениях аномальных полей установлены отдельные пробы с повышенными содержаниями золота. Площади с наиболее значительными содержаниями золота и выдержанными аномалиями его спутников рекомендованы для постановки детальных поисков.

Пример 2. Закрытый район северо-западной части Рудного Алтая. Мощность рыхлых отложений в среднем около 100 м, подземные воды представлены верховодкой (минерализация воды 13,5—18,9 г/л, воды сульфатно-хлоридные магниевые-натриевые) и водами в коренных породах (минерализация 4,7—6,5 г/л). На основании глубинного геологического картирования I стадии работ, которые сопровождался литохимическим опробованием кернa картировочных скважин по сети 2000×800 и 2000×1000 м, выявлена перспективная зона (аномальное поле), погребенная под рыхлыми отложениями в коренных породах. В пределах этой зоны поставлены общие поиски с бурением скважин по сети 400×200 м для выявления свинцово-цинкового оруденения. Литохимическое опробование велось пунктирной бороздой по всему разрезу пород в керне; средняя длина опробуемого интервала 5—6 м, по однородным породам 7—10 м, по зонам гидротермального изменения в коренных породах 1—3 м.

Детальные поиски проводятся на перспективных участках аномальных полей, где оконтурены отчетливые аномалии — геохимические, минералогические или геофизические. Масштаб этих работ соответствует 1:10 000, 1:5 000 и 1:2 000 в зависимости от размеров участков и возможных размеров ожидаемых объ-

ектов поисков. Геохимические поиски осуществляются главным образом в виде площадной съемки, параметры сети которой соответствуют масштабу работ. Однако и здесь могут быть применены профильные пересечения, дополняющие ранее выполненные исследования при относительно простом геологическом строении участков. В зависимости от геологических и ландшафтных условий геохимические поиски могут проводиться в поверхностных или глубинных вариантах (при хорошей обнаженности — по коренным породам). Литохимическое опробование проводится в комплексе с другими поисковыми методами — минералогическими, геофизическими и горно-буровыми, что позволяет достигнуть необходимой экономической и поисковой эффективности работ.

Поисково-оценочные работы проводятся на участках с установленными проявлениями полезных ископаемых, выходящими на поверхность или скрытыми на глубине. Основная задача этих работ — предварительная оценка проявлений полезных ископаемых с целью выбора объектов, заслуживающих предварительной разведки. Большое значение здесь имеют горно-буровые методы и опробование. Геохимические методы используются в общем комплексе методов. Значение их неодинаково для различных видов полезных ископаемых и разных типов месторождений. Главным геохимическим методом на этой подстадии остается литохимическое опробование коренных пород, которое выполняется путем отбора проб по горным выработкам (канавам, траншеям, шурфам) и керну буровых скважин.

Рассмотрим примеры использования литохимического метода на подстадии поисково-оценочных работ для некоторых типов месторождений.

Пример 1. Гранитный интрузив мезозойского возраста, содержащий рудопроявления олова и вольфрама; вмещающие породы представлены вулканогенно-осадочными отложениями палеозоя. Поисково-оценочные работы выполнялись путем проходки шурфов по сети 50×50 м и бурения одиночных скважин до глубины 100—150 м. Литохимическое опробование проведено по коренным породам в шурфах и по керну скважин. В шурфах пробы отбирались по системе конверта — четыре по углам и одна в центре (одна объединенная проба). Интервал опробования керна 1 м, так как разрез весьма сложный: чередование участков измененных гранитов, прожилков различного состава, грейзеновых тел. Литохимическое опробование сопровождалось минералогическим опробованием: были взяты пробы-протоочки в тех же точках.

По результатам спектральных и минералогических анализов проб были составлены геохимические и минералогические карты и колонки элементов и минералов-индикаторов — главных и спутников, позволившие оценить отдельные рудопроявления и интрузивы в целом в отношении оловянно-вольфрамового оруденения.

Пример 2. Закрытый район, степной ландшафт. Скрытые медноколчеданные рудопроявления располагаются на значительной глубине от поверхности в породах палеозоя. По данным Б. П. Алексева, при поисково-оценочных работах глубинное литохимическое опробование и поверхностные геофизические работы выполняются одновременно. При этом объем шнекового бурения, который был значительным при детальных поисках, уменьшается, а объем колонкового бурения увеличивается (до 25—30 % от общего объема работ). Сеть бурения становится более плотной: до $(250—200) \times 100$ м в эпицентрах комплексных геохимических и геофизических аномалий, прогнозируемых погребенных и неглубоко

Пример рекомендуемой методики поисков полиметаллических

Подстадии поисковой стадии	Цели	Задачи
Общие поиски	Выявление объектов для проведения детальных поисков	Поиски рудопроявлений, выходящих на поверхность, а также прямых и косвенных признаков скрытого оруденения (геохимические и геофизические аномалии, ореолы измененных пород); перспективная оценка изучаемой площади, выделение перспективных участков
Детальные поиски	Выявление объектов для постановки поисково-оценочных работ	Детальные поиски на перспективных участках. Изучение основных параметров геохимических и геохимических аномалий, их интерпретация и окончательная оценка, уточнение минералого-геохимического типа и уровня эрозионного среза оруденения. Подготовка технико-экономических соображений о дальнейшем изучении объектов
Поисково-оценочные работы	Выбор и оценка объектов, заслуживающих предварительной разведки	Вскрытие, опробование коренного оруденения и предварительная оценка его промышленного значения; подсчет прогнозных ресурсов P_1 и запасов категории C_2 . Подготовка технико-экономического обоснования необходимости передачи объекта в предварительную разведку

Таблица 12

месторождений для одного из районов. По Г. И. Хорину

Методы		Основные результаты
Открытые и полуоткрытые площади	Закрытые площади	
<p>Уточнение имеющихся геологических карт масштаба 1:50 000. Гравиметровая съемка 1:50 000</p> <p>Литохимическая съемка по рыхлым отложениям и коренным (опробование обнажений) породам (сеть 500×50 м)</p>	<p>Глубинные литохимические поиски по отдельным профилям с шагом 100—200 м (60—70 % числа скважин вскрывают кору выветривания, а 30—40% — коренные породы на глубину 10—15 м). Электроразведка МПП с различными размерами петель (по профилям глубинных литохимических поисков).</p> <p>Гидрохимические поиски</p>	<p>Карта прогноза масштаба 1:50 000 с выделенными перспективными участками для постановки детальных поисков и рекомендациями по их изучению</p>
<p>Геологическое картирование в масштабе 1:10 000</p> <p>Литохимическая съемка по коренным породам (сеть 100×25 м). Горные работы и бурение неглубоких скважин</p> <p>Электроразведка МПП с петлями 400×400 м, при детализации петлями 200×200 м, 100×100 м, 50×50 м и магнитопримной рамкой. Метод заряженного тела.</p> <p>Наземные магнитные съемки масштаба 1:25 000—1:10 000 (для целей картирования).</p> <p>Бурение единичных глубоких поисковых скважин. Скважинные варианты методов электроразведки (КСПК, МПП, МЗ ПС, КС, ВП)</p>	<p>Глубинное геологическое картирование в масштабе 1:25 000 — 1:10 000</p> <p>Глубинные литохимические поиски (сеть 400—20×100—50 м)</p>	<p>Карта прогноза масштаба 1:25 000 — 1:10 000 с выделенными участками для постановки поисково-оценочных работ, с указанием мест заложения рекомендуемых скважин и ориентировочной глубины залегания ожидаемого оруденения</p>
	<p>Геохимическое опробование скважин и горных выработок. Поисково-оценочное бурение, поверхностные горные работы. Скважинные варианты методов электроразведки (МЗК, радиоволновое просвечивание)</p>	<p>Детальная карта прогноза с разрезами масштаба с: 10 000 — 1:5 000 и выделенными объектами для предварительной разведки</p>

залегающих слепых залежей и до 100×50 м на аномальных зонах прогнозируемых глубоко залегающих колчеданных залежей. По материалам этих работ бурятся глубокие единичные скважины, в которых выполняются геохимические и геофизические каротажные исследования. В случае положительной оценки минерального состава оруденения, содержания металлов и прогнозных ресурсов выявленные объекты рекомендуются для постановки предварительной разведки.

Методика геохимических поисков, применяемая на отдельных подстадиях II стадии работ, является составной частью общей методики поисковых работ, которая определяется конкретными геологическими и ландшафтными условиями [38]. Особенности рациональной методики работ для отдельных подстадий поисковой стадии и место в ней геохимических исследований показано на схеме, разработанной для конкретного типа районов и месторождений (табл. 12).

МЕТОДИКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ РАБОТ НА СТАДИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ДЕТАЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ

Задачами этих стадий являются промышленная оценка и подготовка месторождений к эксплуатации. Геохимические исследования на этих стадиях играют вспомогательную роль и применяются для обеспечения полноты изучения месторождений на поверхности и на глубине; выявления основных параметров первичных (для рудных месторождений — эндогенных) геохимических ореолов; оконтуривания флангов и глубинных частей месторождений; поисков скрытых тел полезных ископаемых.

В методике геохимических исследований большое значение приобретает метод литохимического опробования коренных пород. Дополнительными могут быть другие геохимические методы — гидрхимический, атмосферический. Начинают внедряться контактно-дистанционные методы каротажа скважин — радиогеохимические и ядерногеохимические.

Использование геохимических методов для полноты изучения месторождений при разведке заключается в геохимическом опробовании полезного ископаемого с целью определения всех химических элементов, часть из которых может быть элементами-индикаторами в геохимических ореолах [2]. Изучение последних проводится для определения возможности их использования при дальнейших поисках скрытых тел в процессе эксплуатационной разведки и при поисках подобных месторождений в смежных районах.

Методика литохимического опробования разведочных пересечений в целом сходна для поверхностных и подземных выработок и буровых скважин. Буровые скважины опробуются по керну, горные выработки — по полотну (канавы), забою (шурфы, штреки) и стенкам (квершлагги, расчески, орты). Линия опробования ориентируется вкрест простирания известных или предполагаемых тел полезных ископаемых.

Значение геохимического опробования при разведке неодинаково для различных по морфологии и распределению полезных компонентов месторождений. Среди них могут быть выделены две

группы: месторождения с четкими контактами тел полезных ископаемых и месторождения с нечеткими (расплывчатыми) границами промышленных тел.

По времени осуществления геохимическое опробование при разведке следует подчинить сроку подготовки материалов для составления ТЭД (при предварительной разведке) или сроку утверждения запасов в ГКЗ СССР (при детальной разведке).

На месторождениях с четкими (контрастными) контактами тел полезных ископаемых, включающих пегматиты с редкометальным оруденением, кварцевые жилы с золотом, оловом и другими металлами, баритовые жилы, хромиты и др., геохимическое опробование позволяет оконтурить геохимические ореолы в зонах, прилегающих к телам полезных ископаемых. Для этой цели отбор геохимических проб производится во вмещающих породах по линиям вкрест простирания главных объектов. Этими линиями являются канавы, траншеи, квершлагги, орты, рассечки, штольни (квершлагжные) и буровые скважины. Таким образом, общая сеть геохимического опробования определяется, с одной стороны, расположением разведочных пересечений, а с другой — величиной интервала отбора проб по линиям этих пересечений.

Принципиальная схема литохимического опробования жильных месторождений приведена на рис. 31. На поверхности отбираются геохимические пробы по канавам, на глубине — по подземным выработкам и скважинам, которые бурятся из этих выработок или с поверхности. При разведке жильных месторождений в условиях горного рельефа геохимические пробы отбираются по полотну канав и стенкам штольневых горизонтов. Эта общая сеть геохимического опробования позволяет выявить и оконтурить ореолы элементов-индикаторов рудных тел в разрезе и в плане. Кроме того, могут быть составлены графики распределения содержания элементов-индикаторов, а также графики зависимости распределения содержаний от пористости и других физико-механических свойств вмещающих пород. Для определения последних отбираются специальные пробы в точках геохимического опробования.

При разведке залежей сульфидных руд с отчетливыми контактами особое внимание обращается на литохимическое опробование тектонических зон с рассеянной минерализацией, которые могут иметь значение как признаки прогнозируемого скрытого сплошного сульфидного оруденения. В пределах этих зон, фиксируемых, например, по керну скважин, должны отбираться геохимические пробы по сокращенным интервалам в сравнении с участками вмещающих пород, где такие зоны отсутствуют. Такая же методика опробования применяется и вблизи рудных тел при изучении сопровождающих их ореолов. Геохимическое опробование ведется с обязательной документацией керна и горных выработок. После получения результатов анализов геохимических проб по первым разведочным пересечениям методика опробования может уточняться и дополняться.

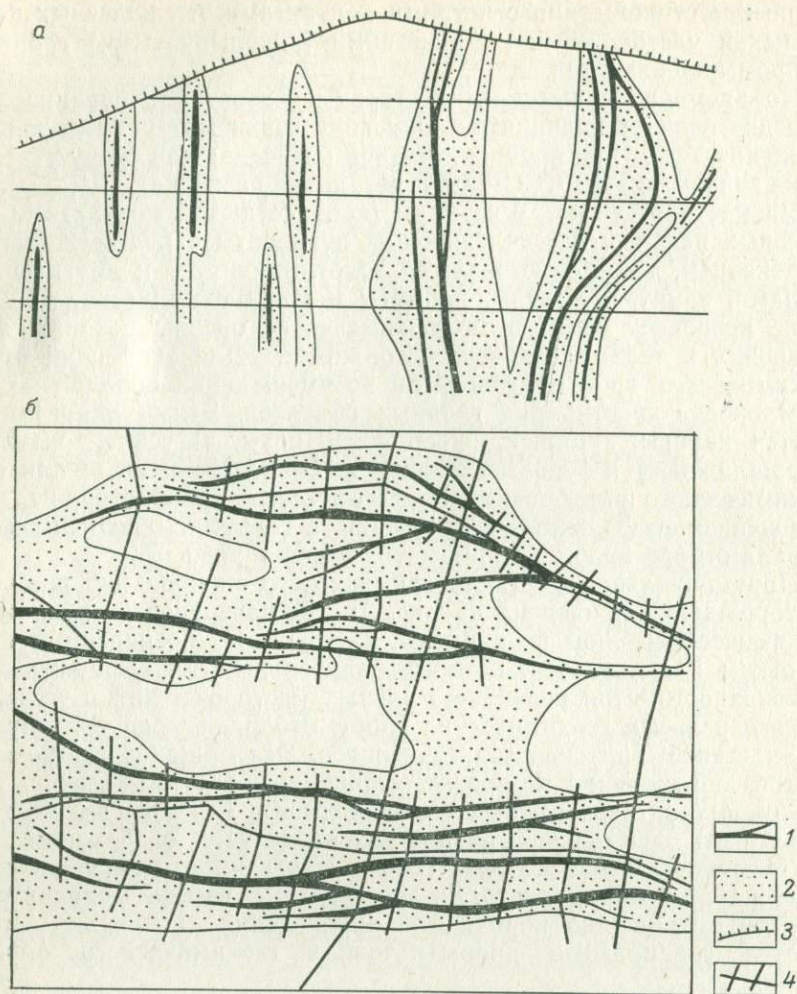


Рис. 31. Схемы литохимического опробования жильного месторождения и геохимические ореолы на разрезе (а) и в плане (б). По Б. Г. Безирганову.
 1 — рудные жилы; 2 — ореолы; профили литохимического опробования: 3 — на поверхности, 4 — в подземных выработках

Например, по данным В. И. Сафронова, на месторождении скарново-полиметаллических руд при литохимическом опробовании вначале был принят интервал опробования от 2 до 10 м с уменьшением интервала при подходе к рудным телам, разрывным нарушениям и контактам пород. В дальнейшем, когда было установлено, что эндогенные ореолы имеют ширину от 25 м на одном месторождении до 50 м на другом, методика изменялась. При этом была учтена также необходимость освещения ореола пятью пробами, что требуется для расчета коэффициентов корреляции. Это изменение выразилось в том, что оптимальным для опробования был выбран интервал 5 м для первого месторождения и 10 м для второго.

В месторождениях с нечеткими (распльвчатыми) границами промышленных тел полезных ископаемых геохимические ореолы переходят постепенно из вмещающих пород в собственно промышленные тела. При этом использование геохимического опробования необходимо не только для оконтуривания ореолов, но и самих тел полезных ископаемых. Представителями этой группы месторождений являются стратиформные месторождения меди, свинца и цинка, а также стратиформные месторождения меди, молибдена, олова, вольфрама и других руд, медно-никелевые месторождения в базитах и гипербазитах (вкрапленные руды), карбонатитовые месторождения редких элементов, месторождения силикатно-никелевых руд, месторождения германия в углях и др.

Рассмотрим некоторые примеры методики литохимического опробования при разведке месторождений этой группы.

Стратиформное месторождение свинцово-цинковых руд в карбонатных породах в одном из районов Северного Вьетнама. По данным Нгуен Ван Биня, литохимическое опробование керн скважин здесь позволяет выделить зону вкрапленного оруденения и геохимические ореолы вокруг рудных тел с более значительными содержаниями сульфидов. Опробование проводилось с интервалом 5 м, в зонах видимой сульфидной минерализации через 2 м. Одновременно отбирались образцы для микроскопического изучения измененных пород, ореолы которых были показаны на минералогическо-геохимических колонках по скважинам (рис. 32).

Штокверковые меднопорфировые, молибденовые, оловянно-вольфрамовые месторождения оконтуриваются на поверхности с помощью литохимического опробования еще на подстадии поисково-оценочных работ. Затем на стадиях разведки этот вид опробования способствует оконтуриванию промышленных тел среди гео-

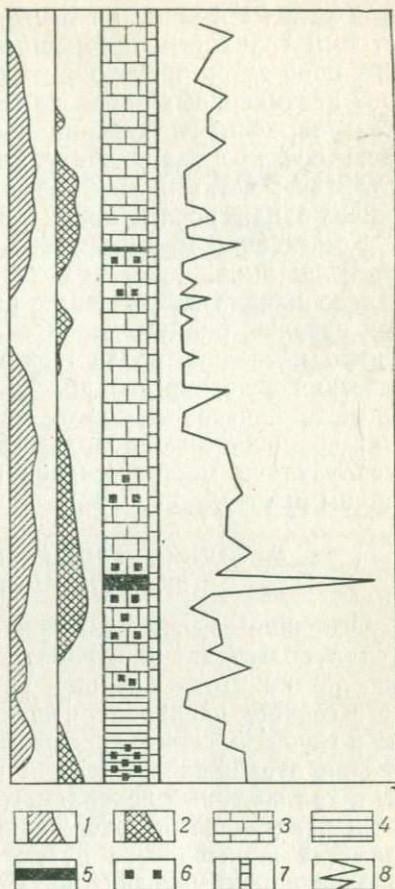


Рис. 32. Минералогическо-геохимическая колонка по скважине, вскрывшей свинцово-цинковые руды стратиформного типа. По Нгуен Ван Биню.

Интенсивность гидротермального изменения пород: 1 — доломитизация; 2 — окварцевания; 3 — доломиты; 4 — сланцы; 5 — свинцово-цинковые руды; 6 — вкрапленные сульфиды; 7 — литохимические пробы; 8 — график содержания свинца

химических ореолов при проведении буровых работ. В связи с нечеткими границами промышленного оруденения отбор геохимических проб здесь производится по разведочным пересечениям в сторону неизменных пород до появления содержаний основных компонентов, соответствующих нормальному геохимическому полю. Геохимическое опробование на этих объектах, так же как и на объектах с четкими границами тел, выполняется в сопутствующих разведке или последующих (завершающих разведку) вариантах.

Эффективность геохимических работ на стадиях разведки определяется: выявлением новых тел полезных ископаемых, неизвестных до начала разведочных работ; детальным изучением первичных ореолов, окаймляющих тела полезных ископаемых, или выделением последних среди геохимических ореолов; изучением геохимических особенностей полезного, необходимого для обоснования подсчета запасов и определения общих перспектив месторождения; возможностью использования всех получаемых данных при эксплуатации месторождения и поисках новых месторождений в данном районе.

МЕТОДИКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ РАБОТ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ

Основная задача разведочных работ на этой стадии заключается в подготовке к отработке разведанных блоков месторождения, а также в дальнейшем расширении сырьевой базы действующего горного предприятия за счет выявления новых тел на флангах и глубоких горизонтах месторождения.

При отработке карьерами месторождений с нечеткими границами тел полезных ископаемых выделение объемов руды с различными показателями содержаний полезных компонентов и вредных примесей производится путем экспресс-анализов проб, взятых из эксплуатационных скважин. По результатам анализов этих проб, которые можно рассматривать и как геохимические, строятся сортовые планы, планы отработки, являющиеся основой для разделения добываемого при эксплуатации сырья. В этих условиях методика опробования предусматривает применение различных видов анализов (спектральных, радиометрических, ядернофизических) в зависимости от вида полезного ископаемого и содержащихся в нем химических элементов. Эта методика опробования подчинена методике эксплуатационной разведки и сопутствует ей, опережая процесс отработки руд.

На месторождениях с четкими контактами тел полезных ископаемых геохимические методы в процессе эксплуатации ориентированы на выявление первичных геохимических ореолов или их продолжений, параметры которых позволяют прогнозировать наличие новых скрытых рудных тел на флангах или на глубоких горизонтах месторождения. Методика геохимических исследований и здесь сводится к сочетанию литогеохимического опробования коренных пород в подземных или поверхностных выработках и скважинах [35].

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ОЦЕНКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА И ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Интерпретация геохимического поля — это генетическое объяснение (толкование) наблюдаемых закономерностей распределения содержаний химических элементов в пределах конкретной части одной из геосфер — литосферы, гидросферы, атмосферы, биосферы.

Оценка геохимического поля и аномалий — качественное и количественное выражение возможной их связи с проявлениями и месторождениями полезных ископаемых.

Для интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий используется совокупность определенных данных — геохимических, минералогических, геологических, ландшафтных, математических. Объем этих данных и их соотношение, а также значение данных для интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий изменяются в зависимости от объекта исследования и стадии выполняемых геологоразведочных работ.

В вопросах интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий имеют место определенные направления, разработка которых осуществляется отдельными исследователями или целыми коллективами. По значительному числу опубликованных монографий, сборников и статей выделяется направление интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий, связанных с эндогенными месторождениями. В пределах этого направления разрабатываются, например, такие вопросы: энергетический анализ геохимических полей [42], количественные исследования геохимических полей и аномалий [10, 43, 22], интерпретация и оценка первичных (эндогенных) геохимических ореолов и аномалий эндогенных месторождений [31, 32], изучение и интерпретация вторичных (экзогенных) ореолов и аномалий, связанных с эндогенными месторождениями [39, 41], интерпретация и оценка гидрохимических аномалий, связанных с эндогенными месторождениями [20], интерпретация атмосферических аномалий [47, 48].

Значительно меньший объем опубликованных работ посвящен вопросам интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий, связанных с месторождениями экзогенных полезных ископаемых [28, 29]. Это объясняется прежде всего тем, что многие виды экзогенных полезных ископаемых не создают отчетливых геохимических аномалий, которые поэтому и не используются для поисков. Вместе с тем разрабатываются и здесь новые приемы и принципы для выявления, интерпретации и оценки неотчетливых геохимических аномалий, фиксирующих положение некоторых видов экзогенных полезных ископаемых.

Общие принципы интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий, связанных с различными генетическими типами месторождений полезных ископаемых, были заложены в трудах А. Е. Ферсмана. Они определяются главными положениями геохимии, минералогии и геологии. С этих позиций и будут даны описания, интерпретация и оценка геохимических полей — нормальных и аномальных для прогноза и поисков полезных ископаемых, а также в целях изучения геохимических особенностей геологических образований.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ПРИНЦИПЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НОРМАЛЬНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Нормальные геохимические поля представляют собой области геосфер с близкими к кларковым содержаниями химических элементов. На фоне нормальных геохимических полей (НГХП) выделяются геохимические аномалии, в том числе связанные с полезными ископаемыми.

В каждом исследуемом районе устанавливаются нормальные параметры распределения химических элементов в горных породах и рыхлых отложениях, в поверхностных и подземных водах, в подпочвенном воздухе и приповерхностной атмосфере, в растительном покрове. Эти параметры включают: C_f — фоновое содержание или местный (региональный) кларк для данного типа образований; C_a — аномальное содержание (минимальное и максимальное); $КК$ — кларк концентрации, равный C_f/C_k , где C_k — общий кларк (литосферы, гидросферы, биосферы, атмосферы).

Определение C_f является важной задачей, так как этот показатель характеризует нормальное геохимическое поле, на фоне которого интерпретируются и оцениваются геохимические аномалии. Методика определения геохимического фона приведена в специальной главе [25].

Рассмотрим особенности и принципы интерпретации отдельных типов нормальных геохимических полей: литохимических, гидрохимических, биогеохимических, атмохимических.

Литохимические поля в осадочных породах

Главные ассоциации химических элементов (макроэлементов) осадочных пород расположены в верхней части таблицы Менделеева до первого полупериода 4 периода (углерод, азот, кислород, алюминий, кремний, фосфор, сера, натрий, магний, калий, кальций, хлор, бор, железо, марганец). Второстепенные по содержанию ассоциации химических элементов (микроэлементы) находятся в нижней части таблицы, и хотя не определяют характер осадочных пород, но имеют нередко большое значение для геохимической их корреляции и расчленения (ванадий, медь, цинк, свинец, барий и др.).

Изучение, интерпретация и оценка литохимических нормальных полей имеют значение для решения следующих вопросов: определения геохимического фонда пород, вмещающих месторожде-

ния; геохимической корреляции отдельных составных частей стратиграфического разреза осадочных толщ, особенно необходимое при отсутствии в них руководящих биологических остатков; сопоставления осадочных отложений разных регионов для выделения среди них продуктивных в отношении полезных ископаемых; сопоставления палеогеохимических карт, являющихся основой для карт прогноза экзогенных полезных ископаемых.

По микроэлементам в осадочных породах может производиться корреляция отдельных свит, а также интерпретация геохимических полей в отношении прогноза полезных ископаемых.

Например, по данным Н. Д. Ката, стратиграфическое расчленение по микроэлементам произведено для осадочных отложений юго-восточной части горного Дагестана. При этом геохимические пробы отбирались из коренных терригенных пород юрского возраста в процессе геологических маршрутов. Для определения фоновых содержаний выбирались участки пород, не затронутых выветриванием и гидротермальными изменениями. По данным спектральных анализов определялись средние содержания, фоновые и аномальные содержания, дисперсия и коэффициент корреляции. Выделены две ассоциации элементов: 1) элементы-индикаторы полиметаллического оруденения (свинец, цинк, медь); 2) элементы-коррелятивы осадочных пород, не связанные с полиметаллическим оруденением (барий, цирконий, марганец, ванадий). Барий отнесен ко второй ассоциации в связи с отсутствием корреляционной связи этого элемента с медью, свинцом и цинком.

Сопоставление диаграмм распределения указанных геохимических параметров (рис. 33) показывает, что каждая свита осадочных пород имеет свой геохимический характер, используя который можно производить расчленение и корреляцию. Среднее и фоновое содержания почти совпадают, что при достаточном числе проб дает основание принимать за фоновое содержание среднеарифметическую его величину. В свитах, где распределены главным образом песчаники, отмечается увеличение S_f и S_a для циркония, по-видимому, за счет присутствия акцессорного циркона (михурекская и заннкамская свиты). И, наоборот, в свитах с преобладанием аргиллитов и алевролитов (верхнеялахкамская и нижнеялахкамская свиты) содержание циркония резко падает. Зато в них возрастает содержание марганца и ванадия.

Приведенные данные наряду с корреляцией разрезов осадочных толщ позволяют решить вопрос о возможности выявления геохимических признаков свинцово-цинкового оруденения. Об этом может свидетельствовать характер корреляционных связей: свинец и цинк имеют положительную связь $+0,7$, в то время как эти два элемента — отрицательную связь с медью ($-0,5$ и $-0,875$ соответственно). По-видимому, медь следует включить в ассоциацию элементов-коррелятивов осадочных пород, а свинец и цинк — в особую ассоциацию элементов-индикаторов гидротермального процесса.

Литохимические поля в магматических породах

Ведущая ассоциация химических элементов магматических пород, составляющая 96—99 %, включает кислород, водород, кремний, алюминий, магний, калий, натрий, кальций, железо. Во второстепенную ассоциацию (около 1,5 %) входят титан, марганец, углерод, фосфор, а также сера и хлор (около 2 %). Микроэлементы (акцессорные элементы), составляющие всего 0,01 % магматических пород, представлены всеми остальными элементами периодической системы.

Для расчленения и корреляции магматических пород может использоваться ряд ведущих и второстепенных элементов. Выявление металлогенетической специализации, имеющей важное значение

а



б



Рис. 33. Диаграмма распределения некоторых геохимических параметров в а — для элементов-индикаторов полиметаллического оруденения; б — для элементов-

ние для прогноза месторождений полезных ископаемых, должно производиться прежде всего по микроэлементам магматических пород. Например, трудно расчленить интрузивные и эффузивные аналоги по элементам ведущей ассоциации, но это удастся выполнить по микроэлементам. В качестве примера ниже сопоставлены габбро и базальты, в которых, по данным А. А. Беуса, содержание одного из ведущих компонентов (железа) одинаково: 2,24 % по 762 анализам из 45 регионов для габбро и по 445 анализам из 23 регионов для базальтов. Содержание никеля (микроэлемент) отличается на один порядок: в габбро $2 \cdot 10^{-2}\%$, в базальтах

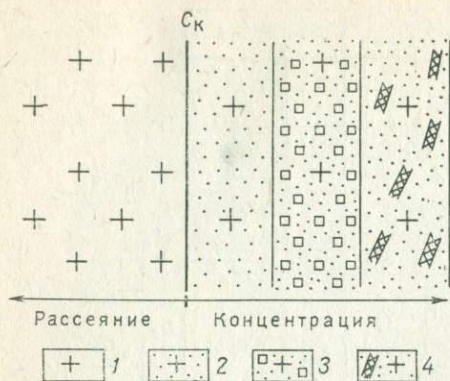


Рис. 34. Схема геохимической специализации интрузивных пород (на примере специализации гранитов по олову).

1 — граниты; специализация: 2 — геохимическая ($6 \cdot 10^{-4}$ %, олово в слюдах), 3 — акцессорно-минеральная ($3 \cdot 10^{-3}$ %, олово в акцессорном касситерите), 4 — металлогеническая ($> 5 \cdot 10^{-2}$ %, олово в рудных образованиях); C_k — кларк (для олова $3 \cdot 10^{-4}$ %)

кларк концентрации здесь равен $7(1 \cdot 10^{-3}/1,5 \cdot 10^{-4})$. Следовательно, базальты Комсомольского района отражают специализацию магматических пород по олову, которая в ещё более значительной степени проявляется в липаритах ($3,5 \cdot 10^{-3}$ %) и особенно в гранит-порфирах ($5,8-10^{-3}$). Таким образом, в Комсомольском районе нормальные магматические породы определенного возраста являются аномальными на олово по отношению к кларкам в подобных образованиях земной коры. При этом кларк концентрации в гранит-порфирах достигает $19,3(5,8 \cdot 10^{-3}/3 \cdot 10^{-4})$.

Для интерпретации геохимических полей и аномалий представляет интерес сопоставление геохимической специализации нормальных полей интрузивных пород со специализацией аномальных полей этих же образований (рис. 34). В схеме на примере распределения олова в гранитах показано различие в терминах геохимическая, акцессорно-минералогическая и металлогеническая специализация. Определения этих терминов даются по В. С. Коптеву-Дворникову и М. Г. Руб.

Геохимическая специализация — это уровни первичных содержаний рудных элементов и летучих компонентов в изверженных породах, превышающие так называемые планетарные и региональные кларки. Акцессорно-минералогическая специализация показывает, что при определенных благоприятных условиях геохимическая специализация может достигать максимума и сопровождаться образованием акцессорных минералов. Металлогеническая специализация — это такие уровни содержаний рудных элементов и летучих компонентов в магме, которые в совокупности с благоприятными физико-химическими и геологическими условиями определяют образование месторождений.

Для практического решения вопроса о характере специализации интрузивных пород могут быть использованы следующие ориентировочные параметры, основанные на кларках концентрации: при $КК < 1$ геохимическая специализация отсутствует; при $КК 1-10$ имеется геохимическая специализация; при $КК 10-50$ акцессорно-минералогическая специализация; при $КК 5-100$ металлогеническая специализация.

В пределах одного и того же региона может отмечаться сквозная геохимическая специализация, которая проявляется в неоди-

наковой степени для интрузивных комплексов разного возраста. Например, местные кларки по олову в гранитах составляют ($n \cdot 10^{-4} \%$): для нижнего палеозоя — 4, среднего палеозоя — 4,5, верхнего палеозоя — 5, нижнего мезозоя — 10 и верхнего мезозоя — 30, что соответствует кларкам концентрации 1; 1,5; 1,6; 3,3 и 10. В данном случае отмечается прогрессивный рост геохимической специализации гранитов по олову от палеозоя к мезозою.

Для оценки специализации гранитов предложены индексы и формулы. Л. В. Таусон [16] вывел геохимический индекс гранитов: $1000 \cdot (Sr + Ba) / F \cdot (Li + Rb)$, который изменяется от 0,07 в редкометальных гранитах до 160 в плагиогранитах. В. Д. Козлов [14] вывел формулу потенциальной рудоносности гранитоидов:

$$aF, bLi, cRb, dBe, eB, qSn, hW, iPb/nBa, mSr,$$

где в числителе — накапливающие элементы; a, b, c, \dots — кларки концентрации (>1); в знаменателе — рассеивающиеся элементы с концентрацией n, m — ниже кларков (<1).

Особенности распределения микроэлементов в неизменных магматических породах показаны Э. Г. Ишевской в виде типовых порядковых рядов ассоциаций микроэлементов по классам их содержаний в интрузивных породах. Ведущими микроэлементами для каждого типа пород могут считаться те из них, которые находятся в классах с содержаниями более $10 \cdot 10^{-4} \%$ и лишь иногда в классах более $2 \cdot 10^{-4} \%$. Положение химических элементов в отдельных классах содержаний для определенных типов интрузивных пород характеризуется следующими данными. Например, рубидий в гранитах относится к первому классу содержаний $>200 \cdot 10^{-4} \%$, в средних породах — ко второму ≤ 200 , в основных — к третьему ≤ 100 , в гипербазитах — к восьмому ≤ 1 . Для никеля картина совершенно иная: в гранитах — к шестому ≤ 10 , в средних породах — к четвертому ≤ 50 , в основных — ко второму ≤ 200 , в гипербазитах — к первому $>200 \cdot 10^{-4} \%$.

По данным специального геохимического опробования неизменных магматических пород могут быть составлены карты нормального геохимического поля (рис. 35).

На схеме (см. рис. 35) интервалы 3 и 4 соответствуют петрогенным аномалиям интрузивов, с которыми предполагается парагенетическая связь полиметаллического оруденения. В северо-восточной части поля — крупная петрогенная аномалия, связанная с пермскими гранитами. Интервал 2 характеризует вулканогенно-осадочные породы девона.

При изучении и интерпретации нормальных геохимических полей в магматических породах весьма желательно использовать результаты не только по геохимическим, но и минералогическим пробам. Сопоставление данных по микроэлементам и аксессуарным минералам в магматических породах позволяет более уверенно определять их геохимическую, аксессуарно-минералогическую и металлогеническую специализации. В простейшем варианте это сопоставление может быть сделано по диаграммам, на которых отражаются типы пород, микроэлементы, аксессуарные минералы и относительные их содержания.

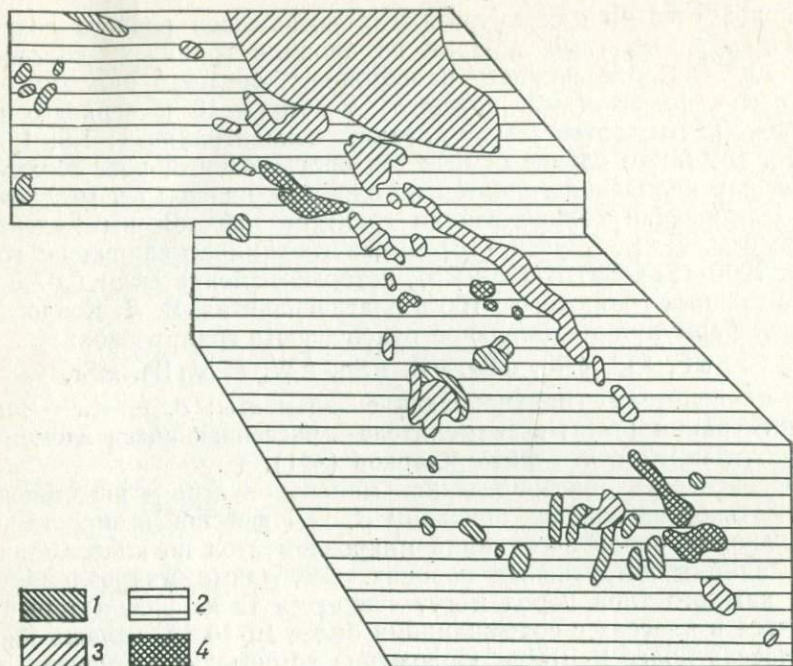


Рис. 35. Схема нормального геохимического поля распределения свинца одного из районов Рудного Алтая [50].
Содержание свинца ($n \cdot 10^{-3} \%$): 1 — 0,5—1; 2 — 1—2; 3 — 2—5; 4 — >5

Для геохимического и минералогического опробования интрузивных тел существуют различные варианты методики этих работ. В обобщенном виде можно наметить следующие принципы такого опробования.

1. Интрузивы изометрической формы в плане опробуются по двум пересекающимся профилям; в условиях равнинного рельефа эти профили могут быть ориентированы как взаимно перпендикулярные линии; в условиях горного рельефа могут применяться (как наиболее доступные) линии профилей по долинам рек, водоразделам.

2. Пробы отбираются с участков визуально неизменных пород, по каждой из разновидностей их. После получения данных анализов из выборки исключаются пробы с ураганными содержаниями элементов.

3. Масса пробы зависит от ее типа (геохимическая или минералогическая). При отборе комплексной пробы масса ее должна быть не менее 1—2 кг. Проба отбирается с площадки от 1—4 м² до 100—400 м². В зависимости от размеров площадки опробования отбирается необходимое число точечных проб (от 5—10 до 50—100).

Литохимические поля в метаморфических породах

В метаморфических породах докембрия геохимические поля отличаются большой сложностью в связи с преобразованием первичных геохимических полей осадочных, вулканогенных и интрузивных пород. При этом возникают новые геохимические поля метаморфического типа. В зависимости от характера метаморфизма и его интенсивности перераспределение химических элементов и образование новых ассоциаций элементов будут различными.

Изучая геохимические поля в метаморфических породах, необходимо учитывать существующие гипотезы о значении и интенсивности региональных метаморфических процессов, отразившихся на исходном составе первичных пород. Одна из гипотез придает процессам регионального метаморфизма всеобъемлющее значение. Считается, что в результате таких процессов происходит полное перераспределение главных, второстепенных элементов и микроэлементов. В соответствии с этой гипотезой предполагается развитие очень сложных геохимических полей, по которым трудно или почти невозможно восстановить первичный состав и геохимическое поле пород. Согласно другой гипотезе намечается существенная сохранность состава и геохимического поля первичных пород, за счет которых возникли метаморфические образования. При этом учитывается подвижность химических элементов при метаморфизме.

В процессе метаморфизма подвижными компонентами являются H_2O , CO_2 , K_2O , Na_2O ; инертными — SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , CaO , MgO . В зависимости от соотношения потенциалов подвижных компонентов намечаются поля устойчивости различных метаморфических ступеней пород. Эти поля в определенной степени отражают нормальные геохимические поля метаморфических пород и позволяют прогнозировать поведение ассоциаций микроэлементов, принадлежащих различным семействам.

Характер нормальных геохимических полей метаморфических пород используется для решения следующих задач: корреляции и стратиграфического сопоставления метаморфических пород; реконструкции их первичного состава; генетического разделения сходных геологических образований, среди которых имеются метаморфические породы.

Литохимические поля в рыхлых четвертичных отложениях

Нормальные литохимические поля формируются в рыхлых четвертичных отложениях за счет разрушения неизмененных коренных пород. Характер этих полей определяется многими факторами, в том числе генетическим типом отложений, мощностью отложений, геоморфологией района, ландшафтом в целом.

Склоновые отложения, отражающие состав коренных пород склона, могут иметь различные фоновые содержания элементов в зависимости от условий залегания пород. В случае срезания склоном горизонтов пород нормальное поле будет сложным из-за поступления в рыхлые отложения материала от разных горизонтов.

При совпадении элементов залегания коренных пород с поверхностью склона литохимическое поле будет характеризоваться наиболее простым составом, отражающим состав верхнего горизонта коренных пород.

Аллювиальные отложения, представленные илистой и песчанистой фракциями донных осадков, отражают геохимическое поле водосборной площади ручья, лога, реки. В илистой фракции концентрируются ионы и коллоидные частицы, поступающие из различных геологических образований бассейна стока. Поэтому в нормальном геохимическом поле этих отложений могут возникать ландшафтные геохимические аномалии, связанные с накоплением определенных элементов или их ассоциаций на геохимических барьерах. Подобные аномальные участки нормального геохимического поля в некоторых случаях могут быть приняты за геохимические аномалии (потоки рассеяния), вызванные проявлениями или месторождениями полезных ископаемых.

Уверенную интерпретацию геохимического поля аллювиальных отложений можно проводить лишь в узких долинах притоков основных речных артерий. Значительно сложнее сделать это для аллювиальных отложений крупных долин.

Определение фоновых содержаний в рыхлых четвертичных отложениях обычно производится из общей выборки проб, исключая ураганные содержания.

Гидрохимические поля

Характеристика нормального гидрохимического поля дается на основании определения кларков гидросферы. По А. П. Виноградову, кларк гидросферы (КГ) — это среднее содержание химических элементов в морской воде. Для отдельных регионов Е. Е. Беляковой и др. предложен региональный кларк гидросферы (РКГ), который представляет собой среднюю концентрацию элемента в природных водах данного региона, выраженную в процентах к общему весовому содержанию минеральных веществ в природных водах этого региона

$$\text{РКГ} = \frac{M_{\text{эл}} \cdot 100}{M},$$

где M — общее количество минеральных веществ в смеси вод данного региона провинции, мг; $M_{\text{эл}}$ — общее количество элемента в смеси вод региона, мг.

Региональный кларк гидросферы отражает литохимические поля в коренных горных породах и рыхлых отложениях данного региона. Е. Е. Белякова и др. выделяют две группы элементов в водах: элементы избыточные, когда РКГ больше $K_{\text{лит}}$; элементы недостаточные, когда РКГ меньше $K_{\text{лит}}$.

Этими же исследователями воды подразделяются на фоновые и аномальные. Фоновые воды имеют место на площадях, где породы содержат кларковые количества элемента (воды РГФ) или где наблюдается рассеянная минерализация с содержанием эле-

мента больше кларков (водный ореол рассеяния рудной минерализации). Аномальные воды формируются в связи с месторождениями или проявлениями полезного ископаемого.

Например, природные воды Джунгаро-Балхашской рудной провинции выделяются повышенными содержаниями меди и свинца по сравнению с водами платформенного чехла Тургайской провинции. При этом цинк является элементом избыточным в водах, так как его РКГ превышает К литосферы. Различие нормальных гидрохимических полей рассматриваемых территорий вполне объяснимо их тектоническим положением и металлогеническими особенностями.

Биогеохимические поля

Характеристика нормальных биогеохимических полей в растительном покрове дана по А. И. Перельману. Живое вещество растений состоит из следующих компонентов: макроэлементов, включающих воздушные мигранты (98,8 %) — кислород, углерод, водород, азот; водных мигрантов (1,21 %) — калий, натрий, кальций, магний, сера, хлор, фосфор, железо, кремний; микроэлементов ($n \cdot 10^{-3} - 10^{-5} \%$) — стронций, барий, цезий, медь, свинец и др. (всего 24 элемента); ультрамикроэлементов (менее $10^{-5} \%$) — селен, ртуть, уран, радий; элементов, присутствие которых в растениях установлено, но содержания неизвестны, — цирконий, ниобий и др.; элементов, не обнаруженных в растениях, — рутений, осмий, иридий, гафний и др.

Как видно из приведенных данных, средние содержания элементов в растительном покрове, которые можно было бы назвать «кларками биосферы», весьма невелики и имеют большие колебания. То же самое отмечается и в золе растений, которая используется как концентратор химических элементов для характеристики и интерпретации биогеохимических полей. «Кларки биосферы» по золе растений имеют следующие группы: I группа ($n \cdot 10$ до $n \cdot 10^{-3} \%$) — энергично накапливаемые элементы; II группа ($n \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ до $n \cdot 10^{-5} \%$) — сильно накапливаемые элементы; III группа ($n \cdot 10^{-2} - 10^{-6}$ до $n \cdot 10^{-6-11} \%$) — слабо накапливаемые элементы. Избирательное поглощение химических элементов растениями из питающей среды выражается, по А. И. Перельману [37], коэффициентом биологического поглощения:

$$A_x = L_x / P_x,$$

где L_x — содержание элемента в золе растения; P_x — содержание элемента в горной породе или почве.

А. Л. Ковалевским [27] выделены два типа растений по способности поглощения химических элементов из питающей среды — барьерные и безбарьерные.

В безбарьерном типе выделяется четыре диапазона концентрации химического элемента в питающей среде и в растении: 1) недостатка элемента, когда повышение концентрации его оказывает стимулирующее действие на растение, 2) оптимума — продуктивность растений максимальна, 3) избытка элемента — токсическое действие и снижение продуктивности растения, 4) гибели растений. По мнению А. Л. Ковалевского, благодаря естественному отбору

на площадях рудных месторождений не могут существовать растения, концентрация рудных компонентов в которых находится в диапазоне гибели растений.

Для барьерных растений характерно отсутствие токсического диапазона и диапазона гибели клеток. Поэтому эти типы растений часто наблюдаются на площадях рудных месторождений.

Исследования А. Л. Ковалевского еще раз подтвердили большую сложность формирования биогеохимических полей и трудности их интерпретации. Вместе с тем новые данные о барьерных и безбарьерных типах растений создают обоснование для разработки геоботанических полей. При этом возможны как наземные, так и аэроварианты геоботанических методов поисков полезных ископаемых.

Атмохимические поля

Состав сухого атмосферного воздуха (по В. А. Соколову) включает (в %): азот 78,9, кислород 20,95, аргон 0,93, углекислый газ 0,03, неон 0,0018, гелий 0,00052, криптон 0,0001, водород 0,00005, ксенон 0,000008, метан — менее 0,000005, тяжелые газообразные гомологи метана — менее 0,000001, закись азота 0,00005.

Почвенные и подпочвенные газы имеют следующие фоновые содержания, по А. И. Фридману [47]: углекислый газ 0,5 %, метан 0,0n %, тяжелые углеводороды 10^{-4} — 10^{-5} %, окись азота 10^{-3} — 10^{-4} %. Болотные и торфяные газы отличаются повышенными содержаниями метана (до 70—75 %, а иногда до 90 %).

Нормальные атмохимические поля подпочвенного воздуха в рудных районах, по данным А. И. Фридмана, мало изменяются для различных типов рудных месторождений и состава коренных пород. Они характеризуются следующими фоновыми содержаниями: углекислый газ от 0,2 до 0,8 %, редко до 1,5 %; метан 10^{-3} — 10^{-4} % и лишь в отдельных случаях достигает 10^{-2} — 10^{-1} %. Тяжелые газообразные гомологи метана (этан, пропан, бутан) обычно отмечаются в ничтожных количествах (10^{-4} — 10^{-6} %); водород практически отсутствует, над зонами разломов его содержание увеличивается до 10^{-3} %, реже до 10^{-2} %. Фоновые содержания гелия и аргона примерно равны воздушному.

Пары ртути в приземной атмосфере на высоте 1,5—2,5 м в разных регионах, находящихся вне зоны загрязнения среды, по данным В. З. Фурсова [47], содержатся в количествах 8 — $12 \cdot 10^{-10}$ мг/л. По мнению В. З. Фурсова, это обусловлено однородным распределением ртути в горных породах и почвах, являющихся основным источником фоновых концентраций паров на континентах. В рудных районах нормальное атмохимическое поле ртути имеет более значительные содержания. В районах развития сурьмяно-ртутных и ртутных месторождений фоновые содержания паров ртути в подпочвенном воздухе находятся в пределах от $1 \cdot 10^{-8}$ до $4 \cdot 10^{-8}$ мг/л. В районах медноколчеданных и медно-молибденовых месторождений составляют 1 — $2 \cdot 10^{-8}$ мг/л. На площадях рудных полей полиметаллических и золоторудных месторождений фоновые содержания паров ртути колеблются от $0,5$ — $0,6 \cdot 10^{-8}$ до $1,0 \cdot 10^{-8}$ мг/л.

ОПИСАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ, РЕГИОНАЛЬНЫХ И ЛОКАЛЬНЫХ АНОМАЛЬНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЭНДОГЕННОГО ТИПА

Аномальные геохимические поля выделяются на фоне нормальных геохимических полей повышенными (или пониженными) против кларков содержаниями определенных химических элементов и наличием геохимических аномалий, являющихся прямыми признаками месторождений полезных ископаемых.

Аномальные геохимические поля можно классифицировать по генезису и масштабу. По генезису выделяются аномальные геохимические поля, связанные: с эндогенными процессами и месторождениями; с экзогенными процессами и месторождениями; с метаморфическими процессами и месторождениями.

По масштабу могут быть выделены: планетарные, региональные и локальные аномальные геохимические поля (табл. 13).

Таблица 13

Типы и поисковое значение аномальных геохимических полей

Масштаб поля	Поля	Поисковое значение
Планетарный	Геохимический пояс	Общие предпосылки поискового прогнозирования
Региональный	Геохимическая провинция ¹	Предпосылки поискового прогнозирования определенного типа месторождений
Локальный	Геохимические узлы, центры, зоны, аномалии, ореолы	Признаки поискового прогнозирования

Общие контуры аномальных геохимических полей определяются условиями развития земной коры, а также внешними и внутренними факторами миграции химических элементов.

Представляет интерес сопоставление понятий «региональное аномальное геохимическое поле» и «металлогеническая (минерогеническая) провинция». Региональное аномальное геохимическое поле — это обширный участок (зона) земной коры, характеризующийся максимальной концентрацией одного или комплекса (ассоциации) химических элементов, возникновение которых обусловлено внутренними и внешними факторами миграции.

К. Б. Ильин определяет металлогеническую провинцию как «...участок земной коры значительных размеров, определенного периода и типа тектонического и направленного металлогенического развития с характерными для него ассоциациями месторождений полезных ископаемых ...».

В настоящее время намечается тенденция объединения геохимических и металлогенических определений и понятий. Однако это происходит с учетом данных о глубинном строении земной ко-

ры и отдельных ее регионов. Подобное объединение можно видеть, например, на «Схеме размещения главных типов металлогенических провинций СССР» издания 1966 г. (А. И. Семенов, Е. Т. Шаталов, Ю. Г. Старицкий) и на «Схеме металлогенического районирования СССР» издания 1970 г. (К. Б. Ильин). На этих схемах показаны металлогенические провинции (фемические, сиалические, фемически-сиалические и др.), выделенные по геохимическому принципу — проявлению глубинных процессов с преобладанием определенных химических элементов (железа и магния — фемические, кремния и алюминия — сиалические); структурно-металлогенические зоны, выделенные с учетом структурно-тектонического положения и металлогенической характеристики месторождений (например, зоны гидротермальных сульфидно-золоторудных месторождений на площадях развития позднеорогенной формации малых диоритовых интрузий, контролируемых разломами в пределах геоантиклинальных поднятий и т. д.).

Планетарные аномальные геохимические поля эндогенного типа могут быть подразделены на моноэлементные и полиэлементные.

Моноэлементные планетарные аномальные геохимические поля прослеживаются в виде геохимических поясов повышенных концентраций одного химического элемента через всю планету или отдельные крупные ее площади. Выделение таких поясов выполняется в первую очередь путем включения в их пределы месторождений, проявлений и крупных геохимических аномалий данного элемента. Планетарные геохимические пояса выделены для ряда элементов: ртути, олова, золота и др.

На рис. 36 показаны совмещенные моноэлементные аномальные геохимические поля золота, олова, ртути и никеля. Наиболее обширные аномальные поля (планетарные пояса) характерны для золота. Они пронизывают все континенты мира, объединяя проявления золотой минерализации разного возраста и отражая геохимические неоднородности земли, которые возникли в процессе длительной эволюции планеты (глубинные аномальные геохимические поля).

Полиэлементные планетарные аномальные геохимические поля, наблюдаемые в верхних частях земной коры и совпадающие с металлогеническими поясами, могут быть подразделены на три группы: окаймляющие океанические впадины, межконтинентальные и внутриконтинентальные. Примером окаймляющего океаническую впадину полиэлементного планетарного аномального геохимического поля является Тихоокеанский рудный пояс. К межконтинентальным полиэлементным аномальным геохимическим полям планетарного типа может быть отнесен Средиземноморский рудный пояс. Внутриконтинентальные планетарные аномальные геохимические поля хотя и имеют несколько меньшие размеры, но также захватывают значительные части планеты. В эту группу аномальных геохимических полей полиэлементного типа могут быть включены Урало-Тяньшаньский, Казахстанский, Сибирский, Африканский, Канадский и другие пояса.

Сопоставляя положение планетарных полиэлементных и моноэлементных аномальных геохимических полей, можно отметить, что первые поглощают отдельные части вторых на тех площадях, где развиты планетарные тектонические структуры разрывного типа. В целом планетарные аномальные геохимические поля, представленные планетарными поясами и зонами, являются общими геохимическими предпосылками для поисков месторождений полезных ископаемых.

Региональные аномальные геохимические поля эндогенного типа выделяются в пределах планетарных аномальных геохимических полей в виде групп полиэлементных геохимических провинций или отдельных моноэлементных провинций и зон. Главным для региональных аномальных геохимических полей является близость химических элементов и их ассоциаций по внешним факторам миграции, связанных с общими геологическими условиями развития региона и, в частности, с направленностью тектоно-магматических процессов. Выделяются аномальные поля: литофильные, халькофильные, сидерофильные и смешанные [13, 14, 32].

Контуры региональных аномальных геохимических полей определяются формой и характером региональных тектонических структур, которые влияли на размещение проницаемых зон и магматических образований. По форме выделяются региональные аномальные геохимические поля, изометрические и др.

Взаимное расположение отдельных геохимических зон моноэлементного типа создает зональность полиэлементных региональных аномальных геохимических полей, которая проявляется по отношению к региональным тектоническим структурам или центрам магматической интрузивной деятельности в регионе. Рассмотрим некоторые примеры региональных аномальных геохимических полей эндогенного типа.

Верхояно-Колымское региональное аномальное геохимическое поле, являющееся частью Тихоокеанского рудного пояса, характеризуется зональностью по отношению к Колымскому срединному массиву и обрамляющей его зоне развития мезозойских гранитных интрузивов (рис. 37, а). К внутренней зоне общей зональности приурочены месторождения и проявления олова и вольфрама. Внешние зоны представлены низкотемпературными проявлениями и месторождениями халькофилов (свинца и цинка, ртути и сурьмы). Эта общая зональность нарушается наличием поперечных зон оловянной минерализации и другими зонами, но в целом она подчеркивает обычную зональность в распределении химических элементов по температурным условиям миграции.

Центрально-Казахстанское региональное аномальное геохимическое поле, являющееся частью Урало-Тяньшаньского планетарного рудного пояса, имеет зональность, близкую к зональности Верхояно-Колымского поля. Внутренняя зона характеризуется развитием вольфрамового и медно-молибденого оруденения, связанного с гранитными и гранодиорит-порфиоровыми интрузивами (см. рис. 37, б). Во внешних зонах размещаются месторождения и проявления свинца, цинка и меди, среди которых выделяются и собственно низкотемпературные типы месторождений медистых песчаников и свинцово-цинковых руд в карбонатных породах.

Тунгусское региональное аномальное геохимическое поле представляет собой западную часть планетарного аномального геохимического поля Сибирской платформы (см. рис. 37, в). Щелочно-фемический тип петрохимической провинции этой территории определил и характер расположенных здесь халькофильно-

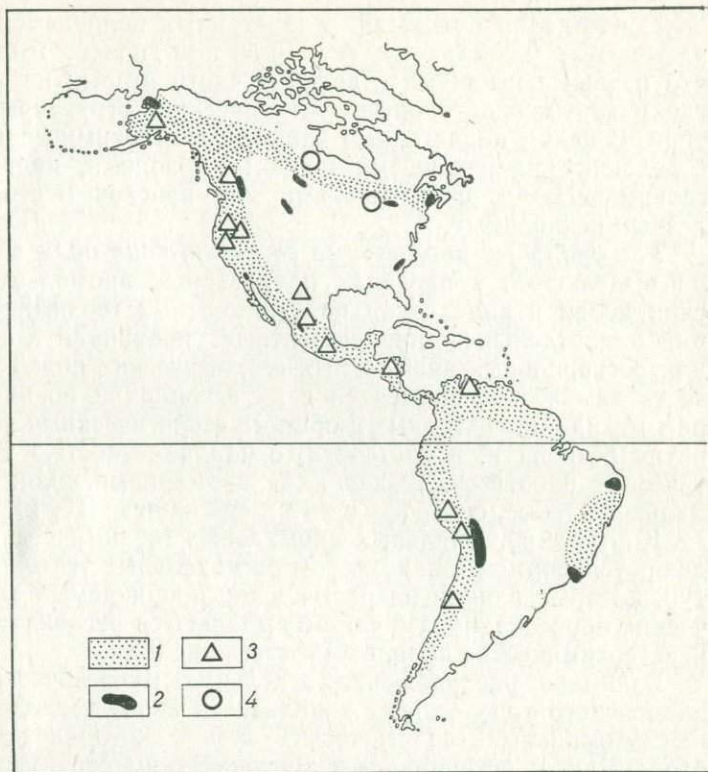


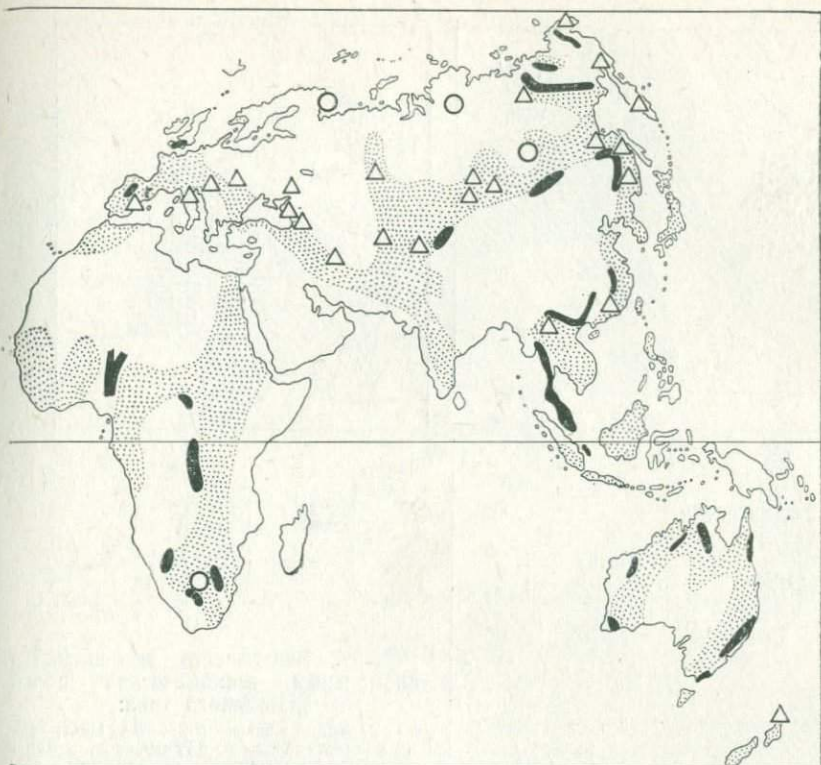
Рис. 36. Схема планетарных аномальных

1 — золото, 2 — олово,

сидерофильных геохимических провинций и их зональность. В северо-западной части аномального поля выделяется один из наиболее контрастных центров интрузивной деятельности — Норильский район развития медно-никелевого оруденения, связанного с габбро-норитами. В юго-восточной части поля размещается центр интрузивного траппового магматизма — Ангаро-Илимский район развития железорудных магнетитовых месторождений, связанных с долеритами. Между этими центрами расположены обширные по площади провинции развития низкотемпературных проявлений свинца и цинка, а также исландского шпата.

В районе Бак Кан (СРВ) также намечается, по данным Нгуен Ван Биня, зональность в размещении региональных аномальных минерально-геохимических полей по отношению к области концентрации интрузивных тел (рис. 38). Вблизи них оконтуриваются зоны развития оловянного и вольфрамового оруденения, сопровождаемые шлиховыми ореолами и аномалиями шеелита и касситерита. Далее к западу по периферии зон оловянного и вольфрамового оруденения локализуется зона свинцово-цинкового оруденения стратиформного типа в карбонатных породах силур-девонского возраста. В этой зоне отмечаются геохимические ореолы и аномалии свинца, цинка, бария, меди. Наиболее удаленная от интрузивов зона характеризуется развитием аномалий бария и ртути.

Локальные аномальные геохимические поля эндогенного типа представляют собой части региональных аномальных геохимических полей, в пределах которых располагаются известные место-



геохимических полей эндогенного типа.

3 — ртуть, 4 — никель

рождения и проявления полезных ископаемых или оконтурены геохимические аномалии, с которыми предполагается связь новых месторождений и проявлений полезных ископаемых.

Локальное аномальное геохимическое поле по основным параметрам может соответствовать выходящему на поверхность или скрытому рудному району, рудному узлу или рудному полю, включающему ряд месторождений и проявлений полезных ископаемых, а также выходящему на поверхность или скрытому месторождению, состоящему из ряда рудных тел.

На площади локального аномального геохимического поля эндогенного типа могут выделяться первичные и вторичные геохимические ореолы и аномалии, интерпретации и оценка которых имеет свои особенности, зависящие от генетического типа известного или ожидаемого месторождения.

Для последующего рассмотрения остановимся на некоторых типах локальных аномальных геохимических полей, имеющих генетическую, парагенетическую связи с интрузивами и не имеющих конкретной связи с интрузивами.

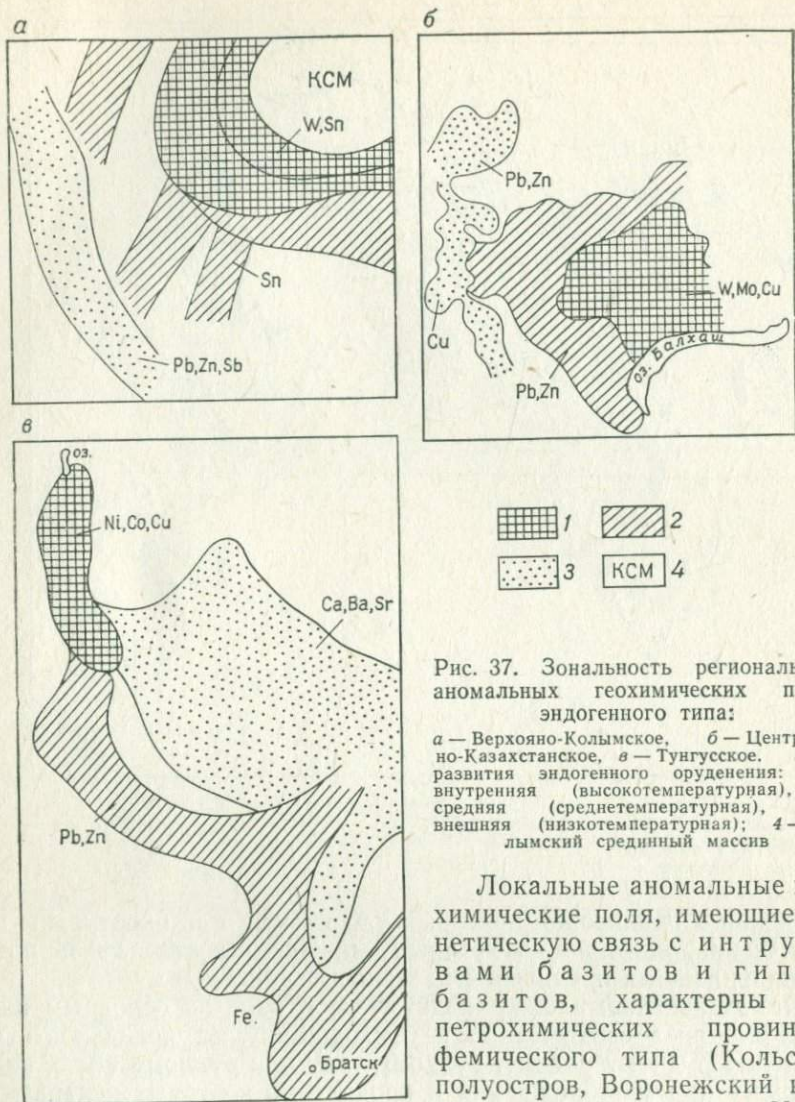


Рис. 37. Зональность региональных аномальных геохимических полей эндогенного типа:

a — Верхояно-Колымское, *б* — Центрально-Казахстанское, *в* — Тунгусское. Зоны развития эндогенного оруденения: 1 — внутренняя (высокотемпературная), 2 — средняя (среднетемпературная), 3 — внешняя (низкотемпературная); 4 — Колымский срединный массив

Локальные аномальные геохимические поля, имеющие генетическую связь с интрузивами базитов и гипербазитов, характерны для петрохимических провинций фемического типа (Кольский полуостров, Воронежский кристаллический массив, Урал, Саяны) или щелочно-фемического типа (Сибирская платформа). Базиты и гипербазиты интрузивных тел имеют геохимическую и минералого-акцессорную специализацию по никелю, кобальту и меди, по титану, ванадию и железу, по хрому, т. е. по элементам семейства *d*. Первичные эндогенные геохимические ореолы основных рудных элементов-индикаторов прослеживаются внутри интрузивов и в ближайшей зоне экзоконтакта; ореолы элементов-спутников распространяются в этой зоне на более значительные расстояния.

Вторичные (экзогенные) ореолы, связанные с медно-никелевы-

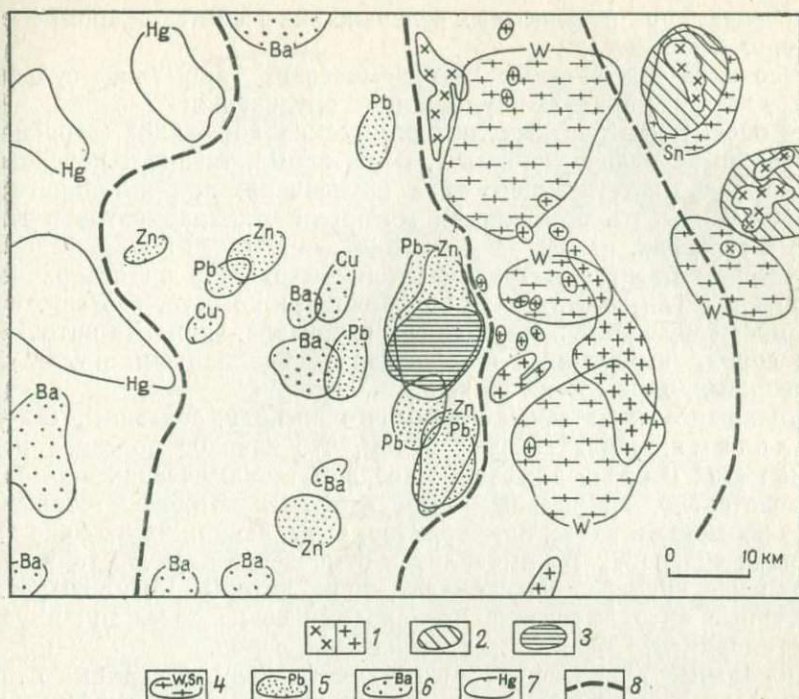


Рис. 38. Зональность региональных аномальных минерально-геохимических полей по отношению к полосе концентрации интрузивов, залегающих в осадочных породах в районе Бак Кан. По Нгуен Ван Биню.

1 — интрузивные породы (граниты, гнейсы, диориты, сиениты); локальные аномальные поля (рудные поля): 2 — оловорудные, 3 — свинцово-цинковые (стратиформные); 4 — шлиховые аномалии шехлита (W) и касситерита (Sn); экзогенные геохимические аномалии: 5 — свинца и цинка, 6 — бария и меди, 7 — ртути; 8 — границы аномальных минерально-геохимических полей

ми, титаномагнетитовыми и хромитовыми месторождениями, характеризуются следующими особенностями, обусловленными устойчивостью минералов в экзогенных условиях. Наиболее контрастные геохимические ореолы создаются элементами, входящими в состав устойчивых минералов (титан в ильмените и титаномагнетите, железо в магнетите, хром в хромите). Более сложные для интерпретации вторичные ореолы представлены никелем, кобальтом, серой, которые начинают мигрировать при окислении многих сульфидов. В связи с этим могут возникать трудности в оценке, например, ореолов, возникших за счет разрушения пирротиновых руд, не несущих медно-никелевого оруденения, и ореолов вокруг собственно медно-никелевых месторождений и рудных тел.

Интерпретация и оценка геохимических и минералогических аномалий в новых районах развития интрузивов базитов и гипербазитов для решения вопроса об ожидаемом типе месторождений может выполняться в следующем порядке:

— интерпретация и оценка шлихов из аллювиальных отложений; при повышенных содержаниях пирротина и пентландита можно ожидать наличие базитов или гипербазитов с медно-никелевым

оруденением, при повышенных содержаниях хромита — хромитовых месторождений и т. д.;

— оценка контрастных гидрохимических аномалий сульфатона — важного признака сульфидного оруденения;

— оценка контрастных литохимических аномалий (вторичных и первичных) никеля, кобальта, меди, хрома, титана — поискового признака соответствующего типа оруденения; при интерпретации следует учитывать особенности миграции этих элементов в экзогенных условиях.

Массивы базитов и гипербазитов, выходящие на поверхность, опробуются (литохимическое опробование) по сети, соответствующей масштабу работ и морфологии интрузива. Скрытые интрузивы этих пород, выявленные по геофизическим данным и вскрытые скважинами, опробуются по керну.

Локальные аномальные геохимические поля, связанные с кимберлитами, характеризуются тем, что главное полезное ископаемое этих пород — алмазы не создают геохимических аномалий. Следовательно, аномальными могут быть некоторые геохимические особенности самих кимберлитов, выделяющих их на фоне вмещающих толщ [28]. В кимберлитах отмечается наличие таких элементов как никель, медь, кобальт, хром, которые могут создавать экзогенные литохимические и гидрохимические аномалии в условиях, например, карбонатных вмещающих пород.

Локальные аномальные геохимические поля, связанные с щелочными интрузивными породами, имеют значение для прогноза месторождений многих редких элементов.

Рассмотрим некоторые типы, взятые из общей классификации магматогенных месторождений Л. Н. Овчинникова и Н. А. Солодова, которые связаны с щелочными породами — агпайтовыми нефелиновыми сиенитами, щелочными метасоматитами в связи с миаскитами и карбонатитами. Интрузивы этих пород, известные в петрохимических провинциях фемического, сиалически-фемического и щелочно-фемического типов (Кольский полуостров, Приазовье, Южный Урал, Вост. Саян), являются ядром или центром локальных аномальных геохимических полей.

Внутри интрузивов агпайтовых нефелиновых сиенитов формируются первичные магматические ореолы циркония, ниобия, тантала и редких земель цериевой подгруппы (элементы семейств *d* и *f*). В экзоконтактной зоне фенитизации наблюдаются ореолы элементов семейства *s*-бария, бериллия, стронция, лития (рис. 39, *a*). Щелочные метасоматиты в связи с миаскитами располагаются в зоне экзоконтакта интрузивов этих пород, являющихся также ядром локального аномального геохимического поля. Миаскиты отличаются от агпайтовых сиенитов более низкими кларками концентрации основных рудных элементов. Контрастные геохимические ореолы и аномалии приурочены к площадям развития метасоматитов.

Вторичные экзогенные литохимические и минералогические ореолы и аномалии тесно связаны между собой, что объясняется

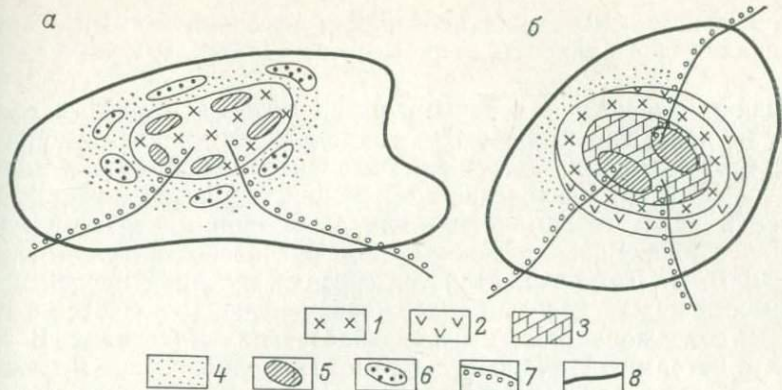


Рис. 39. Локальные аномальные геохимические поля, связанные с интрузивами щелочных пород (а) и карбонатами (б).

1 — нефелиновые сиениты; 2 — гипербазиты; 3 — карбонаты; 4 — фениты; эндогенные ореолы: 5 — элементов семейств *d* и *f* (цирконий, ниобий, тантал, редкие земли), 6 — элементов семейства *s* (барий, бериллий, стронций, литий); 7 — экзогенные потоки; 8 — контур аномального поля

большой устойчивостью таких минералов, как циркон, пирохлор, характеризующихся высокими энергиями кристаллической решетки. При оконтуривании локальных полей этого типа важно широко использовать морфологические признаки некоторых минералов. Например, циркон из щелочных пород имеет короткопризматический габитус, а циркон из гранитов — длиннопризматический.

Карбонаты с ниобиевым и редкоземельным оруденением занимают обычно центральную часть сложных комплексных массивов ультраосновных — щелочных пород. В связи с этими массивами образуются сложные локальные аномальные геохимические поля, в пределах которых могут быть выделены первичные и вторичные ореолы и аномалии (рис. 39, б). Первичные ореолы и аномалии приурочены к самим массивам и отличаются по ассоциациям химических элементов в зависимости от типа пород. Ореолы никеля и хрома располагаются над выходами ультраосновных пород, ореолы ниобия, тантала и редких земель — над выходами карбонатов. Вторичные ореолы могут смещаться за пределы массивов.

Интерпретация и оценка локальных геохимических полей, связанных с щелочными породами, в новых районах (для решения вопроса об ожидаемом типе месторождений) должна выполняться с учетом следующих благоприятных предпосылок и признаков: наличие петрохимической провинции соответствующего типа; шлихи из аллювия могут содержать весовые количества циркона и монацита, отдельные знаки или десятки знаков пирохлора, лопарита, танталита и др.; возможны россыпи некоторых минералов; контрастные геохимические аномалии ниобия, тантала в массивах щелочных пород или в их экзоконтактных зонах; в пределах последних могут фиксироваться аномалии элементов-спутников — лития, бериллия, цезия, рубидия, стронция.

Локальные аномальные геохимические поля эндогенных полезных ископаемых, генетически связанных с гранитами, разме-

щаются в петрохимических провинциях сиалического или фемиче-ски-сиалического типов (Северо-Восток, Казахстан, Средняя Азия и др.).

Граниты, в связи с которыми развиваются аномальные геохимические поля, характеризуются повышенными кларками концентрации (в 5—10 раз и более) ряда элементов — вольфрама, молибдена, олова и др. Увеличение содержаний элементов может выражаться в виде геохимической или акцессорно-минералогической специализации. Важным показателем рудоносности гранитов, по данным В. В. Ляховича, является средняя величина процента несходимости между валовым содержанием рудных элементов в гранитах и содержанием их в породообразующих минералах. В гранитах, с которыми связано вольфрамовое, молибденное и оловяное оруденение, расхождение между валовым содержанием рудного элемента в породе и в минералах обычно составляет 20—40 %, а в нерудоносных гранитах — всего 4—8 %. Это объясняется тем, что в нерудоносных гранитах подавляющая масса рудного элемента находится в виде изоморфной примеси в породообразующих минералах, тогда как в рудоносных гранитах от 20 до 40 % рудного элемента представлено рудными минералами, т. е. проявляется отчетливая акцессорно-минеральная специализация этих пород.

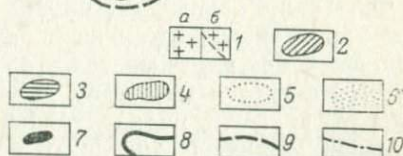
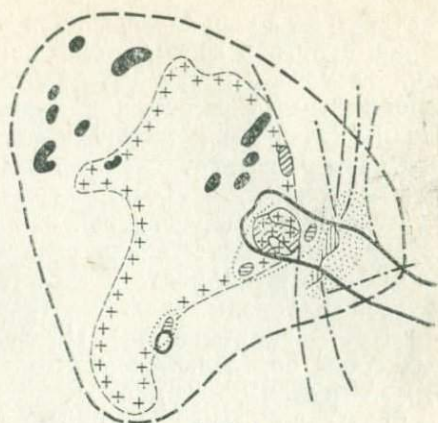
Рудоносные граниты являются ядром локального геохимического поля. Форма его в плане определяется морфологией выходящей части интрузива на поверхность, а также скрытым его продолжением или скрытыми выступами в толще вмещающих пород (рис. 40). В целом эта форма изометричная, овальная, эллипсоидная. Первичные (эндогенные) геохимические ореолы и аномалии рудных элементов и их спутников располагаются как в самих интрузивных телах, так и в зоне их экзоконтакта на расстоянии до 1—3 км. Отмечается зональность в распределении элементов по отношению к интрузиву: ближе к интрузиву и в нем самом концентрируются элементы семейства *d*-литофилов — молибден, вольфрам; дальше от интрузива — элементы семейства *p*-халькофилов — олово, свинец; в самой удаленной зоне от интрузива — элементы семейства *s*- и *p*-литофилов — бериллий, литий, фтор.

Вторичные геохимические и минералогические ореолы и аномалии также располагаются в основном в пределах общего контура локального аномального поля. Однако здесь имеются и отклонения, заключающиеся в том, что наиболее устойчивые в экзогенных условиях минералы могут создавать протяженные потоки в аллювиальных отложениях, выходящие за общие контуры аномального поля. К таким минералам относятся касситерит и берилл. Последний обычно присутствует в легкой фракции шлиха, которая не всегда детально изучается, что приводит к пропуску этого важного минерала.

Интерпретация и оценка локальных геохимических полей в новых районах развития гранитных интрузивов для решения вопроса об ожидаемом типе месторождений должна производиться на основе учета следующих данных: положения в геохимической про-

Рис. 40. Локальное аномальное минерально-геохимическое поле, генетически связанное с гранитным интрузивом, залегающим в вулканогенно-осадочных породах.

1 — граниты аляскитовые (а), скрытое продолжение интрузива (б); участки преимущественного развития минеральных ассоциаций; 2 — кварц-топаз-ферберитовой, 3 — кварц-топаз-касситеритовой, 4 — кварц-турмалин-касситеритовой, 5 — висмут-арсениопирит-флюоритовой, 6 — кварц-касситерит-сульфидной; экзогенные геохимические ореолы и аномалии: 7 — вольфрама, 8 — олова; 9 — контур локального аномального минерально-геохимического поля; 10 — разрывные нарушения



винции, характера шлиховых и геохимических аномалий, специализации гранитов, формы поля, геологических и тектонических условий.

Для аномальных полей, связанных с выходящими на поверхность гранитными интрузивами, шлиховые аномалии в аллювии считаются положительными при содержании касситерита в десятках знаков, вольфрамита и молибденита, тантало-ниобатов — в виде единичных знаков. Геохимическое поле характеризуется отчетливой зональностью геохимических аномалий по отношению к интрузиву: в самом интрузиве — тантал и ниобий, вольфрам, в экзоконтактной зоне — олово, свинец, цинк, литий, бериллий, фтор.

Для аномальных геохимических полей, связанных со скрытыми интрузивами, на поверхности земли могут быть установлены только некоторые наиболее удаленные от интрузива части этой зональности. Общие контуры аномального поля должны проводиться с учетом геофизических аномалий.

Локальные аномальные геохимические поля эндогенных полезных ископаемых, генетически связанных с гранодиоритами, гранодиорит-порфирами, монцонитами, располагаются в петрохимических провинциях фемически-сиалического и сиалически-фемического типов. К группе полезных ископаемых здесь могут быть отнесены медь и молибден, главным типом месторождений является меднопорфировый. Ядром локального аномального геохимического поля в этой группе служат выходящие на поверхность или скрытые интрузивы указанных разновидностей гранитоидов повышенной основности.

Локальные аномальные геохимические поля эндогенного типа, имеющие парагенетическую связь с интрузивами, ха-

рактизируют рудные узлы, поля и месторождения меди, свинца и цинка, золота и серебра, олова. По генезису рудные образования этих элементов могут быть контактово-метасоматическими и гидротермальными высоко- и среднетемпературных типов. Приурочены они к различным петрохимическим провинциям: сиалическим, фемическим, сиалически-фемическим, фемически-сиалическим, щелочно-фемическим.

Рудоносные образования, как правило, относятся к малым интрузиям, преимущественно складчатых областей, а иногда платформ (в их фундаменте и чехле). По петрографическому типу интрузивные породы являются гранитоидами повышенной основности (гранодиориты и др.). Потенциальная рудоносность интрузивных пород определяется невысокими кларками концентрации рудных элементов (2—10).

Форма локальных аномальных геохимических полей определяется характером тектонических структур, в пределах которых размещаются интрузивные тела, оруденение и геохимические аномалии. По форме и масштабу локальные аномальные геохимические поля могут быть подразделены на три группы: локальные аномальные геохимические зоны, локальные аномальные геохимические узлы и локальные геохимические центры. Зоны и узлы объединяют совокупность геохимических аномалий на площади, соответствующей рудному полю или рудному узлу. Аномальные геохимические центры представляют собой группу близких геохимических аномалий, расположенных на площади, соответствующей месторождению. По характеру проявления на современной поверхности локальные аномальные геохимические поля могут быть выходящими на поверхность и скрытыми, фиксируемыми на определенной глубине от поверхности. Зональность аномальных полей этого типа, в отличие от аномальных полей, генетически связанных с интрузиями, проявляется не по отношению к интрузиву, а главным образом по отношению к рудным образованиям — проявлениям и месторождениям.

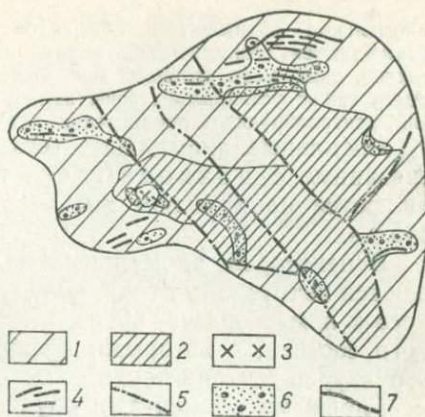
Рассмотрим примеры локальных аномальных геохимических полей эндогенного типа, имеющих парагенетическую связь с интрузиями, для регионов развития свинцово-цинкового, медного и других оруденений.

В региональном поле Змеиногорского района Рудного Алтая [50] выделяются локальные аномальные геохимические зоны северо-западного простирания, соответствующие простиранию основных складчатых структур этого региона и включающие тела интрузивных порфиров и геохимические аномалии свинца, цинка и других элементов. На площадях развития поперечных разрывных нарушений выделяются локальные аномальные геохимические узлы почти изометричной формы, связанной здесь с такими же по форме интрузивами и окаймляющими их геохимическими аномалиями.

В Восточном Забайкалье некоторые локальные аномальные геохимические и минералогические узлы включают рудные поля, приуроченные к крупным изолированным брахиантиклинальным структурам (рис. 41). Здесь породы малых интрузий представлены штоком диоритов и многочисленными дайками диоритовых порфиритов и лампрофиров. Месторождения и проявления свинца и цинка сопровождаются геохимическими ореолами, подтверждаемыми минералогическими ореолами галенита, сфалерита и их спутников.

Рис. 41. Локальный аномальный геохимический узел, включающий рудное поле со свинцово-цинковым оруденением, приуроченный к крупной брахиантиклинальной структуре.

1 — терригенные отложения (нижняя — средняя юра); 2 — сланцево-карбонатная толща (нижний палеозой); 3 — диориты; 4 — диоритовые порфиры, лампрофиты (дайки); 5 — разрывные нарушения; 6 — площади развития геохимических и минеральных ореолов вокруг месторождений и рудопроявлений; 7 — контур аномального узла



Локальные геохимические поля золоторудных объектов будут описаны по данным Г. И. Хорина и Э. Г. Абисалова. В пределах золотоносной региональной геохимической провинции околутурен ряд локальных аномальных геохимических узлов по совокупности геохимических аномалий в аллювиальных потоках. В пределах одного из таких аномальных геохимических золотоносных узлов, имеющих изометрическую форму, выходят массивы гранитов, гранодиоритов и диоритов верхнемелового возраста, прорывающие осадочные отложения нижней юры и вулканогенные отложения нижнего мела (рис. 42,а). В этих отложениях в экзоконтактовой зоне интрузивных тел, а иногда и в них самих выделяются

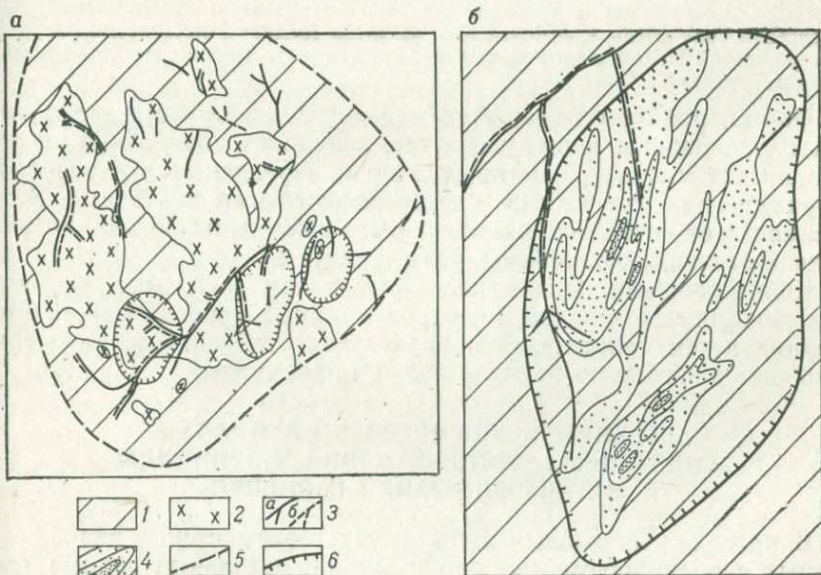


Рис. 42. Локальные аномальные геохимические поля, связанные с золоторудными объектами. По Г. И. Хорину.

а — геохимический узел; б — геохимический центр. 1 — осадочные и вулканогенные отложения; 2 — гранитоиды; 3 — геохимические потоки в аллювии (а — серебро, б — олово); 4 — экзогенные геохимические ореолы серебра в склоновых отложениях (крапом показана концентрация); 5 — контуры геохимического узла; 6 — контуры геохимического центра

аномальные геохимические центры овальной формы. В контурах этих центров размещаются геохимические аномалии комплекса элементов: золото, серебро, свинец, цинк, медь, мышьяк, молибден, висмут, марганец, олово (см. рис. 42,б). Здесь также установлены зоны измененных пород, и серия разрывных нарушений, контролирующей локализацию рудных зон.

Локальные аномальные геохимические поля эндогенного типа, связанные с низкотемпературным оруденением, проявляются на наиболее значительном удалении от магматических очагов.

В некоторых аномальных полях этого типа иногда обнаруживаются интрузивные тела, более древние, чем оруденение, или близкого к ним возраста, преимущественно ультраосновного или основного состава, с которыми предполагается лишь пространственная структурно-тектоническая связь оруденения.

Главными элементами оруденения и связанных с ним локальных аномальных геохимических полей являются элементы семейств: p — свинец, сурьма, фтор; d — цинк, медь, золото, серебро, ртуть.

Аномальные геохимические поля, связанные с низкотемпературным оруденением, располагаются в краевых частях региональных геохимических полей этих же элементов, но связанных с оруденением более высокотемпературных диапазонов.

Например, локальные аномальные геохимические поля свинцово-цинковых месторождений Каратау располагаются в краевой северо-западной части Чаткало-Кураминской свинцово-цинковой провинции. Локальные геохимические аномальные поля Джекказгана и прилегающих районов развития низкотемпературного оруденения приурочены к внешней зоне развития средне- и высокотемпературных месторождений Центрального Казахстана, генетически и парагенетически связанных с интрузиями.

Форма, размеры и параметры распределения химических элементов локальных аномальных геохимических полей, обусловленных низкотемпературным оруденением, определяются в основном структурно-тектоническими и петрографическими факторами. В зависимости от сочетания их могут быть выделены локальные аномальные геохимические зоны, узлы и центры.

Количественная оценка некоторых типов локальных аномальных геохимических полей и центров в горных районах может быть сделана путем сопоставления продуктивностей литогеохимических потоков в аллювии по соответствующим формулам.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ И АНОМАЛИИ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПРИНЦИПЫ ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ И ОЦЕНКИ

В пределах локальных аномальных геохимических полей, связанных с эндогенными месторождениями, отдельные рудные тела сопровождаются отчетливыми или неотчетливыми геохимическими ореолами — первичными (эндогенными) или вторичными (экзогенными). На перспективных участках могут выделяться геохимические аномалии, соответствующие неизвестным ранее рудным телам, в том числе скрытым.

Эндогенные (первичные) литохимические ореолы и аномалии

Эндогенные первичные литохимические ореолы и аномалии эндогенных месторождений, генетически связанных с интрузиями. Основные параметры геохимических ореолов этого типа месторождений тесно связаны с интрузивами, по отношению к которым они и должны рассматриваться.

Отчетливые геохимические ореолы выявлены и изучены для следующих эндогенных месторождений магматического генезиса: медно-никелевых, хромитовых, титаномагнетитовых, редкометальных (в щелочных породах, пегматоидных гранитах, пегматитах). Общей характерной особенностью этих месторождений является то, что главные рудные компоненты в них представлены элементами семейств *d*-литофилов и сидерофилов (титан, ванадий, хром, цирконий, ниобий, гафний, тантал; железо, никель, кобальт); *f*-литофилов (редкие земли); значительно реже *d*-халькофилов (медь, цинк); *p*-литофилов (апатит) и *s*-литофилов (литий, бериллий). Эти месторождения образуются из магматических расплавов или расплавов-растворов. Сопровождающие их первичные геохимические ореолы формируются преимущественно внутри тел магматических (интрузивных) пород и частично в экзоконтактной зоне. При этом элементы семейства *d* III—VIII групп периодической системы концентрируются во вкрапленниках акцессорных (рудных) минералов интрузивных пород (хромиты, титаномагнетиты, циркон и др.); элементы семейства *d* I—II групп — в периферических частях рудных тел (халькопирит), интрузивах и в ближайшей зоне экзоконтакта; элементы семейства *p* и *s* распространены как в самих интрузивных телах, так и в широкой зоне их экзоконтакта. Указанные закономерности распределения некоторых ассоциаций элементов в геохимических ореолах зависят от состава интрузивных тел и их металлогенической специализации.

Рассмотрим вначале примеры тех магматических месторождений, которые сопровождаются геохимическими ореолами и аномалиями, имеющими как контрастные, так и неконтрастные границы с рудными телами. Для этих месторождений характерно наличие промышленных рудных тел со сплошными и вкрапленными рудами, границы между которыми достаточно контрастны. В то же время вкрапленные руды постепенно (неконтрастно) переходят в минералогические и геохимические ореолы, отличающиеся от руд непромышленными содержаниями полезных компонентов. Рудные тела в этих месторождениях располагаются внутри интрузивных массивов и частично в очень узкой зоне их экзоконтакта. Геохимические ореолы окаймляют рудные тела в интрузиве, а затем также переходят в экзоконтактную зону.

Примером подобных объектов является месторождение медно-никелевых руд, приуроченное к пологозалегающему интрузиву габброидов, расположенному среди осадочных и вулканогенных пород. Рудные тела сплошных сульфидных руд приурочены к донным частям интрузива. Над ними прослеживаются вкрапленные руды, которые постепенно переходят во внутриинтрузивный геохимический ореол главных рудных компонентов (см. рис. 18,б). В надинтрузив-

ной зоне прослеживается околонинтрузивный геохимический ореол тех же компонентов, но с значительно меньшими концентрациями. Подобный же ореол выделяется и в подинтрузивной экзоконтактовой зоне. В целом околонинтрузивный геохимический ореол, как уже отмечалось ранее, в виде «чехла» окаймляет интрузив, следуя его форме и размерам. Наличие надинтрузивного геохимического ореола позволяет использовать его как поисковый признак рудоносного интрузива, но мощность этого ореола обычно невелика, повышается она лишь вдоль разрывных нарушений.

Магматические месторождения, рудные тела которых имеют контрастные границы с вмещающими породами, представлены пегматитами с редкометаллическим оруденением (тантал, ниобий, литий, редкие земли). Характерной особенностью их является то, что рудные компоненты, относящиеся к *d*-литофилам (тантал, ниобий), концентрируются в самих пегматитовых телах, практически не выходя за их контакты. Во вмещающих породах наблюдаются геохимические ореолы элементов семейств литофилов *s* (бериллий, литий, цезий) и *p* (бор). При наличии в числе главных компонентов бериллия, лития и цезия в виде минералов берилла, сподумена, поллуцита геохимические ореолы этих же элементов распространяются также во вмещающих породах.

По данным В. Е. Загорского, в пределах одного из танталоносных пегматитовых полей, которое характеризуется локальным аномальным геохимическим поем лития, для каждого пологозалегающего пегматитового тела выделяются свои минеральные и геохимические (элементные) ореолы. В экзоконтактах пегматитов установлены следующие зоны (от неизменных пород к контактам): гольмквиститизации, ослюденения (литиевый биотит-циннвальдит), хлоритизации, турмалинизации. В слюдитах развиты наиболее широкие и отчетливые ореолы лития, рубидия и цезия, в меньшей степени калия и фтора. На изученном месторождении не наблюдается ячеткой зависимости параметров ореолов от мощности пегматитовых жил. Вместе с тем в различных частях одного и того же пегматитового тела отмечаются разные параметры геохимических ореолов, что объясняется неодинаковой трещиноватостью вмещающих пород (ортоамфиболитов). Так, в восточной части поля ширина геохимических ореолов колеблется от долей метра до 8—9 м, в центральной части в экзоконтактовой зоне висячего бока ширина ореолов 13—17 м, лежащего — 25—30 м. В западной части поля ореолы пегматитовых тел различны: для Li до 30 м, Rb 0,2—3 м, редко до 5 м. Б. М. Шмакин [16] предлагает для поисков редкометаллических пегматитов проводить «литиеметрическую» съемку.

В отличие от пегматитов с редкометаллическим оруденением, пегматиты с пьезокварцевым сырьем и слюдами относятся к объектам, создающим неотчетливые геохимические ореолы и аномалии. Это резко ограничивает возможность использования геохимических методов для выявления скрытых пегматитовых тел с этим полезным ископаемым [28].

Постмагматические пневматолит-гидротермальные и гидротермальные месторождения, генетически связанные с интрузиями, сопровождаются геохимическими ореолами и аномалиями двух групп, имеющих контрастные и неконтрастные границы с рудными телами. Главные компоненты в них представлены элементами семейства *d*-литофилов (вольфрам, молибден) и *p-d*-халькофилов (олово, свинец, цинк), а также семейства *s*-литофилов (бериллий). Первая группа представлена жильными и грейзеновыми месторождениями; вторая — штокверковыми с неконтрастными границами.

Имеется немало примеров и таких месторождений, в которых рудные тела представлены одновременно жильными и штокверковыми формами. На одном из таких месторождений эндогенные геохимические ореолы были изучены В. В. Крыловой, по материалам которой и производится их описание.

Комсомольское оловянно-вольфрамовое месторождение приурочено к небольшому дайкообразному телу верхнеюрских лейкократовых и биотитовых гранитов, прорывающих верхнетриас-среднеюрские роговообманково-биотитовые граниты и гранодиориты. Рудное тело Западное представляет собой пологозалегающую штокверковую зону. Рудное тело Восточное — это комплекс жил и прожилков — кварцевых, кварц-арсенопиритовых, кварц-турмалин-арсенопиритовых и арсенопиритовых с грейзеновыми оторочками, контрастно отделяющимися жилами и прожилками от вмещающих гранитов. Элементы-индикаторы, обра-

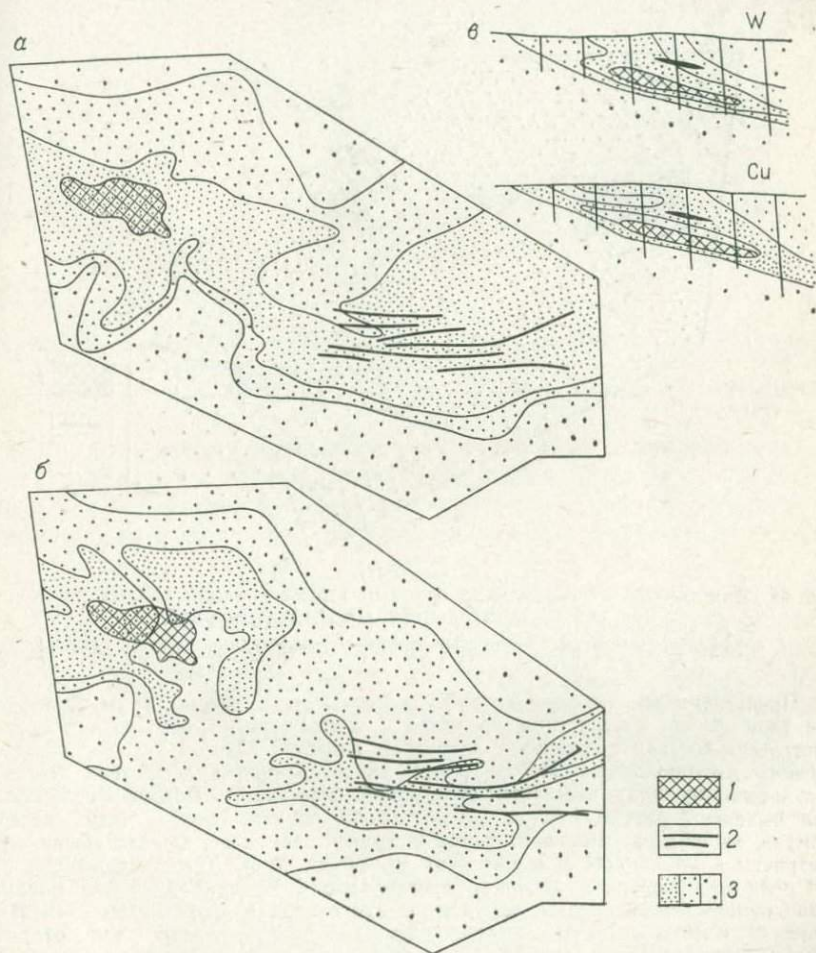


Рис 43. Зональность эндогенных ореолов вольфрама (а) и меди (б) в плане и на разрезе (в) вокруг рудного штокверка и рудных жил оловянно-вольфрамового месторождения. По В. В. Крыловой.

1 — рудный штокверк, 2 — рудные жилы; 3 — эндогенные ореолы

зующие отчетливые эндогенные геохимические ореолы вокруг рудных тел месторождения, представлены оловом, вольфрамом, мышьяком, медью, бором, серебром, молибденом, висмутом. Рудное тело штокверкового типа окаймлено более широкими ореолами, жильные рудные тела — более узкими и вытянутыми по простиранию ореолами, локализованными в основном в пределах рудоносного интрузива. Следует отметить заметную зональность в положении ореолов вольфрама (рис. 43,а) и меди (см. рис. 43,б). Последняя занимает периферическую часть штокверкового рудного тела, что подтверждается и геохимическими разрезами через это рудное тело (см. рис. 43,в).

Локальные ореолы свинца установлены только в пределах самих рудных тел, где известны выделения галенита. Во вмещающих гранитах же повсеместно наблюдается резкое понижение концентрации свинца и образование отрицательных ореолов выщелачивания (рис. 44). Подобные ореолы объясняются процессом выноса свинца из разрушающихся полевых шпатов гранитов при их грейзенизации.

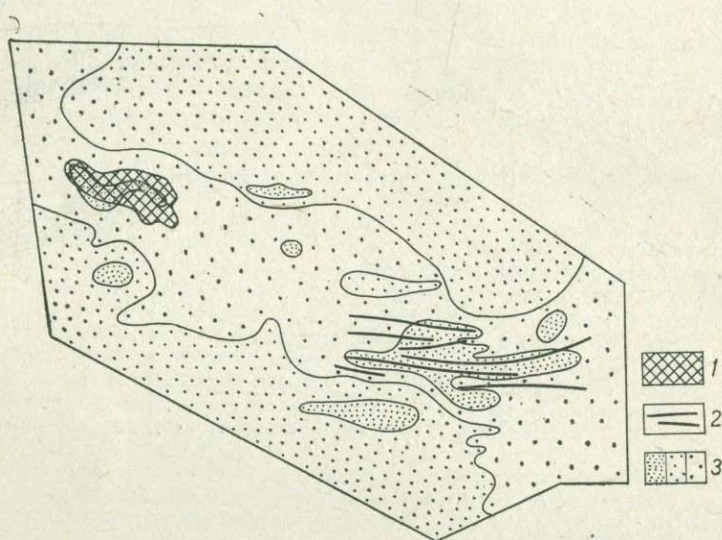


Рис 44. Эндогенные отрицательные ореолы выщелачивания свинца вдоль рудной зоны в гранитах. По В. В. Крыловой.

1 — рудный штокверк, 2 — рудные жилы, 3 — эндогенные ореолы свинца

Представителем оловорудного жильного месторождения, на котором рудные тела имеют контрастные контакты с вмещающими породами и которое генетически связано с гранитной интрузией, является Южный участок Халчерангинского месторождения. По характеру минерализации рудные тела относятся к сульфидному типу касситерит-силикатной формации. Вокруг сближенных жил выявлены литохимические ореолы олова, свинца, цинка, меди, серебра, висмута, молибдена, мышьяка, фтора и других элементов. Ореолы олова слабо контрасты и по ширине невелики — от 10—20 до 40 м. Даже сближенные рудные тела не образуют суммарного ореола (рис. 45). Такие же узкие, окаймляющие рудные жилы ореолы, характерны для свинца и других элементов. В отличие от Комсомольского месторождения, где вблизи рудных тел отмечены ореолы выщелачивания свинца, здесь этот элемент формирует положительные ореолы отложения, связанные с наличием галенита в числе главных минералов рудных тел. Вертикальная зональность геохимических ореолов выражается в преимущественном накоплении на верхних горизонтах серебра, свинца и цинка, а на нижних — молибдена, меди, олова и висмута.

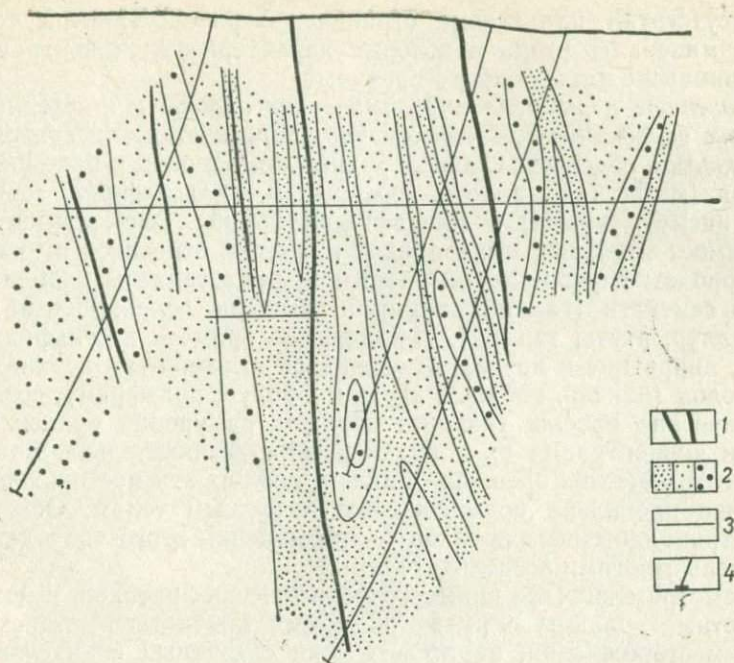


Рис. 45, Эндогенные ореолы олова рудных жил Хапчерангинского месторождения. По В. В. Крыловой.

1 — рудные жилы, 2 — ореолы, 3 — горизонты подземных выработок, 4 — скважины

Для определения прогнозных ресурсов в жильных оловорудных месторождениях с контрастными границами ореолов В. Л. Барсуков [8] предложил использовать содержание фтора в первичных ореолах; для этого рекомендуется следующая зависимость:

$$Q_{\text{лин.}} = 68,5 - 59,3 K',$$

где $Q_{\text{лин.}}$ — линейные ресурсы; $K' = F_p / F_{\text{ор}}$; F_p — среднее содержание фтора в жильном выполнении рудного тела, вскрытого на поверхности или прогнозируемого на глубине; $F_{\text{ор}}$ — среднее содержание фтора в ореоле и околожильных породах. Эта зависимость справедлива для рудных тел, мощность которых более 4—5 м. Для рудных тел мощностью 0,5—4,0 м полученные результаты уменьшаются на поправочный коэффициент:

$$R = 0,09 + 0,24 \text{ } m_p,$$

где m_p — мощность жильного выполнения, м.

Тогда

$$Q_{\text{прогн.}} = Q_{\text{лин.}} \cdot R.$$

Как отмечает В. Л. Барсуков, определение прогнозных ресурсов по указанной методике может быть выполнено для жильных месторождений и минерализованных зон линейной формы, в кото-

рых отсутствуют или весьма ограниченно распространены собственные минералы фтора и которые характеризуются контрастными границами с вмещающими породами.

Эндогенные первичные литохимические ореолы и аномалии эндогенных сульфидных месторождений, парагенетически связанных с интрузиями, содержат главные рудные компоненты в виде *d*-халькофилов (медь, цинк, золото, серебро), *p* — халькофилов (свинец, олово, висмут, сурьма) и *s*-литофилов (барий). Элементы-спутники в самостоятельных минералах и примесях относятся к нижним полупериодам периодической системы и представлены элементами тех же семейств (галлий, германий, мышьяк, селен, кадмий, индий, теллур, ртуть, таллий). Изоморфные примеси в сульфидах — пирите, пирротине и других, относящиеся к элементам верхних полупериодов (никель, кобальт, хром, молибден, вольфрам), создают геохимические ореолы главным образом на уровне рудных тел, так как концентрация их в рудах весьма незначительна. Зональность геохимических ореолов, сопровождающих эти месторождения, отчетливо проявлена по отношению к рудным телам. Основные параметры эндогенных ореолов месторождений этого типа детально изучены многими исследователями.

Рассмотрим вначале примеры геохимических ореолов, имеющих контрастные границы с рудными телами контактово-метасоматических месторождений, парагенетически связанных с интрузиями.

На скарновом свинцово-цинковом месторождении главное рудное тело представляет собой слепую скарново-рудную залежь, приуроченную к контрастной границе несогласия рудовмещающих известняков триаса с вулканитами верхнего мела и полого залегающую на глубине 700—1000 м от поверхности. Геденбергитовые скарны содержат массивные и прожилково-вкрапленные руды, главными рудными минералами которых являются сфалерит и галенит. Второстепенное значение имеют пирротин, халькопирит, арсенопирит, магнетит, станнин, касситерит, хлорит, флюорит актинолит, мусковит, эпидот и др. Над скарново-рудной залежью и на ее флангах вдоль крутопадающих разрывных нарушений, пересекающих покров вулканитов, локализируются рудопроявления в виде зон с прожилково-вкрапленным или жильным сульфидным оруденением. Эти зоны отчетливо фиксируются ореолами измененных пород с повышенными содержаниями карбонатов, серицита, кварца, гидрослюд, хлорита (рис. 46, а). По данным С. В. Григоряна, А. Г. Натарова и В. И. Сафронова, эндогенные геохимические ореолы рудных элементов выявлены над скарновой залежью и вдоль крутопадающих разрывных нарушений, проходящих через экранирующий покров вулканитов. Эти нарушения и являются основными проницаемыми зонами, которые обеспечили выход на поверхность геохимических ореолов ряда элементов-индикаторов оруденения (свинец, цинк, серебро, мышьяк, калий, см. рис. 46, б в, г). Ореолы хрома, бора, кобальта прилегают непосредственно к скарновой залежи, отходя от ее контакта не более чем на 200 м. Близкие параметры отмечены для ореолов меди, никеля и ванадия. Все эти элементы связаны с минералами, содержание которых в рудах очень невелико или они находятся в качестве элементов-примесей в основных минералах. По данным В. И. Сафронова, который использовал метод интерпретации по монотонно изменяемым показателям (программа 062-МГУ), ряд вертикальной зональности геохимических ореолов на данном месторождении имеет следующий вид (сверху вниз): мышьяк, серебро, свинец, цинк, олово, медь, никель, кобальт.

Наряду с положительными ореолами отложения над рудным телом фиксируются отрицательные ореолы выщелачивания натрия, кальция и алюминия (см. рис. 46, д). Ряд зональности подтверждается также тем, что корреляционные связи между ассоциацией цинк, свинец, серебро и олово, с одной стороны,

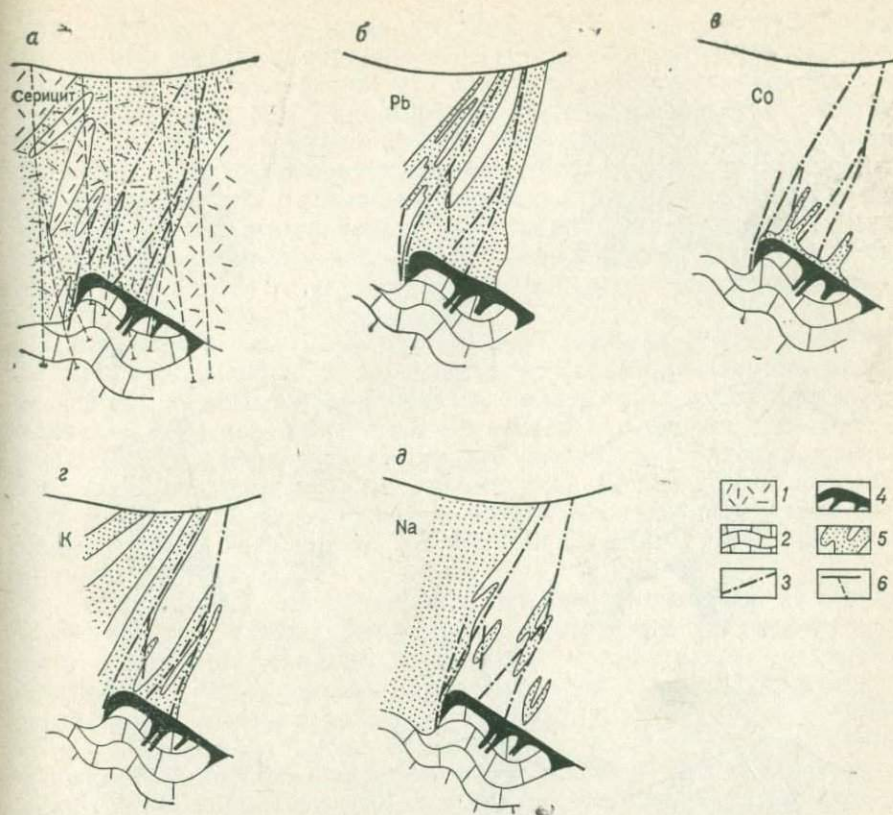


Рис. 46. Минеральные (а), геохимические положительные (б, в, г) и отрицательные (д) ореолы над скарново-рудной залежью. По В. И. Сафронову.

1 — липариты (мел), 2 — известняки (верхний триас), 3 — разрывные нарушения, 4 — рудные залежи, 5 — геохимические ореолы, 6 — скважины

и ассоциацией никель и кобальт — с другой, являются несущественными. В то же время цинк, свинец, серебро и олово, так же как никель и кобальт, попарно связаны значительными положительными коэффициентами корреляции.

Другое скарновое свинцово-цинковое месторождение характеризуется близкими к месторождению, описанному выше, параметрами эндогенных геохимических ореолов. Поэтому для него отметим лишь разработанную В. И. Сафроновым схему формирования скарново-рудной залежи и сопровождающих ее эндогенных геохимических ореолов (рис. 47). После завершения вулканических процессов проявились тектонические разрывные нарушения, вдоль которых проникали гидротермальные растворы. В начальный период скарнообразования (I этап 1 стадия) возникли гранат-волластонитовые скарны и окружающий их эндогенный ореол кремния. Одновременно происходило образование даек основных и средних пород. По мере развития скарнового процесса (I этап 2 стадия) формируются аксинит-геденбергитовые скарны и эндогенные ореолы

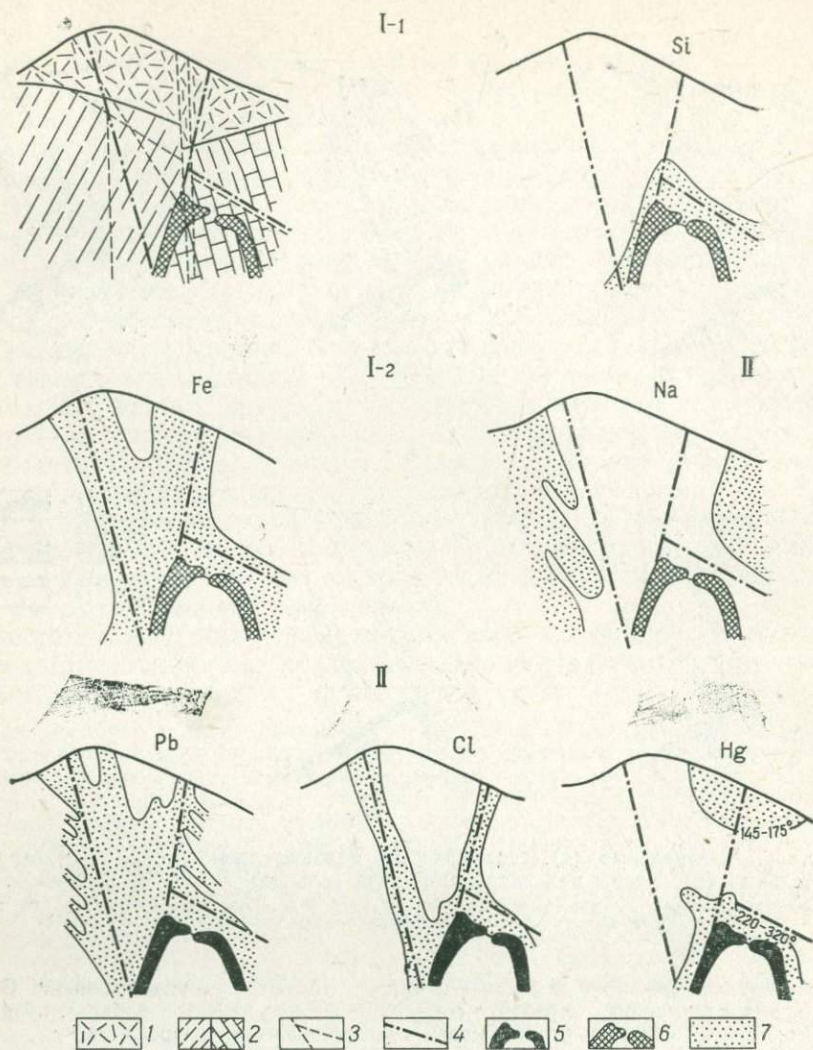


Рис. 47. Схема формирования скарново-рудной залежи и эндогенных геохимических ореолов. По В. И. Сафронову.

1 — туфы кварцевых порфиров, 2 — алевролиты и известняки, 3 — дайки диабазовых порфиров, 4 — разрывные нарушения, 5 — рудное тело, 6 — скарны, 7 — эндогенные геохимические ореолы; I-1, I-2, II — этапы и стадии формирования

лы скарнообразующих элементов — марганца, железа, бора. В течение II этапа — рудная залежь и эндогенные ореолы: 1) петрогенных элементов — калия, серы, рубидия (положительные ореолы) и натрия, лития, алюминия, кальция (отрицательные ореолы); 2) рудных элементов — свинца, цинка, меди, ртути, сурьмы, олова, никеля, кобальта; галогенов — хлора и фтора. Особенно следует отметить ореолы ртути. В надрудной части разреза на уровне днев-

ной поверхности локализуется форма ртути с температурой испарения 145—175 °С (металлическая ртуть). Форма ртути с температурой испарения 180—210 °С равномерно распределена по разрезу (хлорид ртути). Третья форма ртути с температурой испарения выше 220 °С (метациннабарит и киноварь) локализуется вблизи рудного тела. Зоны рассеянной минерализации, не сопровождающие скарновые рудные тела, отличаются следующими параметрами: пониженными значениями содержаний свинца, цинка, олова; отсутствием аномальных значений скарнообразующих элементов; сохранением положительных корреляционных связей лишь в парах свинец — цинк, свинец — серебро.

Эндогенные литохимические ореолы колчеданных месторождений. По сравнению со многими другими типами эндогенных месторождений литохимические ореолы колчеданных месторождений наиболее изучены. Этому способствовали исследования сотрудников ИМГРЭ, Свердловского горного института, Александровской геохимической экспедиции, а также ряда ПГО. Среди колчеданных месторождений выделяются различные типы по составу руд, отличающиеся также и по составу эндогенных литохимических ореолов.

По данным Э. Н. Баранова и др., первичные геохимические ореолы разных типов колчеданных месторождений характеризуются качественно сходным элементным и минеральным составом, близким к составу рудных тел. Основными элементами-индикаторами колчеданного оруденения являются представители семейств *d*- и *p*-халькофилов (медь, цинк, свинец, серебро, мышьяк), *d*-сидерофилов (молибден, кобальт) и *s*-литофилов (барий). Второстепенными по концентрации, но важными по поисковому значению могут быть также халькофилы (сурьма, ртуть, олово, висмут, золото, кадмий). Э. Н. Баранов разработал следующий ряд вертикальной зональности (снизу вверх): олово—молибден—мышьяк (1), кобальт, никель—висмут—медь (1), золото (1)—цинк—кадмий—свинец—серебро—медь (2), мышьяк (2), золото (2)—барий—ртуть. Протяженность ореолов над рудными телами составляет не менее 300 м, достигая 1000 м и более для крутопадающих структур.

Погребенные под рыхлыми отложениями медноколчеданные месторождения, выходящие на древний эрозионный уровень, и слепые близповерхностные, залегающие под рыхлыми отложениями месторождения, характеризуются близкими к описанным параметрами литохимических ореолов. Более сложная картина эндогенных ореолов установлена для слепых глубокозалегающих медноколчеданных месторождений.

К ним, например, относится Подольское медноколчеданное месторождение (восточный склон Южного Урала), рудные тела которого залегают на глубине от 300 до 700 м от поверхности. На основе данных Б. П. Алексева, а также Ю. А. Болотина и Л. Н. Соляной приведем характеристику эндогенных геохимических ореолов этого месторождения. По положению в разрезе здесь выделяются три зоны развития ореолов (рис. 48). Первая зона, приуроченная к рудовмещающей толще нижнего структурного этажа, включает ореолы, непосред-

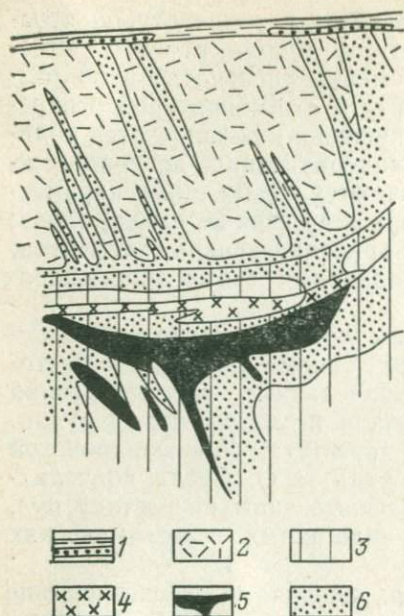


Рис. 48. Эндеогенные геохимические ореолы Подольского медноколчеданного месторождения. По Б. П. Алексеву, Ю. А. Болотину и Л. Н. Соляной.

1 — рыхлые отложения, включающие погребенные ореолы; структурные этажи; 2 — верхний (туфогенно-осадочные отложения); 3 — нижний (вулканогенные породы); 4 — субвулканические порфиры; 5 — рудные тела; 6 — комплексные эндогенные ореолы

ственно прилегающие к пологой слепой рудной залежи. Надрудные ореолы этой зоны содержат медь, цинк, свинец, серебро, барий, мышьяк, сурьму, ртуть; мощность ореола 20—25 м. Подрудный ореол мощностью до 200—250 м включает висмут, кобальт, молибден, медь. Вторая зона, промежуточная, локализуется выше первой в кровле нижнего структурного этажа под экраном субвулканических порфиров. Ореолы этой зоны содержат медь, свинец, цинк, барий, мышьяк, ртуть; мощность зоны 50—70 м. Третья зона, внешняя, располагается над предыдущими в мощной толще вулканогенно-осадочных пород верхнего структурного этажа. Ореолы здесь приурочены к крутопадающим зонам трещиноватости и расланцевания, которые достигают эрозионной поверхности, погребенной под рыхлым покровом. В составе ореолов преобладают цинк, ртуть, мышьяк, иногда медь, свинец, барий, реже кобальт и молибден. Особый интерес представляют ореолы ртути. По данным Б. П. Алексева, в ореолах третьей зоны преобладают низкотемпературные (100—185° и 190—235°С) и среднетемпературные (240—285°С) формы ртути. По данным Ю. А. Болотина и Л. Н. Соляной, на месторождении отмечаются также и отрицательные ореолы выщелачивания никеля, марганца, хрома, ванадия и титана, т. е. тех элементов, которые характерны для вмещающих вулканогенных и субвулканических пород месторождения.

Интересные данные о составе элементов-примесей во вкрапленниках пиритов метасоматитов, окаймляющих рудные тела Валенторского медно-цинкового колчеданного месторождения на Северном Урале, получены Г. Е. Ковалевым. Для пиритов лежащего бока месторождения характерно увеличение содержания меди, мышьяка, молибдена, кобальта по сравнению с пиритами висячего бока. В первичных ореолах отмечается поперечная зональность, выражающаяся относительным накоплением свинца, цинка, серебра и кадмия в висячем боку рудной зоны, а молибдена, кобальта, меди и мышьяка в ее лежащем боку, что согласуется с установленными рядами зональности С. В. Григоряна и Э. Н. Баранова. Эти данные, кроме того, указывают и на то, что так называемые подрудные элементы ореолов сульфидных месторождений (молибден, кобальт) могут быть связаны с составом элементов-примесей в пиритизированных зонах метасоматически измененных пород, которые встречаются не только под рудными телами, но и над ними. Тогда становится понятным появление заметных концентраций молибдена в надрудных ореолах некоторых колчеданных место-

рождений. Пириты, сопровождающие колчеданные месторождения, в отличие от безрудных зон пиритизации, по данным Г. Е. Ковалева, характеризуются резко повышенным содержанием (в десятки раз) меди, цинка, серебра, свинца и пониженным содержанием кобальта, никеля, титана, а также повышенной частотой встречаемости сурьмы, висмута, кадмия и теллура. Кобальт-никелевое отношение также различно, в пиритах колчеданных месторождений от 3 до 30 (среднее 6—8); в пиритах зон безрудной вкрапленности от 0,2 до 40 (среднее 2); в пиритах контактово-метасоматических месторождений меди халькопирит-магнетитового состава — более 30.

Колчеданно-полиметаллические месторождения Рудного Алтая, по данным А. А. Головина, сопровождаются широкими эндогенными ореолами комплексного состава — цинк, медь, свинец, молибден, серебро, висмут, кобальт, кадмий, мышьяк, в подчиненном количестве встречаются олово, стронций, ртуть, вольфрам, никель.

Ореолообразующие элементы находятся в основном в виде примесей в пирите, количество которого составляет до 90—98 % от массы сульфидного концентрата, или в виде выделений собственных минералов — сфалерита, халькопирита, галенита и др. В зонах околорудных метасоматитов установлены отрицательные ореолы выщелачивания ванадия, хрома и марганца. В целом для всех выделенных минерально-геохимических типов колчеданно-полиметаллических, полиметаллических и барит-полиметаллических месторождений А. А. Головин отмечал единую объемную асимметричность зональности эндогенных геохимических ореолов (рис. 49).

Эндогенные геохимические ореолы постмагматических жильных свинцово-цинковых месторождений.

По данным Н. Н. Трофимова и А. И. Рычкова [46], на Садонском свинцово-цинковом месторождении выделяются три группы ореолов (рис. 50): 1) сопровождающие рудные тела по всему их простиранию и падению и замыкающиеся на их выклинивании (свинец, цинк, медь, серебро, марганец); 2) надрудные, продолжающиеся далеко (до 300 м) вверх от рудных тел (йод, ртуть, сурьма, бор); 3) приуроченные к средней и нижней частям рудных тел (кобальт, никель, молибден, висмут). Как видно из рис. 50, общая мощность ореолов первой и третьей групп колеблется в пределах 30—50, реже 80 м. Для ореолов второй группы надрудных элементов, которые авторы называют элементами широкого рассеяния (ЭШР), мощность ореолов возрастает до 150—200 м. В большинстве случаев ореолы имеют четкие контакты с рудными телами, в составе которых главными минералами являются кварц, галенит, сфалерит, пирит, пирротин, кальцит. Обобщенный ряд вертикальной зональности геохимических ореолов имеет следующий вид (сверху вниз): йод, сурьма, ртуть, бор, серебро, марганец, цинк, медь, свинец, никель, кобальт, молибден, висмут.

Представителем штокверковых рудных зон, для которых отмечаются неконтрастные границы эндогенных геохимических ореолов, является одно из золоторудных месторождений.

Внутри крутопадающих рудных зон, состоящих из гидротермально измененных габброидов и гипербазитов верхнемелового — верхнесенонского возраста, прослеживаются кварцевые жилы и прожилки небольшой мощности. Оруденение парагенетически связано с посторогенным комплексом малых интрузий (последнеэоценового возраста), создавших тела плагиогранитов, гранодиоритов,

a

			Pb	Zn	Ag	Ba	Cd			
	Zn	Pb	Ag	Ba	Cd	Cu	Bi	Mo		
	Zn	Pb	Ag	Cu	Mo	Bi	Ba	Cd	As	
Zn	Cu	Pb	Mo	Bi	Ag	As	Cd	Co	Au	Ba
Cu	Zn	Mo	Bi	Pb	Ag	Co	Au	Cd	As	Sn
	Cu	Mo	Zn	Bi	Co	Sn	Au	Pb	As	Cd
			Mo	Cu	Co	Bi	Zn	Sn		
			Mo	Co	Sn	Cu	Bi			

б

			Pb	Ag	Ba	Cd	Zn				
	Pb	Ag	Ba	Zn	As	Mo	Au	Cu			
Pb	Zn	Ag	Cu	Cd	As	Au	Ba	Bi	Mo		
Zn	Cu	Pb	Cd	As	Ag	Au	Bi	Mo	Co	Sn	Ba
Zn	Pb	Cu	Ag	Au	Cd	As	Mo	Bi	Co	Ba	Sn
	Cu	Zn	Pb	Mo	As	Cd	Bi	Co	Ag	Sn	Ba
	Cu	Mo	Co	Zn	Pb	Cd	Sn	As			
	Cu	Mo	Co	Zn	Cd	Sn					

в

		Ag	Ba	Pb	Au	As	Zn	Cd	Cu		
	Ag	Pb	Au	Ba	As	Zn	Cd	Cu	Mo		
Pb	Ag	Au	Zn	Ba	Cd	As	Cu	Mo	Bi		
Pb	Ag	Zn	Cu	Cd	Au	As	Ba	Mo	Bi	Co	
Pb	Ag	Cu	Zn	Cd	Au	Mo	As	Bi	Co	Ba	Sn
Au	Zn	Cu	Pb	Ag	Cd	Mo	Co	Sn	As	Bi	
	Cu	Mo	Zn	Pb	Co	Cd	Sn	Bi			
			Mo	Sn	Co						

Рис. 49. Асимметричность зональности геохимических ассоциаций элементов в ореолах колчеданно-полиметаллических (*a*), полиметаллических (*б*) и барит-полиметаллических (*в*) месторождений в направлении (сверху вниз) от фронтальных зон ореолов к тыловым. По А. А. Головину. Подчеркнуты уровни локализации рудных тел

диоритов и диорит-порфиров. В составе штокверковых зон и жильных тел установлены рудные минералы: пирит, арсенопирит, золото, халькопирит, галенит, сфалерит, антимонит; жильные минералы — кварц, хлорит, серицит, кальцит, барит, доломит. Выделяется шесть стадий минералообразования, из которых наиболее продуктивные: III стадия кварц-карбонат-сульфидная (золотоносная); IV — кварц-карбонат-золоторудная и V — кварц-карбонат-антимонитовая (золотоносная). Вокруг золоторудных тел выявлены и оконтурены эндогенные геохимические ореолы отложения: золото, медь, мышьяк, цинк, ртуть, а также эндогенные геохимические ореолы выщелачивания никеля и кобальта. Изучение минералогических и геохимических особенностей золоторудного месторождения позволило Б. Г. Безирганову разработать по принципу схемы минералообразования схему формирования эндогенных геохимических ореолов золота и его элементов-индикаторов (рис. 51). В первую стадию формирования измененных пород происходило выщелачивание никеля и кобальта из габброидов и гипербазитов, в результате чего вокруг рудных тел создавались их отрицательные ореолы.

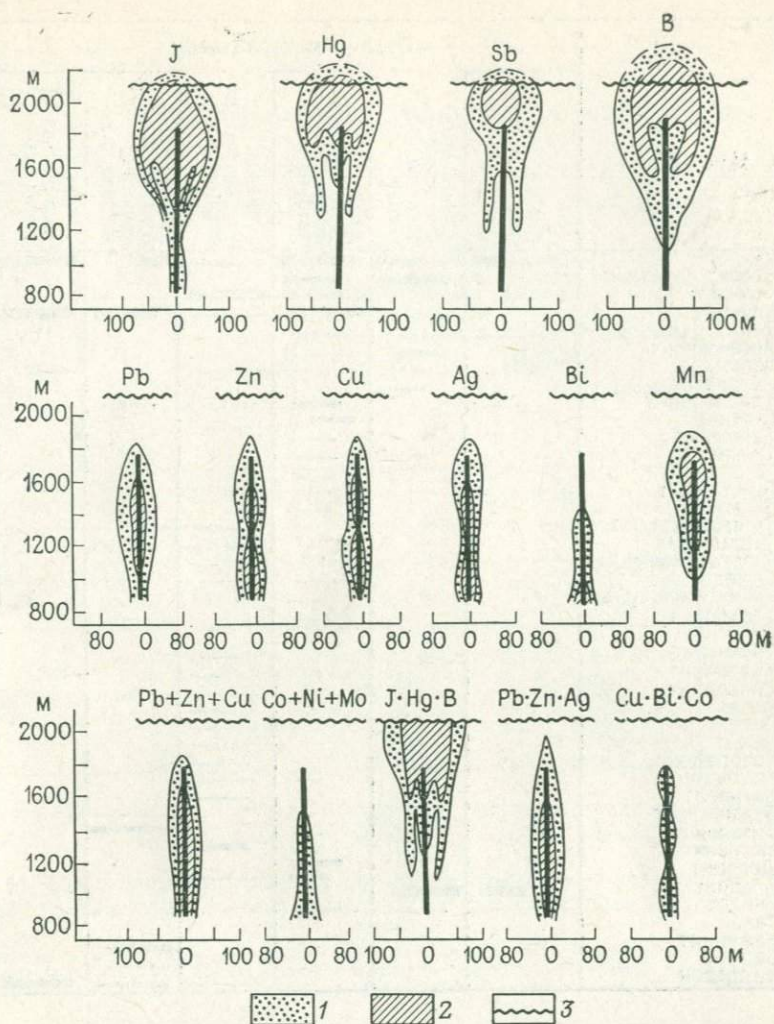


Рис. 50. Обобщенная модель первичных ореолов в поперечном вертикальном разрезе на Садонском месторождении [46].

Содержание элементов: 1 — $C_{\Phi} \cdot e^2 - C_{\Phi} \cdot e^3$; 2 — более $C_{\Phi} \cdot e^3$; 3 — уровень сечения

К этой же стадии может быть отнесено образование слабых ореолов меди. Во вторую стадию формировались интенсивные ореолы отложения золота и мышьяка. С третьей стадией связано образование ореолов отложения меди, золота, мышьяка, серебра, сурьмы, висмута, цинка и свинца; с четвертой — ореолов золота, серебра, сурьмы, висмута, свинца, теллура, ртути. Пятая стадия завершается образованием ореолов меди, сурьмы и свинца.

Эндегенные геохимические ореолы постмагматических месторождений, не имеющих видимой связи с интрузиями. Постмагматические низкотемпературные месторождения и сопровождающие

Минералы	Стадии минерализации					
	I Кварцевая (предрудная)	II Кварц-пирит- арсенопирит- товая золото- носная	III Кварц-кар- бонат-суль- фидная зо- лотоносная	IV Кварц- карбонат- золоторудная	V Кварц-кар- бонат-анги- монитовая золотоносная	VI Кварц- карбонатная (безрудная)
Кварц	—	—	—	—	—	—
Хлорит		—	—	—	—	—
Серицит		—	—	—	—	—
Кальцит			—	—	—	—
Пирит	—	—	—	—	—	—
Арсенопирит		—	—	—	—	—
Золото		—	—	—	—	—
Лёллингит		—	—	—	—	—
Халькопирит	—	—	—	—	—	—
Галенит			—	—	—	—
Сфалерит			—	—	—	—
Теннантит			—	—	—	—
Тетраэдрит			—	—	—	—
Герсдорфит			—	—	—	—
Висмутин			—	—	—	—
Теллуровисмутит			—	—	—	—
Тетрадимит			—	—	—	—
Теллур(самородный)			—	—	—	—
Серебро			—	—	—	—
Висмут(самородный)			—	—	—	—
Халькозин			—	—	—	—
Энаргит			—	—	—	—
Креннерит			—	—	—	—
Калаверит			—	—	—	—
Сильванит			—	—	—	—
Алтаит			—	—	—	—
Петцит			—	—	—	—
Гессит			—	—	—	—
Колорадоит			—	—	—	—
Киноварь			—	—	—	—
Нагиагит			—	—	—	—
Буланжерит			—	—	—	—
Антимонит			—	—	—	—
Магнетит			—	—	—	—
Доломит			—	—	—	—
Анкерит	—	—	—	—	—	—
Эпидот		—	—	—	—	—
Тальк			—	—	—	—
Каолинит			—	—	—	—
Барит			—	—	—	—
Халцедон			—	—	—	—

их эндогенные (первичные) ореолы и аномалии характеризуются главными рудными компонентами, относящимися к наиболее подвижным элементам семейств *d*- и *p*-халькофилов (медь, цинк, золото, серебро, ртуть, свинец, сурьма); *p*- и *s*-литофилов (фтор, барий, стронций). Элементы-спутники могут быть различными в зависимости от содержания примесей в рудных и жильных минералах (никель, кобальт, олово, висмут).

Среди месторождений, в которых геохимические ореолы имеют контрастные границы с рудными телами, могут быть отмечены золоторудные и сурьмяно-ртутные. Неконтрастные границы ореолов с рудными телами характерны для многих стратиформных месторождений меди (медистые песчаники), свинца и цинка (в карбонатных породах).

Элементы-индикаторы золоторудного оруденения		Стадии формирования эндогенных геохимических ореолов						
Привносимые	Выщелачиваемые	I	II	III	IV	V	VI	
Cu Au As Ag Sb Bi Zn Pb Te Hg Ba	Ni Co Cr	■	■	■	■	■	■	
Характер растворов		Кислотный	Щелочной	Щелочной			Щелочно-нейтральный	
Ряд выщелачивания		Cr, Ni, Co						
Ряд привноса (отложения)		Si, Al, Cu		As, Au	Cu, Au, As, Ag, Sb, Bi, Zn, Pb, Te, Hg, Ba		Si, Ca	
Схема формирования эндогенных ореолов								

Рис. 51. Схема последовательности выделения минералов и формирования эндогенных геохимических ореолов золоторудного месторождения. По Б. Г. Безирганову.

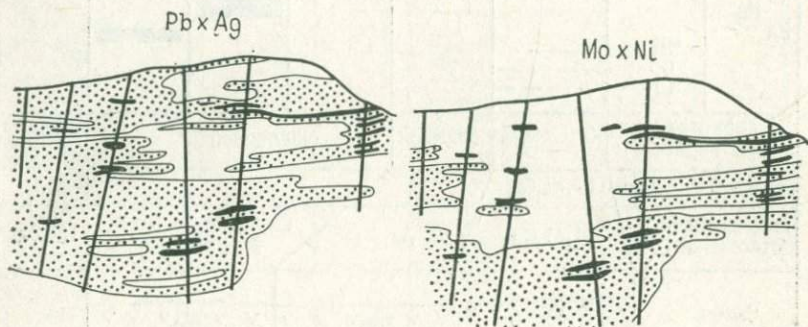
1 — габбро и перидотиты; 2 — рудное тело; 3 — разрывные нарушения; 4 — ореолы измененных пород и ореолы выщелачивания никеля и кобальта; 5 — ореолы концентрации никеля и кобальта; 6 — ореолы отложения золота; 7 — ореолы элементов-спутников

Примером месторождения, эндогенные геохимические ореолы которого имеют контрастные границы с рудными телами, является золоторудное месторождение низкотемпературного типа, залегающее в меловых конгломератах и песчаниках. Крутопадающие кварцевые золоторудные жилы содержат незначительные количества сульфидов — пирит, арсенопирит, пираргирит, антимонит, марказит. По данным В. В. Поликарпочкина, в эндогенных ореолах установлены серебро, мышьяк, сурьма, медь, цинк, свинец. Вертикальная зональность ореолов выражается максимальной концентрацией золота и серебра на глубоких горизонтах и последовательной сменой их зонами развития сурьмы, меди и мышьяка по мере приближения к поверхности.

Эндогенные геохимические ореолы стратиформного месторождения свинца и цинка в карбонатных породах будут рассмотрены на примере месторождения Чо-Диен (СРВ) по материалам Нгуен Ван Биня.

Месторождение приурочено к осадочным породам силуро-девонского возраста, среди которых выделяются рудовмещающие известняки с маломощными прослоями глинисто-серпичитовых и известковистых сланцев. Рудные тела представлены пластообразными горизонтально залегающими залежами сплошных сульфидных руд, переходящих в прожилково-вкрапленные руды. Выделяются также жилы- и линзообразные крутопадающие рудные тела, имеющие подчиненное значение. Главными рудными минералами являются сфалерит, пирит, галенит; второстепенными — арсенопирит, халькопирит, пирротин. Жильные минералы — кальцит, доломит, кварц. По мнению большинства исследователей, месторождение имеет гидротермальный генезис, что, в частности, доказывается характером

а



б

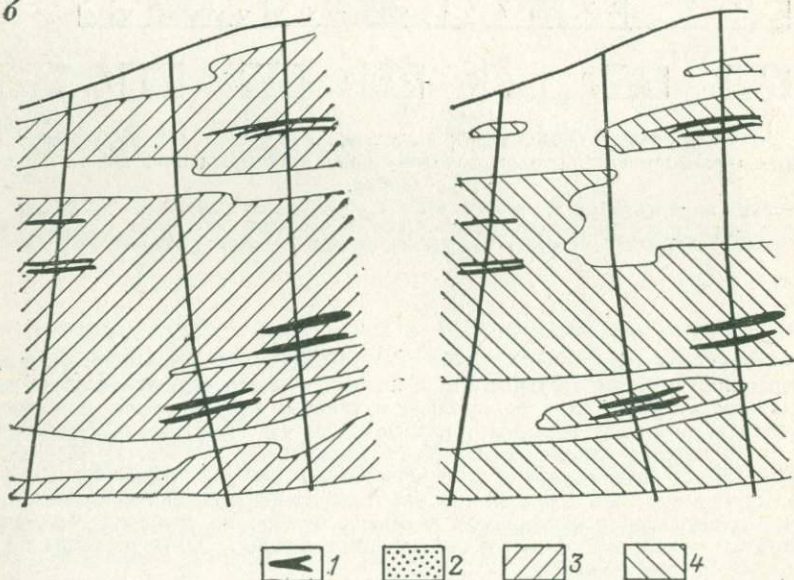


Рис. 52. Эндеогенные геохимические ореолы (а) и ореолы измененных пород (б) стратиформного свинцово-цинкового месторождения Чо-Диен. По Нгуен Ван Биню

1 — рудные тела, 2 — геохимические ореолы, 3 — ореолы доломитизации, 4 — ореолы окварцевания

вертикальной зональности оруденения, выражающейся в зональности эндогенных ореолов. Отмечается, например, концентрация на нижних горизонтах месторождения более высокотемпературных минералов (пирит, халькопирит, пирротин, магнетит, касситерит); на верхних горизонтах — более низкотемпературных минералов (галенит, сфалерит). Эта закономерность отражается в эндогенных геохимических ореолах сопровождающих пологозалегающие рудные тела (рис. 52,а). Ореолы одних элементов (свинец, серебро) интенсивно развиты по всему разрезу месторождения или несколько более интенсивно на верхних горизонтах, в то время как ореолы других элементов (никель, молибден) имеют место главным образом на нижних горизонтах, где эти элементы, по-видимому, являются элементами-примесями более широко развитых здесь пирита и пирротина. Эндогенные геохимические ореолы тесно связаны с ореолами измененных пород: последние больше первых в десятки раз (см. рис. 52,б) и являются также очень важным доказательством гидротермального происхождения месторождения.

Среди низкотемпературных постмагматических месторождений наиболее детально изучены первичные ореолы сурьмы и ртути. Особое положение в этой группе занимают месторождения горного хрусталя. Они относятся к объектам, создающим неотчетливые геохимические аномалии. По данным Л. Н. Хетчикова и др., в первичных ореолах вокруг хрусталеносных жил Памира установлены мышьяк, ртуть, барий, свинец, цинк и др., но эти ореолы не отличаются большой шириной и контрастностью. Авторы рекомендуют производить изучение таких ореолов при буровых работах в процессе поисков жильных тел на глубине.

Постмагматические месторождения различных типов нередко сопровождаются не только ореолами — геохимическими и измененных пород, — но и ореолами газожидких включений в минералах или, иначе, ореолами пропаривания, которые могут быть использованы для прогноза оруденения [2].

Зональность эндогенных геохимических ореолов и аномалий. Геохимическая зональность — это закономерное изменение в пространстве ассоциаций химических элементов и их концентраций по отношению к месторождению полезного ископаемого, рудному телу или другому геологическому объекту. Зональность является очень важным параметром интерпретации и оценки аномальных геохимических полей и геохимических аномалий.

В связи с этим многие исследования посвящены рассмотрению различных сторон проблемы зональности. Некоторые вопросы этой проблемы решены достаточно основательно. Например, разработаны ряды вертикальной зональности для гидротермальных сульфидных месторождений (ряды Л. Н. Овчинникова и С. В. Григоряна).

Зональность литохимических ореолов на известных эндогенных месторождениях, где ведутся разведочные или эксплуатационные работы, выявлена достаточно детально и потому может служить эталоном или моделью для интерпретации и оценки геохимических аномалий в новых районах или на новых площадях известных районов. Об этом свидетельствуют ранее приведенные примеры эндогенных геохимических ореолов для различных типов эндогенных месторождений. Рассмотрим методику выявления зональности эндогенных геохимических ореолов.

Применяются графические и аналитические способы выявления зональности геохимических ореолов. Графический способ предусматривает сопоставление моноэлементных геохимических карт,

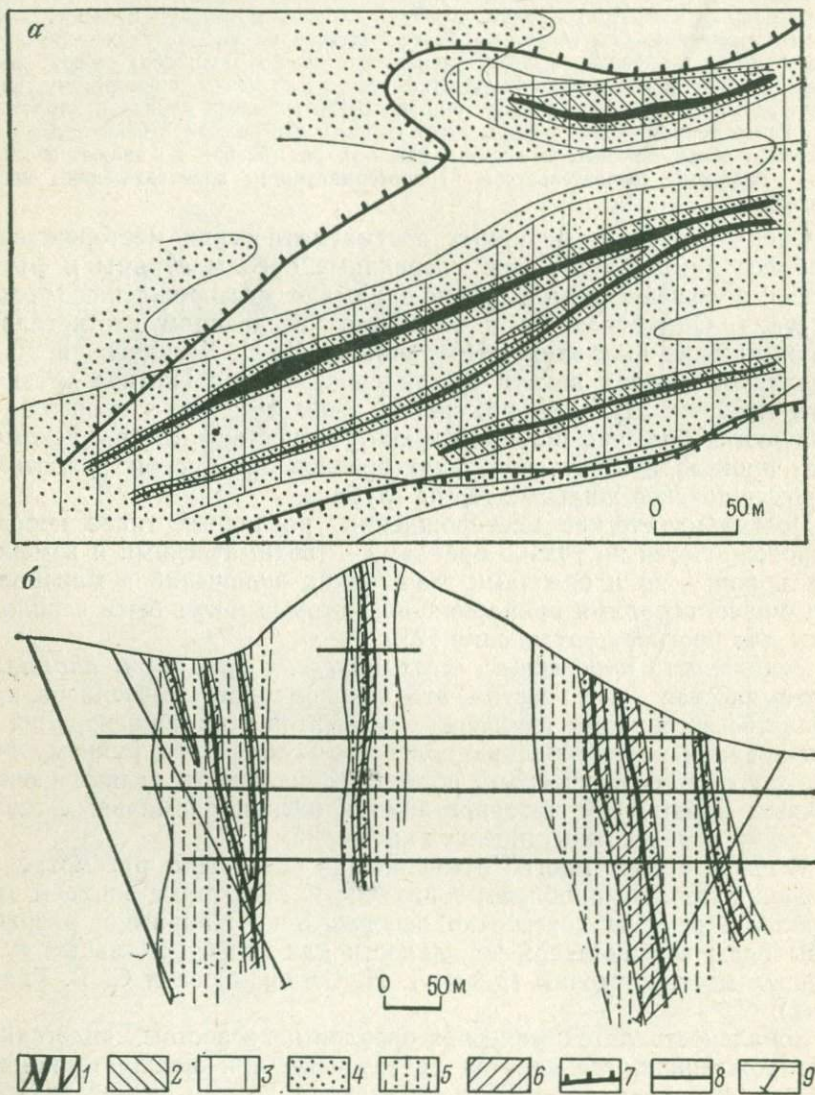


Рис. 53. Визуально различимая зональность эндогенных геохимических ореолов жильных месторождений, выявляемая при сопоставлении аномальных значений содержания одного ранга:

а — золоторудное месторождение (план), *б* — оловорудное месторождение (разрез).
 1 — рудные жилы; ореолы: 2 — золота, 3 — меди, 4 — ртути, 5 — свинца, серебра, цинка, 6 — олова, молибдена, меди; 7 — ореолы выщелачивания никеля (штрихи в сторону более высокого содержания); 8 — горизонты горных выработок; 9 — скважины

разрезов, колонок, на которых показаны рудные тела и эндогенные ореолы. Практически это выполняется следующим образом. На одну кальку переносятся контуры ореолов основных элементов-индикаторов и геологические объекты (рудные тела, интрузивы и др.), по отношению к которым будет выполняться интерпретация и оценка ореолов. Для наглядности ореолы элементов, прилегающие непосредственно к объектам, обозначаются частым крапом; ореолы элементов, распространенные широко во вмещающих породах, — редким крапом и т. д. При анализе подобных совмещенных геохимических документов удается иногда установить визуально ряд зональности (рис. 53, а). В данном примере этот ряд намечается в следующем виде (от фронтальных частей к рудному телу): ртуть — медь — золото. Кроме того, на этом рисунке достаточно отчетливо видны ореол выщелачивания никеля и его соотношение с указанными ореолами отложения. При значительном совпадении границ ореолов нескольких элементов можно установить лишь зональность главных ассоциаций элементов (см. рис. 53, б). На рис. 53 видна отчетливая зональность двух ассоциаций химических элементов: ассоциация внутренней зоны (олово, молибден, медь) и ассоциация внешней зоны (свинец, серебро, цинк).

Графический способ выявления зональности геохимических ореолов может применяться для предварительных заключений, при анализе и интерпретации геохимических данных, получаемых на разных стадиях проведения геохимических поисков.

Однако особенно широко этот способ используется при рассмотрении материалов I стадии и I подстадии II стадии геологических исследований, когда недостаточно количественных показателей оценки.

Аналитические способы выявления зональности геохимических ореолов подробно изложены в работах С. В. Григоряна и других исследователей [8, 9]. Зональность можно определить: по изменению средних содержаний химических элементов на различных горизонтах, изменению средних содержаний химических элементов на поверхности земли или на отдельных горизонтах, отношениям продуктивностей и других параметров на отдельных горизонтах.

Расчет рядов зональности может быть сделан и для мультипликативных ореолов. При этом вычисляют так называемый мультипликативный показатель зональности.

Как уже неоднократно отмечалось, при анализе зональности геохимических ореолов принято выделять три ассоциации элементов-индикаторов: надрудные, рудные и подрудные. Наиболее важными являются надрудные ассоциации элементов, так как они позволяют прогнозировать скрытые месторождения и рудные тела. Эти ассоциации проверены практикой и достаточно надежны для использования. Рудные ассоциации, т. е. ассоциации, соответствующие уровню развития главных рудных тел, также хорошо известны для определенных типов месторождений. Подрудные ассо-

циации вызывают различные вопросы и неясности, осложняющие интерпретацию ореолов. Обычно в эту ассоциацию включаются элементы, располагающиеся последними в ряду зональности, но эти элементы соответствуют и рудным интервалам, а некоторые элементы соответствуют и надрудным для определенных типов месторождений (например, бериллий для месторождений вольфрама, молибдена). Кроме того, в числе подрудных нередко присутствуют элементы, которые в рудных телах являются элементами-спутниками, связанными с акцессорными или второстепенными минералами, а иногда они являются элементами-примесями в главных рудных минералах. Поэтому они в заметных концентрациях встречаются лишь на уровне рудных тел. Например, никель и кобальт в медноколчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождениях создают отчетливые ореолы на уровне рудных тел и в зонах пиритизации под рудными телами или вдоль зон безрудной пиритизации в стороне от рудных тел. В связи с этим при определении уровня эрозионного среза геохимических аномалий нельзя формально интерпретировать обнаруженные ассоциации химических элементов. Так, обнаружив в районе развития медноколчеданных месторождений аномалии никеля и кобальта, можно лишь предполагать возможную их связь с различными объектами (о рудном срезе зон пиритизации непромышленного значения, о рудном срезе промышленных рудных тел, о подрудном срезе рудных тел). Принимая во внимание, что подрудные сечения эндогенных ореолов изучены недостаточно, а также и то, что под рудными телами могут располагаться неизвестные скрытые тела, рациональнее использовать главным образом надрудные и рудные ассоциации элементов-индикаторов.

Следует обратить внимание на соотношение зональности геохимических ореолов и зональности оруденения. Обычно этот вопрос при анализе геохимических ореолов рассматривается вскользь, хотя он имеет несомненно большое значение для интерпретации геохимических аномалий эндогенных месторождений. Отчетливая минеральная зональность оруденения установлена на преобладающем большинстве эндогенных месторождений и ее нельзя отрывать от зональности геохимических ореолов, иначе интерпретация геохимических ореолов будет выполняться формально. Имеется основание для предложения о совмещении анализа зональности геохимических ореолов с зональностью оруденения на графических документах и при аналитических расчетах. Особое внимание необходимо уделять стадийности минералообразования и связи с ней стадийности формирования эндогенных геохимических ореолов.

В новых районах, где ведутся геохимические поиски по коренным породам, интерпретация первичных геохимических аномалий осуществляется по аналогии с характером эндогенных ореолов для известных месторождений, а также на основе теоретических моделей зональности, рассмотренных ранее (см. табл. 4).

Экзогенные (вторичные) литохимические ореолы и аномалии, сопровождающие эндогенные месторождения

Экзогенные литохимические ореолы формируются в коре выветривания (зоне окисления) эндогенных месторождений и в рыхлых отложениях, содержащих продукты их разрушения.

Экзогенная зона характеризуется особенностями проявления внутренних и внешних факторов миграции химических элементов. Внутренние факторы определяют устойчивость эндогенных минералов и поведение отдельных химических элементов и их ассоциаций в экзогенных условиях. От действия внешних факторов зависит формирование коры выветривания, развитие определенных генетических типов рыхлых отложений и ландшафтно-климатических обстановок.

По устойчивости к химическому выветриванию минералы разделяются на две основные группы: устойчивые и неустойчивые. Устойчивость эндогенных минералов в экзогенных условиях во многом зависит от энергии кристаллической решетки. Для некоторых минералов из группы устойчивых ее величина достигает больших значений. Например, для касситерита 12,3, барита 9,3, тантало-ниобатов свыше 37 МДж. Для группы неустойчивых минералов величина энергии кристаллической решетки находится в пределах 2,5—5,8 МДж: флюорит 2,7; галенит 3,1; киноварь 3,2; пирротин 3,5; сфалерит 3,6; пирит 4,3; халькопирит 5,4; арсенопирит 5,8.

Устойчивы в экзогенной зоне минералы, в составе которых преобладают элементы семейства *d*-литофилов, неустойчивы минералы, содержащие преимущественно элементы *d*- и *p*-халькофилов (табл. 14).

Характер устойчивости эндогенных минералов в экзогенных условиях во многом определяет форму существования химических элементов — минеральную и неминеральную в экзогенных геохимических ореолах и аномалиях.

Экзогенные литохимические ореолы в коре выветривания эндогенных месторождений.

В коре выветривания возникают ореолы в связи с перераспределением содержаний элементов в процессе воздействия экзогенных факторов на эндогенные руды. При этом в коре выветривания месторождений устойчивых минералов, главные компоненты которых представлены элементами семейства *d*-литофилов, эндогенные ореолы претерпевают незначительные изменения. Поэтому их контуры в основном сохраняются в коре выветривания. Для месторождений, в которых эндогенные руды представлены неустойчивыми минералами, в коре выветривания наблюдается значительное расширение первичных ореолов и «растекание» их вдоль поверхности измененных выветриванием коренных пород.

Экзогенные геохимические ореолы в рыхлых склоновых отложениях, содержащих продукты разрушения эндогенных месторождений.

Экзогенные ореолы штокверковых месторождений молибдена и вольфрама рассмотрены на примере Джидинского рудного поля.

Здесь экзогенные геохимические ореолы в рыхлых склоновых отложениях

Распределение устойчивых и неустойчивых минералов по семействам химических элементов

Семейство химических элементов	Устойчивые	Неустойчивые
<i>s</i> -литофилы	Барит, берилл, литиевые слюды, сподумен	—
<i>p</i> -литофилы и халькофилы	Апатит, касситерит	Сульфиды свинца, висмута, сурьмы, мышьяка; флюорит
<i>d</i> -халькофилы	Золото крупное, киноварь	Сульфиды меди, цинка; золото субмикроскопическое в сульфидах
<i>d</i> -литофилы и сидерофилы	Циркон, шеелит, вольфрамит, тантало-ниобаты, минералы титана (ильменит и др.), хромит, платина	Молибден, сульфиды никеля и кобальта; пирит, пирротин
<i>f</i> -литофилы	Минералы редких земель, торианит	Уранинит
Способность к рассеянию и концентрации в экзогенных условиях	Ореолы минеральные и элементные (геохимические), иногда россыпи	Ореолы элементные (геохимические), реже минеральные

окаймляют рудоносный интрузив гранитов, с которым генетически связаны штокверк молибденовых руд (в самих гранитах) и штокверк вольфрамовых руд (во вмещающих диоритах). Отмечается зональность в положении ореолов отдельных элементов в большом комплексном геохимическом ореоле по отношению к рудоносному интрузиву и штокверкам. Ближняя зона — молибден, вольфрам; средняя — вольфрам, фтор; дальняя — золото, мышьяк, ртуть, сурьма (рис. 54, а). Эта зональность экзогенных геохимических ореолов близка к эндогенной зональности оруденения, для которого характерна локализация молибденовых руд в самих гранитах, а вольфрамового оруденения и флюоритовой минерализации — во вмещающих породах кровли гранитного интрузива. В общем сохраняя эту зональность, экзогенные ореолы несколько смещены вниз по склону в юго-восточном направлении. Однако при этом не отмечается миграция элементов, связанная с химическим выветриванием. Происходило механическое перемещение рыхлого материала склонов, включающего частицы разрушенных минеральных агрегатов, содержащих рудные и жильные минералы месторождения. Подтверждением этого является зональность экзогенных минеральных ореолов, в которых установлены молибденит, гюбнерит, флюорит и шеелит (см. рис. 54, б). Концентрация последнего в рыхлых отложениях постепенно уменьшается по мере удаления от первоисточника.

Таким образом, в условиях ландшафтов горной тайги и умеренного климата в месторождениях с преобладанием устойчивых минералов (гюбнерит, шеелит) происходит механическая (минерало-

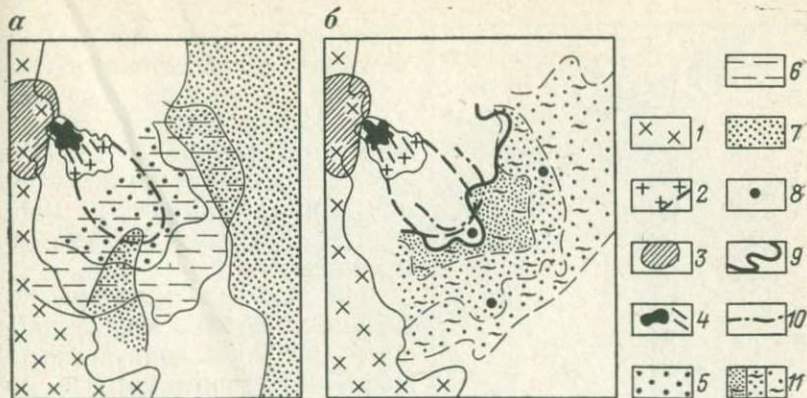


Рис. 54. Зональность экзогенных геохимических (а) и минеральных (б) ореолов вокруг штоковерков молибденовых и вольфрамовых руд, генетически связанных с гранитами, прорывающими вулканогенно-осадочные породы.

1 — диориты; 2 — граниты (пунктиром показан контур скрытого продолжения интрузива); 3 — штоковерк вольфрамовых руд; 4 — штоковерк молибденовых руд; геохимические ореолы: 5 — молибден, 6 — вольфрам и фтор, 7 — золото (по шлихам), мышьяк, ртуть, сурьма; минеральные ореолы: 8 — молибденит, 9 — гюбнерит, 10 — флюорит, 11 — шеелит

гическая) миграция элементов в составе устойчивых минералов. В данном районе это относится в определенной степени и к молибдениту, который обычно неустойчив в экзогенных условиях.

Миграция молибдена при выветривании и разрушении молибденитовых руд отмечается, например, Т. Т. Тайсаевым для таежных ландшафтов, в которых большое значение имеет солевое рассеяние рудных элементов. По его данным, в почвах над сульфидными месторождениями наблюдаются высокие концентрации подвижных форм цинка, меди, молибдена, которые могут выноситься из зоны выветривания и вторично накапливаться на геохимических барьерах. Иную картину экзогенных ореолов можно наблюдать для штоковеркового молибденового месторождения в условиях степного ландшафта, где мощность рыхлых отложений невелика (0,5—1,5 м). Здесь контуры экзогенного ореола молибдена и сопутствующих элементов практически соответствуют эндогенному ореолу, который книзу переходит в штоковерк вольфрам-молибденовых руд.

Экзогенные ореолы месторождений олова касситерит-кварцевой формации.

На примере Комсомольского месторождения в Забайкалье можно проследить соотношение экзогенных и эндогенных ореолов олова (рис. 55). Экзогенные ореолы олова здесь тесно связаны с эндогенными, контролирующими положение рудных тел, приуроченных к дайкообразному телу гранитов. От контура эндогенного ореола экзогенный ореол олова спускается по склону, достигая долины, где в аллювиальных отложениях локализуется россыпь касситерита. В данном случае вполне очевидно, что в геохимическом экзогенном ореоле олово представлено устойчивым минералом — касситеритом.

Элементы, связанные в оловорудных месторождениях с неустойчивыми минералами, могут создавать экзогенные геохимические

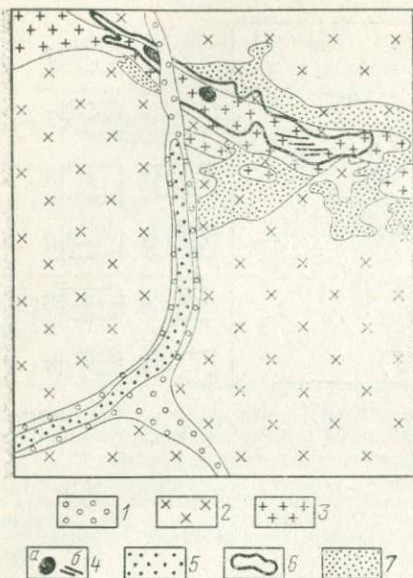


Рис. 55. Соотношение экзогенных и эндогенных ореолов олова на Комсомольском месторождении. По В. В. Крыловой.

1 — четвертичные отложения (аллювий); 2 — роговообманково-биотитовые граниты и гранодиориты; 3 — лейкократовые и биотитовые граниты; 4 — рудные тела: а — грейзеновые штокерки с касситеритом и шеллитом, б — жилы и зоны с теми же минералами; 5 — россыпь касситерита; геохимические ореолы олова: 6 — эндогенные, 7 — экзогенные

смещены вниз по склону от 30—40 до 100—150 м от рудных тел (рис. 57, а). Профиль литохимического опробования по шурфам, проведенный через восточную жилу, пересекает три рудных скопления (см. рис. 57, б, в). Одно из них — рудная жила, два других — выбросы из шурфов (9 и 11). Мощность склоновых рыхлых отложений 0,5—1,5 м. На разрезе хорошо видно смещение геохимического ореола вниз по склону. Максимальная концентрация элементов в его пределах отмечается на поверхности в 40—55 м ниже рудного тела.

Экзогенные ореолы сульфидных месторождений в условиях северных ландшафтов будучи описаны по данным В. В. Домчака.

Экзогенные ореолы Молодежного медноколчеданного месторождения сформировались в условиях моногенного горно-тундрового ландшафта Полярного Урала, для которого отмечается отсутствие заметных окислительных процессов в рудах. Наиболее значительный по площади и интенсивности ореол образует главный элемент — медь, меньшие ореолы характерны для мышьяка, серебра, цинка (рис. 58, а). Содержание этих элементов в ореолах возрастает с приближением к выходу рудного тела. В целом экзогенные ореолы здесь близки по положению, морфологии и концентрации к эндогенным ореолам месторождения.

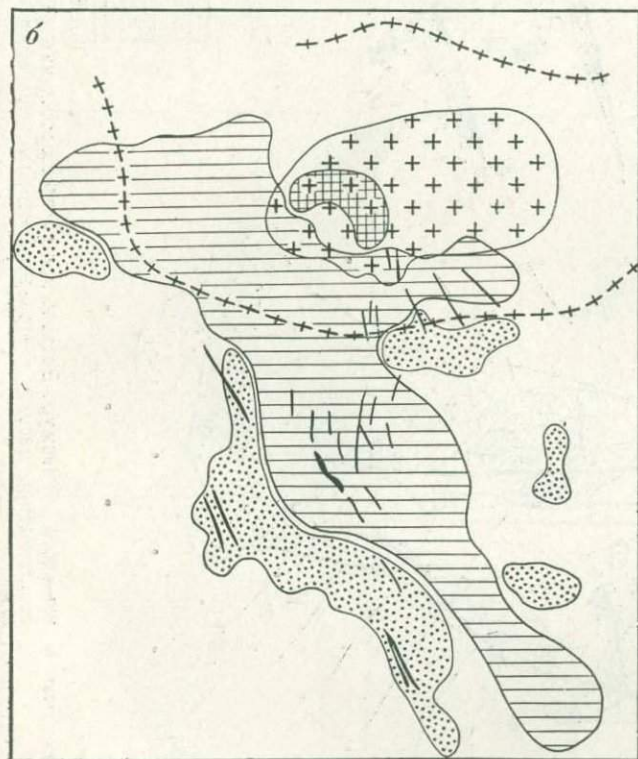
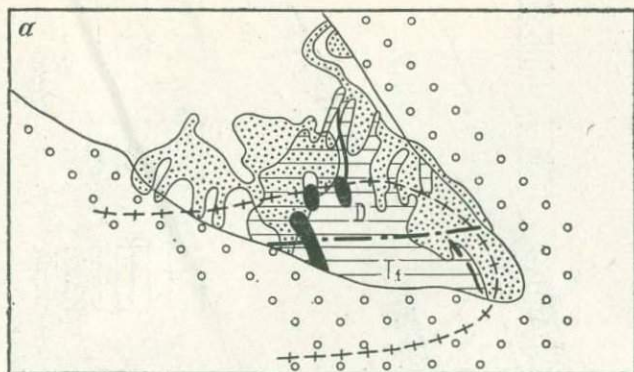
Экзогенные ореолы Тарньерского медноколчеданного месторождения, расположенного в зоне горно-таежного ландшафта Северного Урала, отличаются более сложным строением. Месторождение находится на водоразделе, где характерны окислительные условия в почвах и верхних горизонтах коры вывет-

ореолы, которые локализуются не только в пределах ореола олова, но и за его пределами (рис. 56, а). Наблюдаемая при этом зональность в положении олова, свинца и других элементов может отражать и зональность эндогенных геохимических ореолов.

На примере некоторых оловорудных полей можно наблюдать наиболее полную зональность экзогенных ореолов вольфрама, олова, молибдена, свинца по отношению к рудоносному интрузиву и отдельным месторождениям, отличающимся составом рудных тел (рис. 56, б).

Экзогенные геохимические ореолы жильных свинцово-цинковых месторождений.

По данным В. В. Поликарпючкина [39], Газимуро-Воскресенское месторождение приурочено к трахиандезитам верхнеюрского возраста. Руды представлены кварцем, пиритом, арсенопиритом, галенитом, сфалеритом, зона окисления рудных жил — лимонитом, скородитом, церусситом, остаточным галенитом. Рельеф низкогорный, ландшафт лесостепной, месторождение расположено на склонах южной экспозиции. Экзогенные ореолы свинца и других элементов













-  1
-  2
-  3
-  4
-  5
-  6
-  7
-  8
-  9
-  10

Рис. 56. Зональность экзогенных геохимических ореолов по отношению к оловорудным телам (а) и гранитному интрузиву (б), отражающих зональность эндогенных ореолов. По Н. И. Сухенко, Н. Д. Суворцеву.

1 — аллювий; 2 — алевролиты, песчаники; 3 — сланцы; 4 — гранит-порфиры; 5 — контур скрытого интрузива; 6 — рудные тела; 7 — разрывные нарушения; площади развития экзогенных ореолов: 8 — бериллия, 9 — олова, 10 — свинца

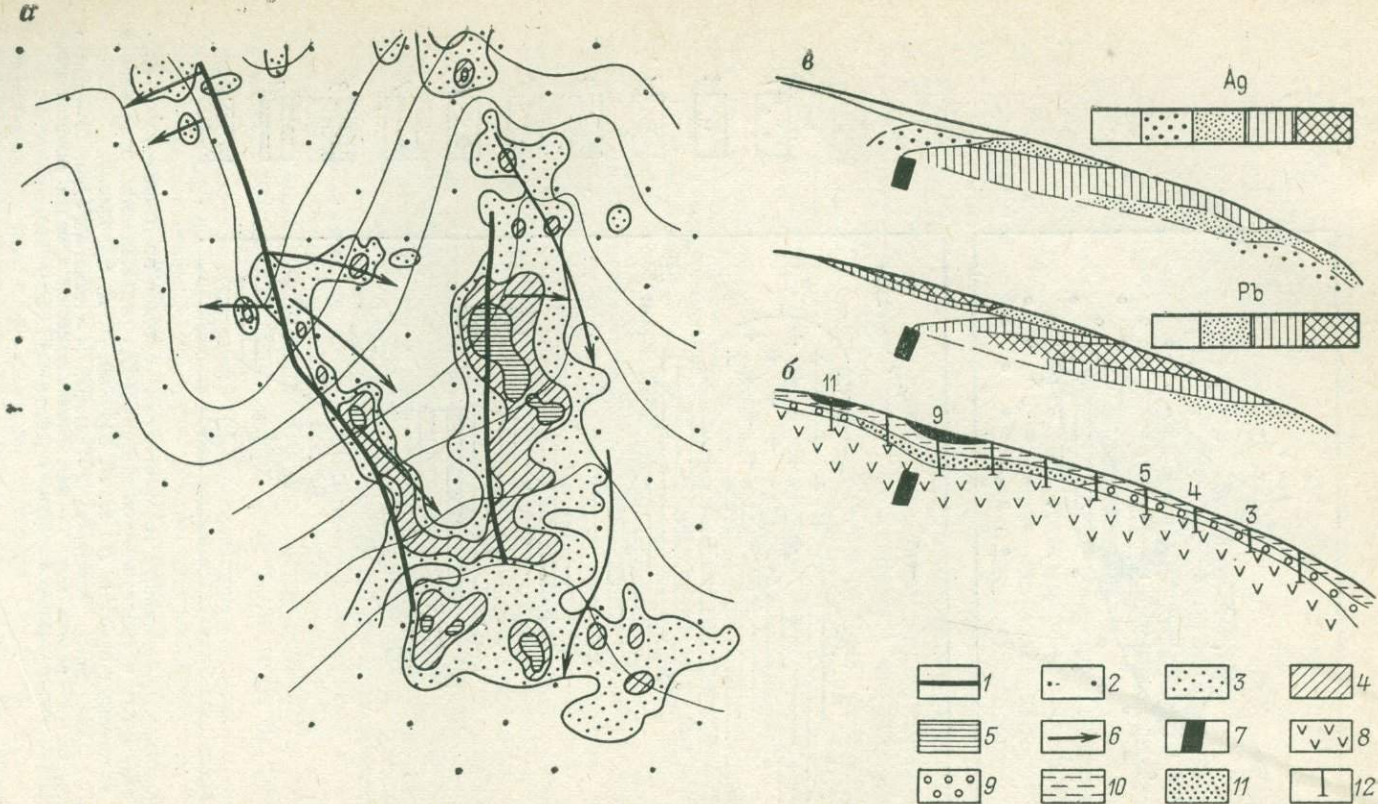


Рис. 57. Экзогенные ореолы жильного Газимуро-Воскресенского месторождения [39]: а — карта ореолов свинца; б — геологический разрез; в — разрезы ореолов серебра и свинца.

1 — рудные жилы; 2—5 — ореолы свинца в рыхлых отложениях; 6 — направление переноса рыхлого материала на склонах и по логу; 7 — рудные тела и отвалы; 8 — андезиты; 9 — щебнистые рыхлые образования; 10 — верхний слой рыхлых отложений; 11 — отложения древних склоновых водных потоков; 12 — шурфы

а

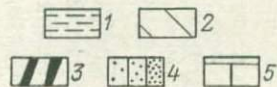
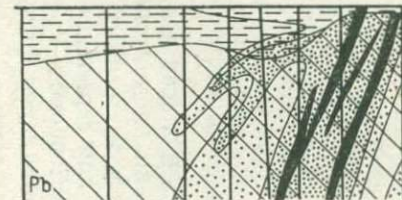
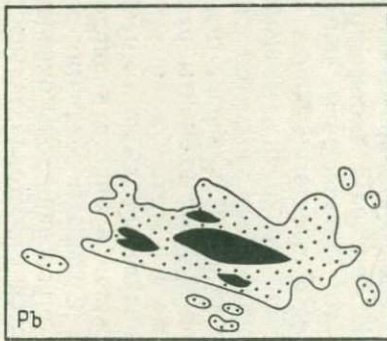
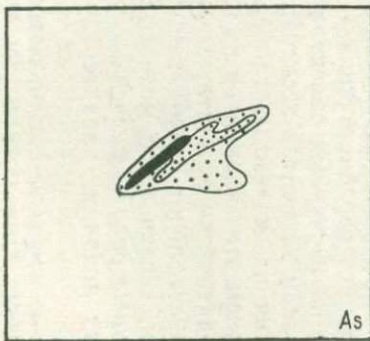
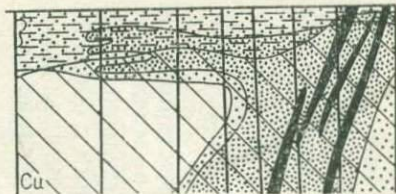
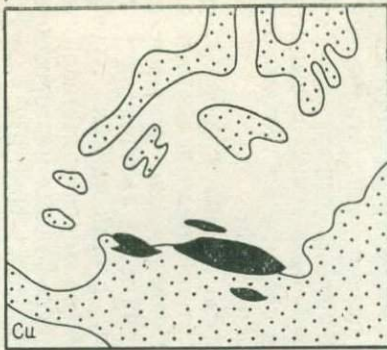
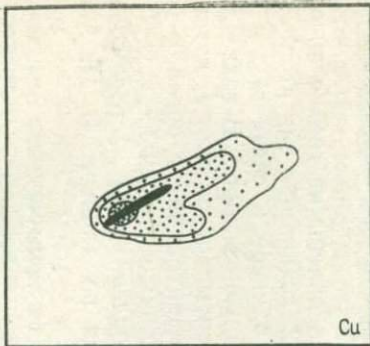


Рис. 58. Сопоставление геохимических ореолов колчеданных месторождений, расположенных в горно-тундровом ландшафте Полярного Урала (а) и в горно-таежном ландшафте Северного Урала (б). По В. В. Домчаку.
 1 — рыхлые отложения, 2 — коренные породы, 3 — рудные тела, 4 — геохимические ореолы (крапом показана различная концентрация), 5 — скважины

ривания. В плане ореолы зонально расположены. Ореолы свинца, серебра, молибдена, мышьяка, висмута тесно связаны с остаточными продуктами зоны окисления, в которой установлено их максимальное содержание. Ореолы меди, цинка, никеля и кобальта удалены от рудного тела на различные расстояния — от сотен метров до первых километров (рис. 58, б). В разрезе рыхлых образований ореолы свинца, серебра, молибдена, мышьяка, висмута прослеживаются от поверхности до коренного выхода руды, где они переходят в эндогенные ореолы. Смещение этих ореолов незначительно. Распределение в ореолах меди, цинка, никеля и кобальта подчиняется вертикальной зональности. В нижней зоне под уровнем грунтовых вод ореолы этих элементов связаны с коренными рудами. Повышенные концентрации меди, цинка, никеля и кобальта отмечаются за пределами зоны окисления, нередко на железно-марганцевом геохимическом барьере.

В. В. Домчак для описанных сульфидных месторождений выделил две ассоциации элементов-индикаторов, различающихся по условиям миграции в экзогенных условиях. Разделение этих ассоциаций происходит при сернокислом выветривании с образованием зоны окисления на Северном Урале, но оно практически незаметно в условиях преобладания физического выветривания на Полярном Урале.

В ассоциацию 1 включены свинец, серебро, молибден, мышьяк, висмут, т. е. элементы-примеси в составе медноколчеданных рудных тел. К факторам, влияющим на относительно ограниченную миграцию этих элементов из зоны окисления, относятся слабая растворимость сульфатов свинца и серебра, а также повышенная сорбируемость молибдена, мышьяка и висмута на геохимических барьерах остаточных продуктов зоны окисления.

В ассоциацию 2 включены медь, цинк, никель и кобальт, среди которых главные элементы рудных тел — медь и цинк, и элементы-примеси — никель и кобальт. Последние по концентрации в рудах значительно выше элементов-примесей ассоциации 1, так как содержатся в пирите и пирротине, составляющих главную массу руд. Сульфаты всех этих элементов хорошо растворимы и подвижны в условиях зоны окисления сульфидных месторождений при отсутствии восстановительных барьеров. Поэтому элементы ассоциации 2 формируют экзогенные ореолы на более значительном удалении от первоисточника.

Однако на изученных объектах установлены не только ореолы, но и аномалии элементов ассоциации 2, возникшие как вторичные аккумуляции на железно-марганцевом барьере и связанные с выщелачиванием этих элементов из вмещающих пород. В таких аномалиях практически отсутствуют элементы ассоциации 1, которые обычно присутствуют в небольших концентрациях в ореолах этой ассоциации, связанных с медноколчеданным оруденением.

Экзогенные ореолы сульфидных (колчеданных) месторождений в закрытых районах характеризуются по данным Б. П. Алексева.

Отчетливые экзогенные ореолы, связанные со скрытыми медноколчеданными месторождениями Южного Урала, прослеживаются в глинисто-щебенистом горизонте коры выветривания нижней части рыхлых отложений. Элементный состав погребенных ореолов в общем аналогичен составу эндогенных ореолов (рис. 59). По фазовому состоянию экзогенные ореолы относятся к существенно-солевым (относительное содержание форм подвижных вторичных соединений

достигает 95,4 %). Зональность остаточных экзогенных ореолов подобна зональности эндогенных ореолов на уровне погребенного эрозивного среза. По результатам стандартного спектрального анализа литохимических проб установлено, что покровные глины и суглинки мощностью 2,5—3,0 м практически полностью экранируют ореолы всех элементов-индикаторов колчеданного оруденения, за исключением цинка, «проникающая» способность которого достигает 5—7 м. Над погребенными колчеданными залежами зафиксированы паровутные ореолы, превышающие фоновый уровень ртути в почвенном воздухе в 5—12 раз.

Экзогенные геохимические потоки золото-серебряных рудопоявлений в аллювиальных отложениях приведены по материалам И. М. Съедина и Г. И. Хорина.

Рудопоявления золото-серебряной формации сопровождаются комплексными экзогенными ореолами золота, серебра, свинца, цинка, меди, олова, молибдена, висмута, создающими локальное аномальное геохимическое поле в рыхлых склоновых отложениях. Эндогенные ореолы золота ограничены в распространении склоном и не переходят в аллювиальные потоки (при данной чувствительности спектрального анализа). В аллювии отчетливо выделяются потоки серебра, которые прослеживаются от тервоисточника на 2,0—2,5 км, иногда больше, с постепенным уменьшением концентрации (рис. 60). С потоками серебра сопоставимы по масштабу геохимические потоки свинца, цинка, мышьяка, молибдена. Менее значительны и локальны потоки олова, меди, висмута. Все эти элементы, так же как и серебро, связаны в рудах с сульфидными или сульфосолями, которые более легко, чем золото, выщелачиваются в зоне окисления. Поэтому при невысоких содержаниях золота в коренном рудопоявлении не создаются отчетливые потоки золота в аллювии. В то же время его спутники, содержащиеся в рудах в более высоких концентрациях и в форме неустойчивых минералов, могут создавать отчетливые геохимические потоки в аллювии речных долин, являясь хорошими признаками поискового прогнозирования.

Общие особенности экзогенных литохимических ореолов, связанных с эндогенными месторождениями. Главным фактором, определяющим характер и параметры, в том числе зональность, экзогенных литохимических ореолов, является устойчивость минералов эндогенных руд в экзогенных условиях, а также динамика состояния рыхлых отложений в зависимости от их генетического типа и ландшафтно-климатических условий.

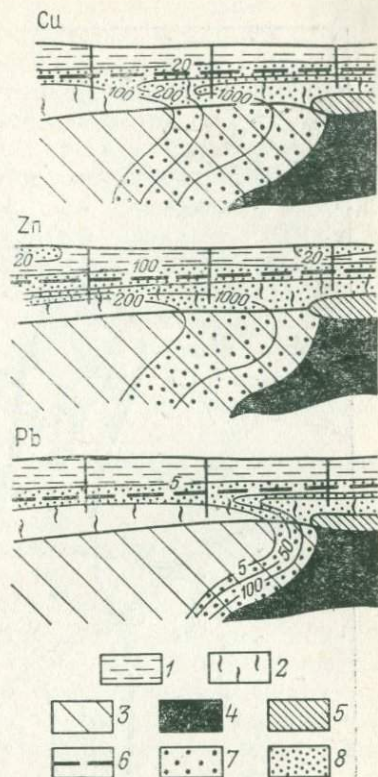


Рис. 59. Экзогенные геохимические ореолы скрытых медноколчеданных месторождений Южного Урала.
По Б. П. Алексееву.

1 — рыхлые отложения, 2 — кора выветривания, 3 — коренные породы, 4 — рудное тело, 5 — зона окисления, 6 — уровень подземных вод, 7 — эндогенные ореолы, 8 — экзогенные ореолы

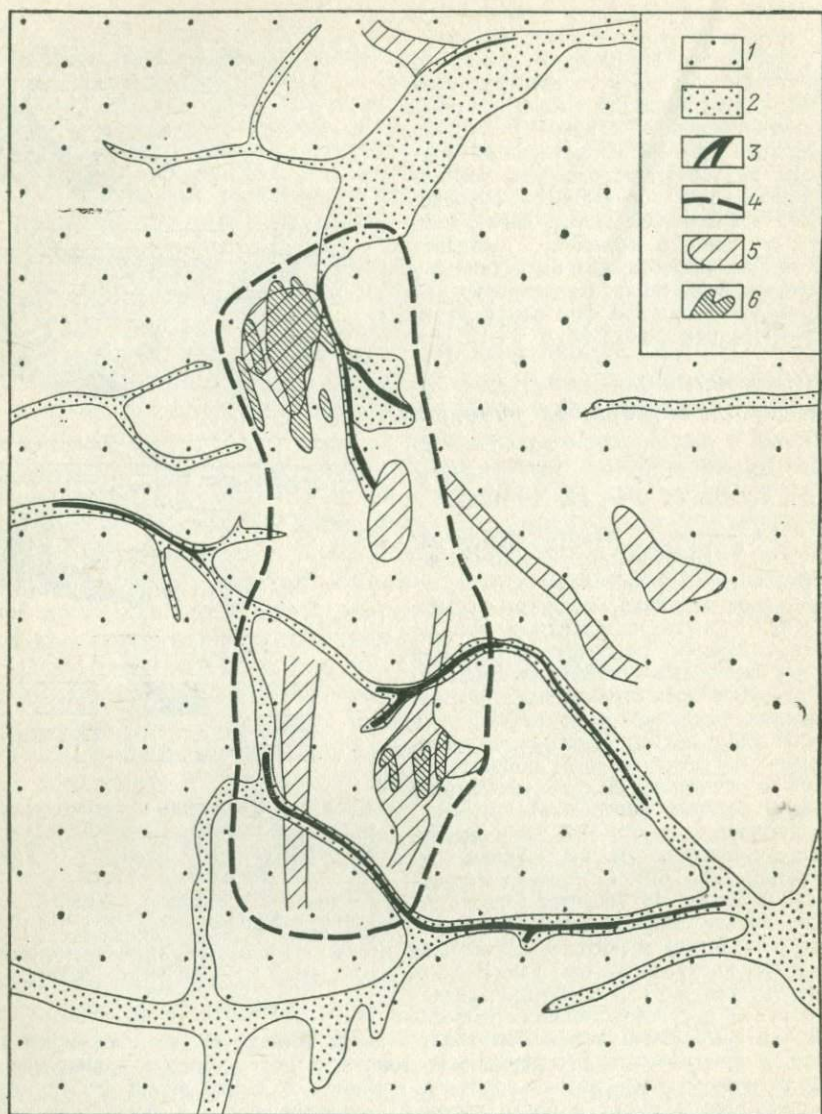


Рис. 60. Геохимические потоки серебра в аллювиальных отложениях площади аномального геохимического поля с проявлениями золото-серебряной минерализации, сопровождаемыми ореолами золота в склоновых отложениях.

По И. М. Съедину, Г. И. Хорину.

1 — склоновые отложения, 2 — аллювий, 3 — геохимические потоки серебра, 4 — контур аномального поля, 5 — зоны измененных пород и рудной минерализации, 6 — ореолы золота в склоновых отложениях

При неблагоприятных условиях для развития химического выветривания и зоны окисления, например в зонах северных тундровых ландшафтов или в тропических пустынях, миграция элементов происходит главным образом в минеральной форме. Здесь для месторождений с устойчивыми и неустойчивыми рудными минералами формируются минеральные ореолы, которым соответствуют геохимические ореолы и аномалии, так как происходит в основном физическое разрушение эндогенных месторождений. Горизонтальная зональность экзогенных ореолов и аномалий отвечает такой же зональности эндогенного типа (в элювиальных ландшафтах пологих водоразделов и пологих склонов долин). На более крутых элементах рельефа в трансэлювиальных и суперэлювиальных ландшафтах происходит сползание и растягивание ореолов, но при этом обычно не происходит существенного разделения химических элементов по их миграционным свойствам. При такой зональности месторождение можно искать непосредственно под геохимической аномалией или рядом с ней выше по склону.

В условиях, благоприятных для химического выветривания (умереннохолодная, тропическая влажная зоны), активно развиваются кора выветривания и зона окисления эндогенных месторождений. Устойчивые минералы накапливаются в рыхлых отложениях и перемещаются вместе с ними, создавая аномальные поля. Неустойчивые минералы разлагаются и окисляются частично или полностью. Происходит миграция химических элементов в минеральной форме (солевой и др.). При этом морфология и зональность экзогенных геохимических ореолов усложняются. Отдельные зоны могут «отрываться» друг от друга, возникают ландшафтные геохимические аномалии на геохимических барьерах в связи с различными миграционными свойствами элементов в экзогенных условиях. В данном случае искать месторождение следует не под аномалией основных элементов, а под аномалией элементов-спутников.

При геологической интерпретации экзогенных литохимических аномалий в пределах одного и того же рудного поля следует учитывать различие ореолов для разных генетических типов месторождений и рудных тел разных стадий рудообразования. Особенно важна геологическая интерпретация комплексных геохимических аномалий, выделяемых мультипликативным способом. Например, в пределах рудного поля выявлены и оконтурены следующие литохимические аномалии: золота; мультипликативные аномалии — серебро×свинец×цинк×мышьяк; олово×вольфрам×молибден. Если подходить к интерпретации этих аномалий формально, то можно считать, что первая мультипликативная аномалия соответствует надрудной зоне месторождения золота, а вторая — подрудной зоне. Вместе с тем геологическая позиция второй аномалии требует иного подхода к интерпретации. Эта аномалия локализуется в экзоконтактовой зоне гранитного интрузива и может соответствовать обычной рудной ассоциации элементов, характерной для месторождений олова, вольфрама и молибдена.

Надежная интерпретация экзогенных литохимических аномалий, связанных с эндогенными месторождениями, должна предусматривать обязательное выполнение минералогических исследований, позволяющих уверенно определять формы существования химических элементов в геохимических аномалиях.

Количественная оценка вторичных геохимических ореолов может быть сделана путем определения площадной продуктивности и прогнозных ресурсов по соответствующим формулам.

Экзогенные гидрохимические ореолы, сопровождающие эндогенные месторождения. Характеристика экзогенных гидрохимических ореолов, сопровождающих эндогенные месторождения, дана по материалам Е. Е. Беляковой, Г. А. Голевой [20], П. А. Удодова и др. [33].

Гидрохимические (водные) ореолы и потоки, так же как и экзогенные литохимические ореолы эндогенных месторождений, формируются в зависимости от устойчивости минералов в экзогенных условиях.

Наиболее отчетливые гидрохимические ореолы и потоки создаются вокруг сульфидных месторождений, менее отчетливые связаны с месторождениями силикатных, окисных и карбонатных руд. В число сульфидных месторождений включаются медно-никелевые, медноколчеданные, полиметаллические, медно-молибденовые, молибденовые, ураново-сульфидные и др. К силикатным и окисным отнесены оловянные, оловянно-вольфрамовые, бериллиевые, борные, цирконо-ильменитовые и др. Для каждого типа месторождений характерны определенный химический состав вод, комплекс микрокомпонентов и их концентрация, которые могут изменяться в зависимости от интенсивности водообмена и других факторов. Воды сульфидных месторождений отличаются весьма широким комплексом микрокомпонентов, как правило, превышающим комплекс их в рудах. По мнению П. А. Удодова и др., это связано с воздействием кислых растворов, и особенно свободной серной кислоты, на вмещающие породы, из которых также извлекаются многие компоненты. В зависимости от положения сульфидных месторождений и рудных тел по отношению к базису эрозии Г. А. Голева выделяет три их типа: интенсивно окисляющиеся рудные тела, расположенные выше местного базиса эрозии; слабо окисляющиеся рудные тела, залегающие ниже местного базиса эрозии; весьма слабо окисляющиеся и неокисляющиеся рудные тела, локализуемые значительно ниже современных и древних базисов эрозии в зоне замедленного водообмена. Каждый из этих типов рудных тел для одного и того же типа месторождения может характеризоваться особенностями ассоциаций элементов в водах, морфологией и контрастностью гидрохимических ореолов.

Характер гидрохимических ореолов, связанных с эндогенными месторождениями, зависит от ландшафтных и климатических условий. Выделяются открытые и закрытые гидрохимические ореолы и аномалии, положение которых определяется типом месторождений по условиям залегания (выходящие на поверхность или скры-

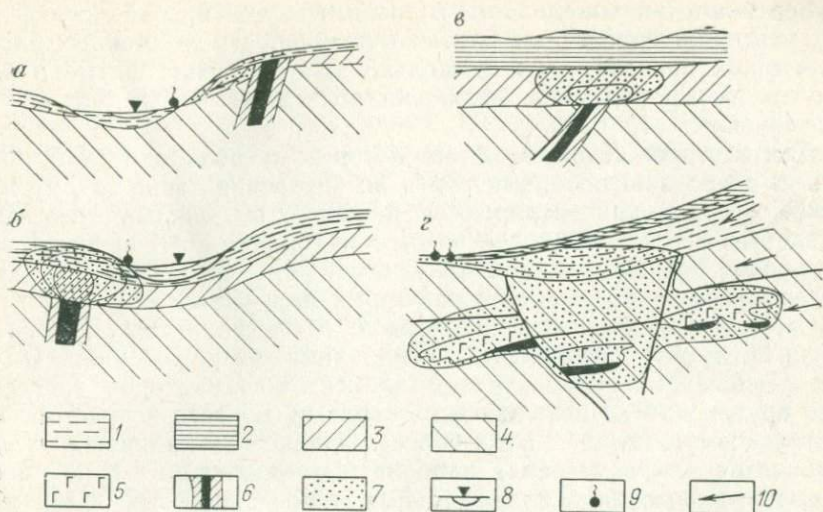


Рис. 61. Типы гидрохимических ореолов по условиям проявления на поверхности: *а* — открытый ореол, связанный с месторождением, выходящим на поверхность; *б* — открытый ореол, фиксирующий погребенное месторождение (Г. А. Голева); *в* — закрытый ореол слепого месторождения (Г. А. Голева); *з* — связь открытого и закрытого ореолов в зоне многомерзлотных пород (Г. А. Голева). 1 — водоупорные отложения, 2 — водоупорные отложения, 3 — кора выветривания, 4 — коренные породы, 5 — интрузив, 6 — рудные тела с первичными ореолами, 7 — гидрохимические ореолы, 8 — базис эрозии, 9 — водный источник (аномальный), 10 — направление движения подземных вод

тые), позиций по отношению к базису эрозии, наличием или отсутствием водоупорных пород (рис. 61, *а, б, в*). Климат также влияет на развитие водных ореолов. Например, в районах многолетней мерзлоты водные ореолы могут формироваться под экранящей толщей рыхлых отложений в зонах развития таликов и проследиваться по направлению движения вод с выходом на поверхность в местах их выклинивания (рис. 61, *з*).

В водных ореолах, окаймляющих эндогенные месторождения, наблюдается зональность в общем химическом составе вод, а также в ассоциациях и концентрациях элементов-индикаторов оруденения в водах.

Горизонтальная зональность гидрохимического ореола в плане ниже рассмотрена по данным Г. А. Голевой на примере скрытого медноколчеданного месторождения. По направлению движения грунтово-трещинных вод отмечается развитие широких ореолов цинка (до 1,5 км), меди (до 1 км) и небольших по протяженности ореолов свинца (до 0,5 км), мышьяка и молибдена (до 0,4 км). Таким образом, внешняя зона ореола представлена цинком и медью, внутренняя — свинцом, мышьяком, молибденом (см. рис. 21). По размерам общий водный ореол в 3,5—4 раза больше эндогенного литохимического ореола, но по характеру зональности они имеют большое сходство. В северо-восточной прибрежной части озера, дренирующего подземные воды месторождения, выявлена гидрохимическая аномалия цинка и мышьяка, возникшая, по мнению Г. А. Голевой, в результате скрытой разгрузки ореольных вод в озеро.

Вертикальная зональность гидрохимических ореолов сульфидных месторождений также близка к зональности эндогенных литохимических ореолов, имея несколько более расплывчатые и вытянутые по направлению движения подземных вод гидрохимические зоны.

Для месторождений, в составе которых преобладают слабо или весьма слабо окисляющиеся руды, во внутренней зоне гидрохимических ореолов концентрируются наименее подвижные элементы, связанные с трудно окисляющимися минералами, во внешней зоне — более подвижные элементы, освобождающиеся из окисляющихся или механически разрушающихся минералов.

Открытые гидрохимические ореолы в благоприятных условиях ландшафта могут переходить в гидрохимические потоки, в которых уменьшается концентрация элементов-индикаторов эндогенного оруденения по сравнению с ореолами, но зато возрастает их протяженность (до 2—3 км и более). Однако при наличии в рудах карбонатов или в условиях карбонатных вмещающих пород протяженность потоков в аллювиальных и поверхностных водах может быть небольшой. Так, по данным Е. Е. Беляковой, на медных месторождениях кварц-карбонат-халькопиритовой формации в условиях степного ландшафта водный ореол меди имеет небольшую протяженность и затухает на расстоянии первых сотен метров от рудного тела.

Для повышения контрастности гидрохимических аномалий в таких условиях и вообще для повышения эффективности гидрохимического опробования, как уже отмечалось ранее, начали широко применять выявление гидрохимических аномалий по сумме металлов ΣM , которая включает медь, свинец, цинк и др. Отмечается, что протяженность ореолов по ΣM в районах с хорошо развитой зоной окисления не превышает 2 км от месторождения и прослеживается в водах рыхлых элювиально-делювиальных отложений, а также в водах поверхностных водотоков и водоемов. В районах месторождений со слабо развитой зоной окисления и небольшими ореолами водный ореол по ΣM уже на расстоянии 0,3—0,5 км от рудных тел затухает. Следует учитывать, что в состав ΣM , кроме меди, свинца и цинка, может входить еще ряд элементов (кобальт, никель, олово, хром и др.). Поэтому, как указывает Е. Е. Белякова, в районах развития ультраосновных и основных пород использовать ΣM как поисковый признак полиметаллических руд надо с большой осторожностью. При наличии на площади нескольких месторождений или рудопоявлений сульфидных руд, расположенных относительно близко друг от друга, общий гидрохимический ореол ΣM и сульфат-иона может достигать значительных размеров.

Прогноз типа оруденения по ассоциациям элементов-индикаторов в рудных гидрохимических аномалиях выполняется на основе сопоставления полученных данных с известными моделями гидрохимических ореолов для определенных типов рудных месторождений, с учетом обстановки окисления рудных месторождений. В гид-

рохимических ореолах, сопровождающих сульфидные месторождения, основными элементами-индикаторами являются главные элементы рудных тел — медь, цинк, свинец, мышьяк, молибден, никель, кобальт, конкретные ассоциации и концентрации которых определяются рудной формацией месторождения. Второстепенными элементами водных ореолов могут быть кадмий, селен, германий, сурьма, барий, серебро. Для гидрохимических ореолов, сопровождающих месторождения окисных силикатных руд и руд самородных элементов, главные элементы-индикаторы обычно представлены не основными, а второстепенными элементами руд — молибденом, цинком, медью, свинцом, никелем, кобальтом, связанными в рудах с легко окисляющимися сульфидами. К второстепенным по концентрации относятся главные элементы рудных тел — олово, вольфрам, титан, цирконий, бериллий, золото, которые входят в состав главных минералов руд, относящихся к трудно окисляющимся объектам (касситерит, вольфрамит, ильменит, циркон, берилл, золото самородное). Таким образом, характер гидрохимических ореолов и аномалий, с одной стороны, зависит от устойчивости эндогенных минералов в экзогенных условиях, а с другой — определяется миграционными свойствами химических элементов в этих условиях.

Более активно мигрирующими являются халькофилы, менее подвижными — литофилы.

Представляют интерес данные о значении и природе устойчивости эндогенных минералов бора. По данным, приводимым С. Р. Крайновым, в группе боросиликатов намечается следующий ряд устойчивости (в порядке возрастания) на основании опытов С. Д. Капанова: датолит, данбурит, аксинит, турмалин. Как отмечает С. Р. Крайнов, различие в устойчивости боросиликатов объясняется особенностями их кристаллохимического строения. Датолит относится к подгруппе силикатов с так называемым изолированным тетраэдром кремнезема (SiO_4)⁴⁻, данбурит — к подгруппе каркасных силикатов. Устойчивость бора в кристаллической решетке данбурита гораздо выше устойчивости целого комплекса $[\text{BO}_3(\text{OH})]_4^{4-}$ решетке датолита. Поэтому для его извлечения требуется больше энергии, что подтверждается расчетами энергии кристаллической решетки минералов. В связи с этим при взаимодействии воды с датолитом происходит интенсивный переход бора в воду с формированием отчетливого гидрохимического ореола бора и сопутствующих ему элементов. Для данбурита и особенно турмалина таких ореолов в водах не отмечается.

Перспективные участки для поисков оруденения выделяются по совокупности всех материалов гидрохимических работ. Оконтуривание таких участков производится с учетом рельефа, направления движения вод, областей разгрузки. Перспективные участки выделяются от водоисточников вверх по склону. При отсутствии источников — по обе стороны долины (рис. 62, а). Контур перспективного участка замыкается вокруг источников, если крутопадающий разлом проходит вдоль долины (см. рис. 62, б). Для бассей-

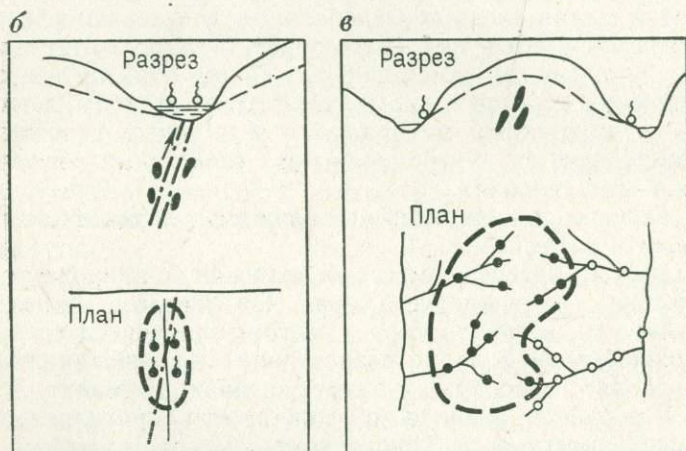
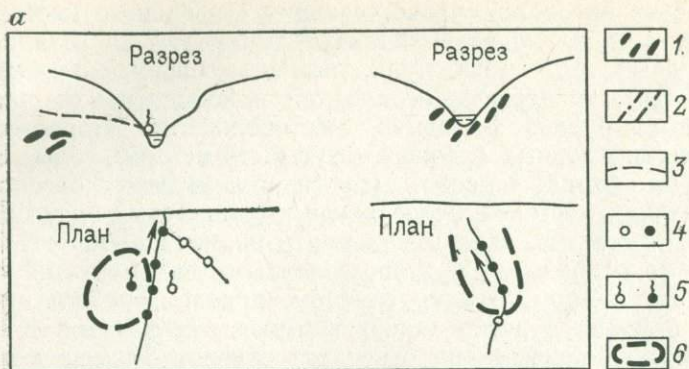


Рис. 62. Выделение перспективных участков для поисков оруденения по данным интерпретации гидрохимических аномалий:

а, б, в — варианты оконтуривания участков в зависимости от условий залегания рудной зоны и разгрузки подземных вод [33]. 1 — рудные зоны; 2 — разрывные нарушения; 3 — уровень подземных вод; гидрохимические пробы: 4 — по поверхностным водотокам (черным показаны аномальные пробы), 5 — по источникам; 6 — контуры перспективных участков

на, дренирующего водораздел, последний оконтуривается с частичным захватом склонов (рис. 62, *в*).

Атмохимические ореолы и аномалии, сопровождающие эндогенные месторождения. По значению для прогноза эндогенных месторождений выделяются две группы атмохимических ореолов и аномалий: предпосылки и признаки поискового прогнозирования. Предпосылками прогноза могут быть ореолы и аномалии тех газов и эманаций, которые связаны с тектоническими разрывными структурами или определенными породами, контролирующими размещение месторождений. Поисковыми признаками, указывающими на возможное наличие месторождений полезных ископаемых, являются пары химических элементов. Химические элементы газов и эманаций атмохимических ореолов и аномалий относятся к семействам

s- и p-атмофилов и литофилов, а также p-халькофилов. Пары элементов относятся к семейству d-халькофилов (табл. 15).

Таблица 15

Группировка геохимических предпосылок и признаков поискового прогнозирования эндогенных месторождений

Исследуемые компоненты	Предпосылки	Признаки
Газы и эманации	CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , N ₂ , He, H ₂ S, SO ₂ редкие газы (Ne, Ar, Kr, Xe)	Rp
Пары элементов	?	Hg

В группе газов, которые могут рассматриваться как предпосылки для поискового прогнозирования рудных месторождений, наиболее изучены ореолы и аномалии углекислого газа. По данным А. И. Фридмана [47], на открытом Октябрьском месторождении медно-никелевых руд в Норильском районе в составе подпочвенного воздуха имеется углекислый газ, содержание которого изменяется от 0,05 до 10 %, при фоновом содержании 0,23 % (в зонах таликов оно несколько выше, чем на участках сплошной мерзлоты). Аномальные концентрации углекислого газа отмечаются над зонами разрывных нарушений в надрудной толще вулканогенно-осадочных пород. Максимальная концентрация углекислого газа в зонах таликов и многомерзлотных пород почти одинакова.

По данным В. С. Глебовской и С. С. Глебовского, на полиметаллических месторождениях некоторых районов установлены аномалии углекислого газа (положительные) и кислорода (отрицательные). При фоновом содержании углекислого газа в подпочвенном воздухе 1,5 %, кислорода 19 %, над окисляющимися рудными телами концентрация углекислого газа достигает 4 %, а содержание кислорода падает до 15 % (рис. 63). Ширина газового ореола превышает мощности рудных тел примерно в 2—5 раз.

По данным А. И. Фридмана, положительные ореолы углекислого газа выявлены на ртутных месторождениях и рудопроявлениях. Аномалии углекислого газа установлены над разрывными нарушениями, к которым приурочены золоторудные зоны, скрытые под покровом рыхлых отложений, где аномальные концентрации углекислого газа в подпочвенном воздухе составляли 3—5 %, реже 10—15 %, при фоне 0,6—0,7 %. По данным М. М. Элинсон, в условиях полупустынного ландшафта Центрального Казахстана при окислении сульфидных руд в подпочвенном воздухе могут концентрироваться сероводород и сернистый газ.

Примеры геохимических ореолов паров ртути будут рассмотрены по данным В. З. Фурсова [48] для различных типов месторождений по условиям залегания (выходящих на поверхность, по-

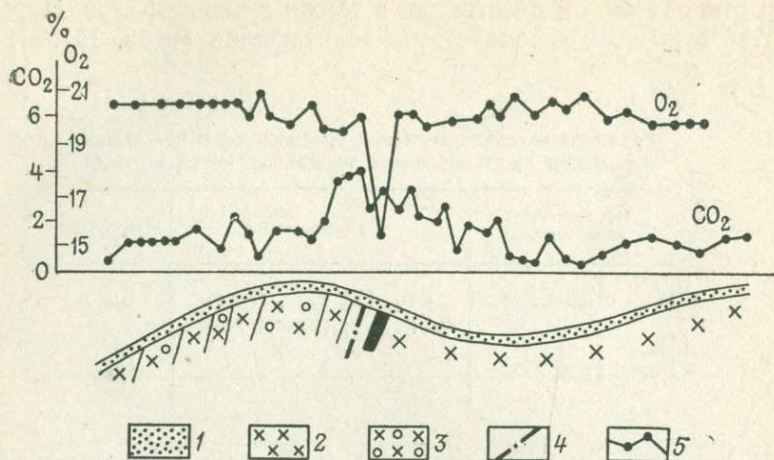


Рис. 63. Атмохимические аномалии над месторождениями свинцово-цинковых руд. По В. С. Глебовской, С. С. Глебовскому.

1 — рыхлые отложения, 2 — граниты, 3 — порфиры, 4 — разрывные нарушения, 5 — графики концентрации газовых компонентов в почвенном воздухе

гребенных, слепых) и по составу рудных тел (ртутных, сурьмяных, свинцово-цинковых, медноколчеданных).

Выходящие на поверхность рудные тела ртутного месторождения Северное в Якутии отмечаются отчетливыми ореолами паров ртути интенсивностью от 5 до $70 \cdot 10^{-8}$ мг/л при фоне $1 \cdot 10^{-8}$ мг/л (рис. 64, а). В условиях резко расчлененного рельефа с крупными осыпями, осложняющими проведение газортутной съемки, выявлены отчетливые ореолы паров ртути, совпадающие с положением рудных тел ртутного месторождения Кончок в Таджикистане. Выходящие на поверхность рудные тела сурьмяного месторождения Турк-Парида в Таджикистане также отмечаются отчетливыми ореолами паров ртути. Аномальные концентрации паров ртути изменяются от 10 до $320 \cdot 10^{-8}$ мг/л при фоне $1-2 \times 10^{-8}$ мг/л. При видимой мощности рудных тел 4—10 м эффективная ширина парортутных ореолов достигает 30—50 м. Установлены ореолы паров ртути и на колчеданных месторождениях Урала, где интенсивность их равна $5-103 \times 10^{-8}$ мг/л при фоне $0,5-1,0 \cdot 10^{-8}$ мг/л (см. рис. 64, б). Над погребенными под рыхлыми или осадочными отложениями месторождениями ртути, свинца и цинка выявлены отчетливые ореолы паров ртути (см. рис. 64, в), интенсивность которых меньше по сравнению с месторождениями, выходящими на поверхность. Еще более значительное уменьшение интенсивности ореолов паров ртути отмечается над слепыми и особенно погребенно-слепыми месторождениями, хотя отчетливость ореолов сохраняется и может служить прямым поисковым признаком рудных залежей.

При интерпретации атмохимических аномалий паров ртути в новых районах необходимо учитывать определенные рекомендации. В. З. Фурсов отмечает, что горные породы, не содержащие сульфидов, не могут быть источниками аномальных концентраций паров ртути в подпочвенном воздухе. В своей работе [48, с. 58] он указывает, что «... для образования динамически устойчивых газовых ореолов рассеяния ртути необходима суммарная (критическая) масса сульфидов, находящихся в рудном теле, первичном и вторичном ореоле рассеяния. Масса сульфидов ниже минималь-

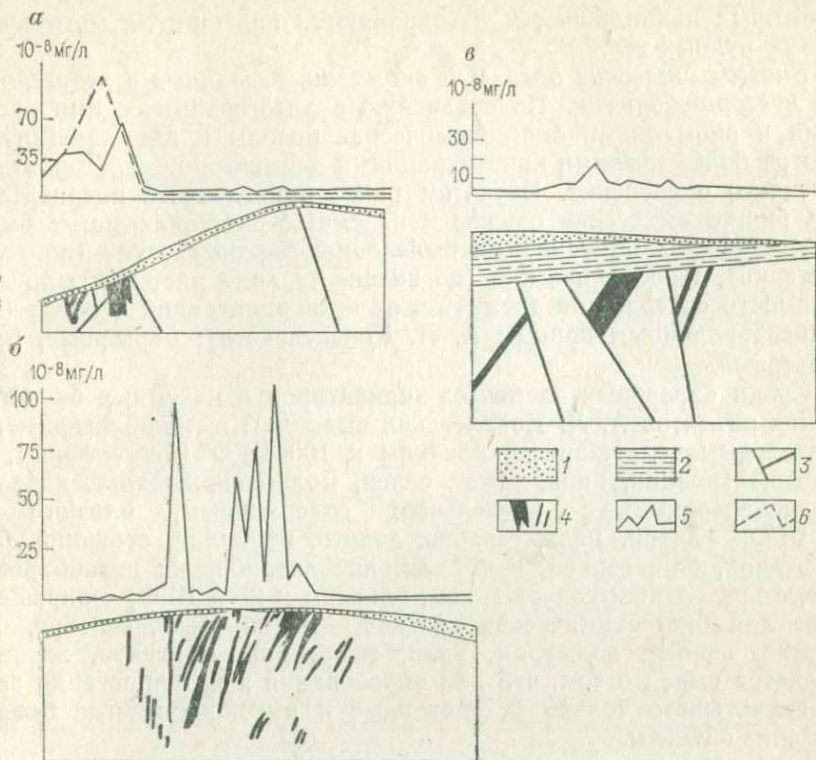


Рис. 64. Атмосферические ореолы паров ртути в подпочвенном воздухе над выходящими на поверхность месторождениями ртути (а) и колчеданных руд (б) и над погребенным месторождением свинцово-цинковых руд (в). По В. З. Фурсову.

1 — почвы и рыхлые отложения; 2 — покровный комплекс пород; 3 — складчатый комплекс с разрывными нарушениями; 4 — рудные тела; графики концентраций: 5 — паров ртути, 6 — ртути в твердой фазе

ной (критической) не способна образовывать газовые ореолы рассеяния в почвенном воздухе, учитывая фильтрацию и диффузию паров ртути в атмосферу и рыхлые отложения. Отсюда следует, что смещенные вниз по склону вторичные ореолы и потоки рассеяния и ложные аномалии, образовавшиеся за счет деятельности человека, не могут в большинстве случаев создать аномальные концентрации паров ртути, так как масса этих источников только компенсирует уход паров ртути в атмосферу и окружающие рыхлые отложения и не способствует накоплению и формированию газовых ореолов рассеяния ртути...» В связи с этим считается, что газортутные поиски могут эффективно проводиться при следующих основных условиях: 1) месторождения должны быть источниками паров ртути; 2) должны присутствовать разрывные тектонические нарушения, являющиеся каналами для фильтрации паров ртути к поверхности; 3) должен быть покров рыхлых отложений,

в которых накапливаются и сохраняются пары ртути, мигрирующие от рудных тел.

Биогеохимические ореолы и аномалии, связанные с эндогенными месторождениями. По сравнению с литогеохимическими ореолами и аномалиями биогеохимические ореолы и аномалии отличаются более низкими концентрациями элементов-индикаторов эндогенного оруденения. С учетом ранее приведенного подразделения биогеохимические ореолы в наземных растениях могут быть сгруппированы по условиям выявления: биохимические (по золе растений), геоботанические (по внешнему виду растений); по зависимости содержаний элементов от их концентраций в почве (по концентрационным кривым А. Л. Ковалевского): барьерные, безбарьерные.

Среди барьерных элементов-индикаторов и наземных биологических объектов А. Л. Ковалевский выделяет: высокобарьерные, с предельным содержанием, близким к 100 БГФ (биогеофоны), — золото, стронций, цинк, ртуть, селен, молибден, кобальт, никель; среднебарьерные — с предельным содержанием, близким к 10 БГФ, — литий, медь, серебро, золото, бериллий, стронций, барий, цинк, бор, свинец, вольфрам, кобальт, никель; низкобарьерные, с предельным содержанием, близким к 2—3 БГФ, «запрещенные» для биогеохимических поисков, — литий, медь, серебро, бериллий, свинец, вольфрам, уран, фтор, иод, марганец, железо. Делается вывод о том, что для опробования и интерпретации следует учитывать только безбарьерные и высокобарьерные биологические объекты.

В зависимости от формы существования химических элементов в питающей среде (почвах и горных породах) их доступность растениям и соответственно интенсивность их поглощения растениями весьма различна. Как отмечает А. Л. Ковалевский, общей закономерностью является то, что растительно-почвенный коэффициент РПК (коэффициент биологического поглощения, по А. И. Перельману) химических элементов увеличивается в тех случаях, когда они находятся в питающей среде (почвах, рудах) в виде легко растворимых соединений или в дисперсном состоянии. Крупные выделения устойчивых минералов, наоборот, препятствуют поглощению элементов из них. Например, для дисперсных форм золота в глинах и сульфидах РПК равен 10—1, для мелкого 0,1, для среднего 0,01, для крупных выделений 0,001.

Рассмотрим некоторые примеры биогеохимических ореолов, связанных с эндогенными месторождениями [27].

Озерное полиметаллическое месторождение в Бурятии характеризуется контрастными биогеохимическими ореолами свинца над некоторыми рудными телами (рис. 65, а). «Другие элементы-индикаторы — цинк, кадмий, серебро, мышьяк и медь дают на Озерном месторождении аномалии меньшей контрастности, чем литохимические аномалии. Причинами этого являются относительно низкая доступность растения некоторых из этих элементов (цинк, кадмий, мышьяк, медь), сорбированных гидроокислами железа, и наличие в наземных частях растений барьеров по отношению к большим концентрациям элементов в корнеобитаемой зоне... Полученные данные показывают, что биогеохимическое

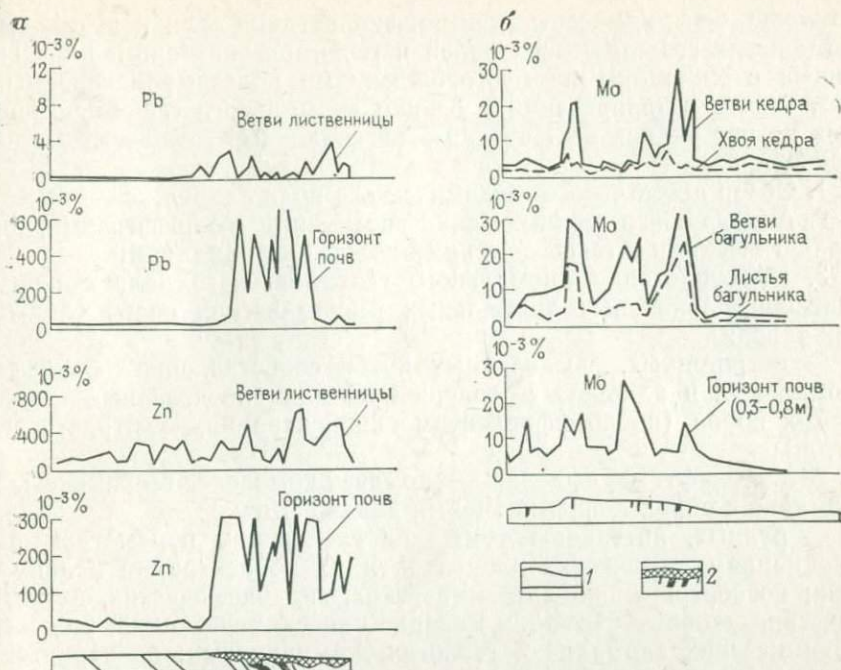


Рис. 65. Сопоставление биогеохимических и литохимических ореолов на Озерном полиметаллическом (а) и Булуктаевском молибден-вольфрамовом (б) месторождениях. По А. Л. Ковалевскому.

1 — вмещающие породы, 2 — рудные тела (черное) и железная шляпа

опробование на Озерном месторождении имеет незначительное преимущество перед литохимической съемкой только при использовании в качестве индикатора свинца в хвое и коре лиственницы.» [27, 89; 91].

На Булуктаевском молибден-вольфрамовом месторождении в Бурятии контрастность биогеохимических ореолов и аномалий молибдена зависит от опробуемых видов и органов растений (рис. 65, б). Это связано, например, с наличием низких барьеров поглощения молибдена у хвои кедра или высоких барьеров вольфрама, уступаает контрастности литохимических аномалий в почвах. Как отмечает А. Л. Ковалевский, рудный штокверк практически не оконтуривается при биогеохимическом опробовании.

В целом характер и параметры биогеохимических ореолов над рудными эндогенными месторождениями весьма неустойчивы для одних и тех же объектов, так как зависят от многих факторов — формы существования элементов в питающей среде, наличия барьеров поглощения и т. д. В связи с этим при интерпретации и оценке биогеохимических аномалий возникают многовариантные решения, так как возможны различные типы аномалий, в том числе и ложных, связанных не с рудными объектами, а с особенностями концентрации химических элементов растениями.

Общие принципы интерпретации и оценки локальных аномальных геохимических полей и аномалий, связанных с эндогенными месторождениями. Для отдельных стадий геологоразведочных ра-

бот могут быть намечены схемы интерпретации оценки локальных аномальных геохимических полей и геохимических аномалий, связанных с эндогенными месторождениями полезных ископаемых.

1. Схема интерпретации и оценки аномального геохимического поля нового района на I стадии — региональных геологических исследований.

1. Обзор аномального геохимического поля района.

2. Анализ связи геохимических аномалий с геологическими, минералогическими и геофизическими полями и аномалиями.

3. Интерпретация аномального геохимического поля с целью выделения локальных аномальных геохимических полей следующих типов:

— петрогенных, выделяемых путем сопоставления фоновых, аномальных и кларковых содержаний для определенных типов горных пород (по коэффициентам концентрации, контрастности и т. д.);

— ландшафтных, выделяемых по связи комплекса геохимических аномалий с определенными типами ландшафтов;

— рудных, интерпретируемых по следующим параметрам: по ассоциациям химических элементов и их концентраций в аномалиях; по соотношению литохимических, гидрохимических, атмосферических, геоботанических и минералогических аномалий; по связи геохимических аномалий с геологическими полями; по характеру горизонтальной зональности геохимических полей и аномалий в отношении геологических объектов (интрузивы, тектонические структуры и др.); по положению в геохимических провинциях и региональных геологических полях.

4. Составление карты геологической интерпретации аномального геохимического поля района с выделением локальных аномальных геохимических полей — петрогенных, ландшафтных, рудных.

5. Количественная оценка аномального поля с определением прогнозных ресурсов R_3 .

Общая схема интерпретации аномального геохимического поля района имеет свои особенности для конкретного района, занимающего определенное положение в региональных геологических и ландшафтных полях.

Рассмотрим использование этой схемы для горного района складчатой зоны, в пределах которого было выполнено литохимическое опробование аллювиальных отложений и составлена карта аномальных геохимических потоков (рис. 66). Интерпретация этой карты начинается с сопоставления ее с геологической ситуацией района и с данными о геохимическом фоне. В данном случае концентрации геохимических потоков по многим элементам (бериллий, вольфрам, молибден и др.) близки к кларкам, превосходя их лишь в несколько раз. Это позволяет выделить гранитный интрузив в восточной части района как петрогенное аномальное геохимическое поле, потенциально рудоносное на указанные элементы (рис. 67). Зона экзоконтакта гранитного интрузива может быть выделена как второе петрогенное поле, характеризующееся повышенными содержаниями бора, который, по-видимому, связан с турмалином в контактовых роговиках этой зоны. В пределах центральной части зоны оконтуривается рудное аномальное поле, для которого отмечаются повышенные содержания в потоках следующих элементов: золота, серебра, свинца, меди, молибдена и др. По характеру ассоциации химических элементов в аномальном поле, а также с учетом

положения его в одной из золотоносных провинций эта площадь рекомендуется для постановки общих поисков золотого оруденения. Второе локальное аномальное рудное поле выделено в западной части района. Здесь отмечаются повышенные содержания свинца, частично меди и серебра в аллювиальных потоках. На данной площади прогнозируется свинцово-цинковое оруденение стратиформного типа. При этом учитываются также периферическая позиция площади по

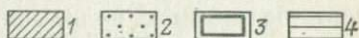
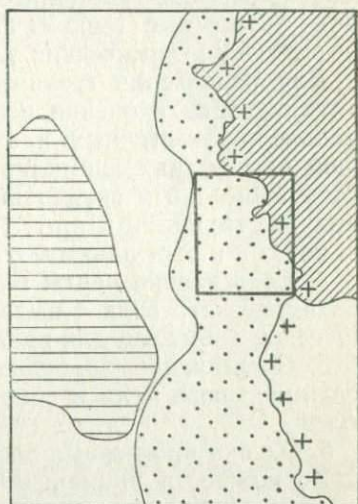
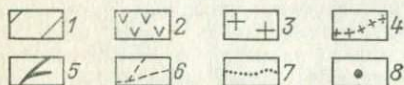
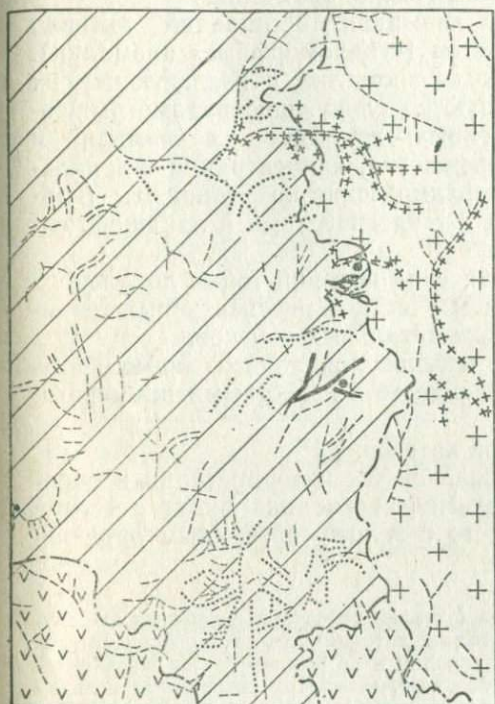


Рис. 67. Карта геологической интерпретации аномальных геохимических потоков, указанных на рис. 66.

Петрогенные локальные аномальные поля, связанные: 1 — с гранитами, потенциально рудоносными на бериллий; 2 — с экзоконтактной зоной роговиков, содержащих турмалин; 3 — рудное аномальное поле, перспективное на золото-серебряное оруденение; 4 — аномальное поле, перспективное для поисков свинцово-цинкового оруденения стратиформного типа

Рис. 66. Карта аномальных геохимических потоков в аллювиальных отложениях горного района.

1 — терригенные отложения (верхняя юра); 2 — вулканиты (нижний мел); 3 — граниты (верхний мел); аномальные геохимические потоки: 4 — бериллий, 5 — серебро, 6 — свинец, 7 — бор, 8 — золото (пробы с контрастными значениями)

отношению к интрузиву и преобладание осадочных пород в пределах аномального поля.

II. Схема интерпретации и оценки рудного локального аномального геохимического поля на I подстадии II стадии — общих поисков.

1. Обзор и анализ результатов геохимического опробования рудного локального аномального геохимического поля.

2. Интерпретация поля с целью выделения геохимических аномалий петрогенных, ландшафтных, рудных.

3. Разделение рудных геохимических аномалий на две группы: — экзогенные геохимические аномалии ассоциаций химических элементов, слабо мигрирующих и связанных с устойчивыми минералами, а также эндогенные геохимические аномалии,

— экзогенные геохимические аномалии ассоциаций активно мигрирующих химических элементов («гидроморфные» аномалии).

Для разделения геохимических аномалий и последующей их интерпретации и оценки используются следующие параметры: соотношения экзогенных и эндогенных геохимических аномалий и минералогических аномалий; морфология, концентрация и зональность аномалий и оруденения; геохимические коэффициенты (корреляции, вариации и др.); связи с геологическими и ландшафтными полями и аномалиями.

4. Составление карты геологической интерпретации локального геохимического поля с выделением участков перспективных геохимических аномалий для постановки детальных поисков.

5. Составление обобщенной модели локального аномального геохимического поля и сопоставление ее с известными примерами полей.

6. Оценка прогнозных ресурсов категории P_2 .

Возможности применения общей схемы интерпретации и оценки локального аномального геохимического поля будут рассмотрены на примере поля, связанного с золото-серебряным оруденением.

Аномальное поле было выделено на I стадии работ при интерпретации данных по аллювиальным потокам. В результате литохимического опробования площади поля, проведенного по коренным породам и по рыхлым отложениям склонов, выделился широкий первичный ореол серебра, внутри которого расположены узкие локальные первичные ореолы золота, окаймляющие рудные зоны. Последние были обнаружены при геологическом изучении площади. Элементами-индикаторами золото-серебряного оруденения являются медь, свинец, цинк, молибден, олово, бор, создающие ореолы различного размера, но локализующиеся вокруг главных рудных зон (рис. 68). За пределами ореола серебра и спутников оконтурены геохимические аномалии лития, ванадия, которые локализуются на участках распространения определенных типов пород, т. е. представляют собой петрогенные геохимические аномалии. Аномалии лития сосредоточены главным образом на покровных и субвулканических липаритах верхнего мела, аномалии ванадия — на отдельных участках развития андезитов и терригенных отложений (алевролиты, песчаники).

III. Схема интерпретации и оценки участков перспективных геохимических аномалий на 2—3 подстадиях II стадии — поисковых работ.

1. Обзор результатов детального геохимического опробования участков перспективных геохимических аномалий.

2. Интерпретация геохимических аномалий по следующим параметрам:

— ассоциациям элементов, концентрациям, зональности, эрозионному срезу и др.;

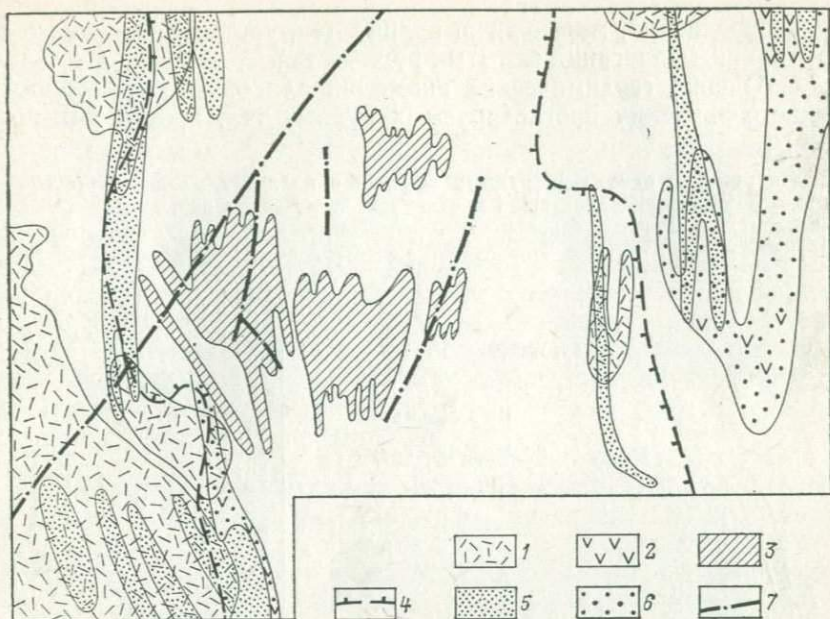


Рис. 68. Эндегенные ореолы на площади локального аномального геохимического поля, включающего золото-серебряные рудопроявления в алевритах и песчаниках. По Г. И. Хорину.

1 — липариты; 2 — андезиты; эндегенные ореолы; 3 — золота, 4 — серебра, свинца, цинка, 5 — лития, 6 — ванадия; 7 — разрывные нарушения

— геохимическим коэффициентам, связи с минералогическими и геофизическими аномалиями;

— положению в геологических структурах;

— прогнозируемому типу месторождений.

3. Оценка геохимических аномалий с учетом возможного выявления месторождений, рудные тела которых имеют: контрастные границы с геохимическими ореолами; неконтрастные границы с геохимическими ореолами (для штокверков могут быть подсчитаны прогнозные ресурсы P_1 по геохимическим данным).

4. Составление карты и разрезов геологической интерпретации и оценки перспективных геохимических аномалий с выделением объектов — рудопроявлений и месторождений.

IV. Схема интерпретации и оценки геохимических аномалий на III—IV стадиях — разведочных работ.

1. Обзор геохимических аномалий на детальных планах и разрезах.

2. Сопоставление геохимических аномалий с геохимическими ореолами известных рудных тел по следующим параметрам: элементам-индикаторам, морфологии, концентрации и геохимическим коэффициентам, зональности; геологическому положению.

3. Интерпретация геохимических аномалий с целью выяснения:

типа оруденения, морфологии рудных тел, уровня эрозионного среза, глубины залегания скрытых рудных тел.

4. Оценка геохимических аномалий для определения промышленного значения прогнозируемых рудных тел, прогнозных ресурсов P_1 .

На примере одного из рудных районов с полиметаллическим оруденением можно показать интерпретацию и оценку геохимических аномалий путем сопоставления их с моделью зональности геохимических ореолов типичных месторождений района (рис. 69). На приведенной схеме указаны: ряд вертикальной зональ-

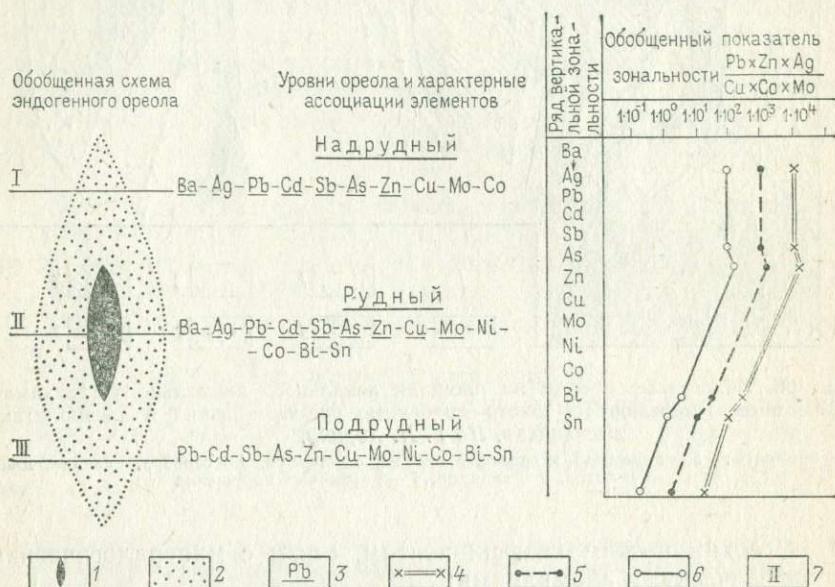


Рис. 69. Модель зональности эндогенного ореола полиметаллических месторождений.

1 — рудное тело; 2 — ореол; 3 — главный элемент-индикатор; обобщенные мультипликативные показатели зональности ореолов месторождений: 4 — барит-полиметаллических, 5 — полиметаллических; 6 — колчеданно-полиметаллических; 7 — уровень эрозионного среза

ности ореолов, уровни ореола по отношению к рудному телу, а также ассоциации элементов-индикаторов и обобщенный мультипликативный показатель зональности. Как отмечалось, мультипликативный показатель представляет собой отношение нормированных по фону произведений содержаний ассоциаций надрудных элементов к рудным или подрудным ассоциациям. В данном случае мультипликативный показатель зональности рассчитан для: $Pb \cdot Zn \cdot Ag (Ba) / Cu \cdot Co \cdot Mo (Bi)$.

По величине этого показателя различаются ореолы разных типов месторождений. Для надрудных ореолов барит-полиметаллических и полиметаллических месторождений он превышает $n \cdot 10^3$, для колчеданно-полиметаллических более $n \cdot 10^2$, а для подрудных ореолов соответственно менее $n \cdot 10^2$ и менее $n \cdot 10^1$. Для надрудных непромышленных месторождений всех типов этот показатель не превышает значений $n \cdot 10^2$, а подрудных $n \cdot 10^1$. Зоны рассеянной полиметаллической минерализации характеризуются показателем менее $n \cdot 10^1$.

Для интерпретации новой геохимической аномалии определяют мультипликативные показатели зональности и решается вопрос о принадлежности ее к определенному уровню эрозионного среза

месторождения или зоны рассеянной минерализации. Если геохимическая аномалия вскрыта скважинами, то для определения глубины залегания рудного тела с промышленным содержанием главного компонента можно использовать методику А. П. Соловова. По максимальным содержаниям строится график содержаний в полулогарифмическом масштабе (за вычетом фона).

Далее определяется величина миграционной подвижности компонента по формуле: $(-1/\lambda) = K \operatorname{ctg} \alpha$. Предполагая, что возрастание содержания компонента не отклоняется от экспоненты, по графику находят расстояние до точки с промышленным содержанием компонента. Затем рассчитывается расстояние до рудного тела.

Л. Н. Бельчанской и др. [17] предложен коэффициент интенсивности, учитывающий соотношение параметров ореолов элементов привноса $\mathcal{E}_п$ и выноса $\mathcal{E}_в$:

$$K_{зон} = \mathcal{E}_п / \mathcal{E}_в.$$

Для алтайских колчеданных месторождений $\mathcal{E}_п$ считаются свинец, цинк и медь; $\mathcal{E}_в$ — ванадий, хром, марганец. А. А. Головин [17] определил $K_{зон}$ для промышленных объектов, который оказался более 100, для зон рассеянной сульфидной минерализации менее 0,1.

АНОМАЛЬНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ, СВЯЗАННЫЕ С ЭКЗОГЕННЫМИ МЕСТОРОЖДЕНИЯМИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Особенностями проявления факторов миграции химических элементов в экзогенных условиях являются: 1) внешние факторы — низкие температуры и давления, а также участие в процессах воды и живых организмов; 2) внутренние факторы — повышенная миграция подвижных элементов в неминеральной форме, относящихся к семействам *s*- и *p*-литофилов и *d*-халькофилов; миграция химических элементов в минеральной форме (для семейств *d*- и *f*-литофилов).

Выделяются следующие виды миграции химических элементов в экзогенной зоне, определяющие условия формирования экзогенных месторождений и сопровождающих их аномальных геохимических полей (по А. И. Перельману, с изменениями): физическая (механическая) миграция; физико-химическая и биохимическая (биогенная).

Физическая миграция химических элементов в минеральной форме приводит к возникновению россыпных месторождений различных полезных ископаемых — металлических и неметаллических. Важнейшим параметром, определяющим процесс такой миграции, является энергия кристаллической решетки минералов.

Физико-химическая миграция химических элементов обеспечивает возможность образования остаточных (коры выветривания) и осадочных экзогенных месторождений полезных ископаемых.

Биохимическая миграция химических элементов обеспечивает образование экзогенных месторождений горючих ископаемых, пре-

ди которых в группе твердых ископаемых главными являются угли и горючие сланцы. Экзогенные месторождения твердых полезных ископаемых по-разному проявляются в геохимических полях (см. табл. 3).

Для геохимических поисков представляет интерес в основном первая группа и в меньшей степени вторая и третья группы месторождений. По примеру эндогенных месторождений могут быть выделены планетарные, региональные и локальные аномальные геохимические поля, являющиеся предпосылками или признаками поискового прогнозирования.

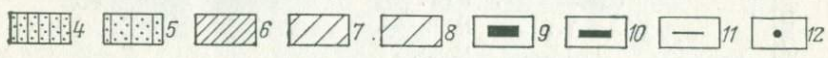
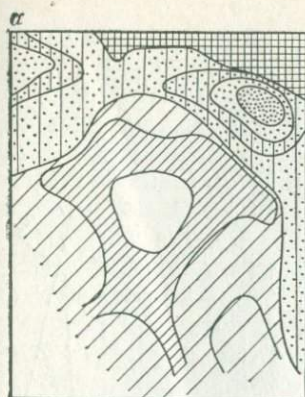
Планетарные аномальные геохимические поля развития россыпей минералов металлов связаны с прибрежно-морскими отложениями современных морей и океанов или погребенными осадочными формациями прибрежно-морского типа. Положение тех и других определяется размещением первоисточников материала полезных ископаемых. Для россыпей титана, циркония такими первоисточниками могли быть большие площади выходов на поверхность изверженных или метаморфических пород, содержащих минералы титана и циркония. Для россыпей золота, платины, олова, алмазов первоисточники имели локальный характер. Поэтому в пределах планетарных поясов развития прибрежно-морских отложений промышленные россыпи этих металлов представляют собой относительно небольшие участки, тесно связанные с первоисточниками.

Большое значение для развития россыпей имеет климатический фактор. Максимально благоприятные условия создавались при влажном тропическом климате, где активно развивалась кора выветривания и происходило массовое освобождение устойчивых минералов и миграция их в толще рыхлых образований. Региональные аномальные геохимические поля развития россыпей прибрежно-морского типа определяются особенностями геохимических (металлогенических) провинций.

Локальные аномальные геохимические поля характеризуют площади локализации самих россыпных месторождений. На этих площадях выделяются экзогенные геохимические ореолы и аномалии в прибрежно-морских отложениях, фиксирующие положение россыпей тяжелых устойчивых минералов.

Пример подобных ореолов описан по данным Б. С. Когана. Объект представляет собой золотоносные осадки прибрежной зоны морской акватории. Россыпное золото приурочено к маломощным грубозернистым морским осадкам, выстилающим дно бухты. Формирование золотоносных отложений связано с разрушением коренных рудопроявлений золота на берегу, в составе которых элементами-спутниками золота являются: медь, свинец, кобальт, никель, цинк, висмут, олово, мышьяк, серебро, молибден. Рыхлые отложения, образующиеся за счет разрушения вмещающих пород, обогащены устойчивыми минералами, содержащими железо, хром, ванадий, титан, цирконий. В поле развития россыпной минерализации наиболее высокие содержания характерны для золота, цинка, циркония, титана, ванадия и хрома; менее высокие концентрации отмечаются для свинца, кобальта, никеля, меди и олова.

В целом для золотоносной россыпи характерен комплексный литохимический ореол зонального строения (в скобках указаны элементы, имеющие подчиненное значение в данной зоне ореола). Зональность имеет следующий вид (от



Минералы тяжелой фракции	Элементы										
	Ас	Sn	Pb	Co	Ni	Cu	Zn	Zr	Ti	V	Cr
Золото	■										
Галенит	●										
Касситерит		■									
Арсенопирит	●				●						
Моноцит								—			
Гематит	●			—	—	—			—	—	●
Магнетит				—	—	—			—	—	●
Пирит	●			—	—	—	—				
Ильменит									■		
Рутил									■		
Хромшпинель				—	—			●			■
Циркон									■		
Гранат											●
Лейкоксен									■		
Элидот									■		●
Сфен									■		
Пироксен				—	—						—
Амфибол			●								—
Биотит			●								—
Апатит											●
Турмалин									●		

Рис. 70. Зональность комплексного литохимического ореола прибрежно-морской россыпи (а) и характер распределения химических элементов в минералах тяжелой фракции морских отложений (б). По Б. С. Когану.

1 — контур; 2, 3 — золото; 4 — кобальт+никель+медь+золото; 5 — кобальт+никель+медь+титан+ванадий+хром+цирконий+золото; 6, 7, 8 — титан+цирконий; содержание элементов в минералах (в %): 9 — n; 10 — $n \cdot 10^{-2}$; 11 — $n \cdot 10^{-3}$; 12 — $n \cdot 10^{-4}$; 13 — $n \cdot 10^{-5}$.

внутренней зоны к внешней) (рис. 70, а): золото; золото — (никель, кобальт, медь) — (титан, цирконий); титан, цирконий — (никель, кобальт, медь) — (золото); титан, цирконий; ванадий, хром. Контур геохимического ореола повторяет очертания россыпи и превышает ее площадь в несколько раз. Для более детального изучения природы геохимического ореола были выполнены минералогические анализы рыхлых отложений и спектральные анализы мономинеральных проб. На основании полученных данных установлен характер распределения основных химических элементов по минералам тяжелой фракции морских отложений (рис. 70, б). Золото связано с зернами самородного золота, олово — с касситеритом, свинец — с галенитом; кобальт, никель, медь и цинк — с пиритом, лимонитом, арсенопиритом; цирконий — с цирконом; титан — с ильменитом, рутилом, лейкоксом, сфеном; ванадий — с пироксенами и амфиболами; хром — с хромшпинелью.

Приведенные данные о характере геохимического ореола в морских отложениях позволили Б. С. Когану сделать заключение о том, что геохимические методы уже на текущем этапе исследований шельфа могут применяться при поисках современных морских россыпей тяжелых минералов, формирующихся в верхних слоях прибрежно-морских отложений. При выделении геохимических аномалий, связанных с повышенными концентрациями минералов тяжелой фракции, рекомендуется проведение комплексных шлихо-геохимических исследований.

Локальные аномальные геохимические потоки формируют аллювиальные россыпи тяжелых минералов. Некоторые из них фиксируются не только по литохимическим, но и по гидрохимическим потокам [39].

Планетарные аномальные пояса развития солей, боратов,

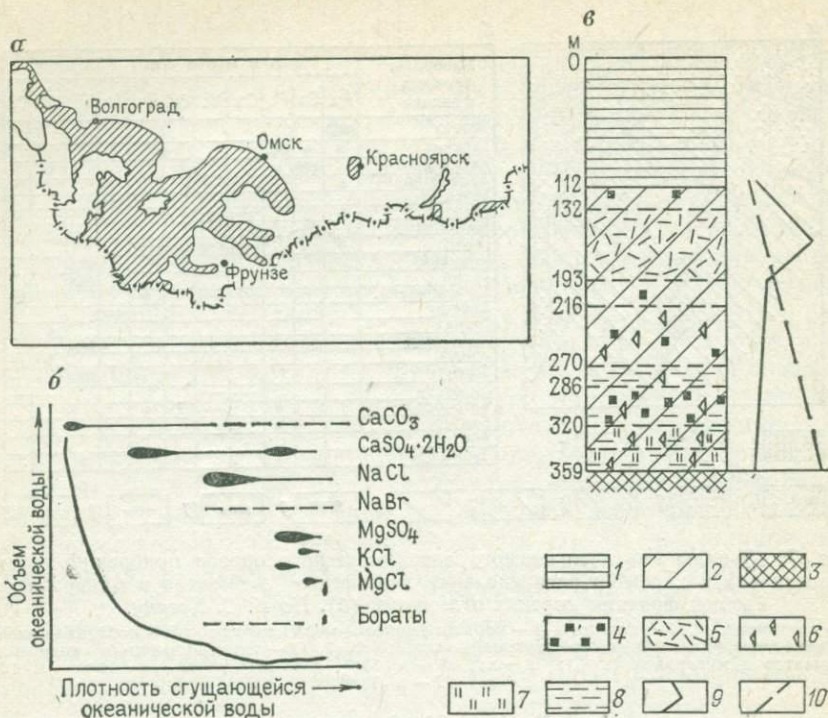


Рис. 71. Аномальные минерально-геохимические поля и ореолы, связанные с месторождениями солей.

а — соляной пояс распространения современных соляных озер на территории СССР. По А. А. Иванову; б — парагенетическая схема солеобразования в зависимости от изменения объемов сгущающейся океанической воды. По М. Г. Валашко; в — схематический разрез минеральных ореолов в породах глинисто-мергелистой свиты (D_3) над продуктивной соленосной свитой Старобинского месторождения калийных солей. По В. С. Блецко, В. Н. Коросову. 1 — кайнозойские и мезозойские отложения; 2 — глинисто-мергелистая свита (D_3); 3 — солоносная свита; 4 — пирит; 5 — целестин, барито-целестин; 6 — гипс, ангидрит; 7 — галит; 8 — гематит; графики распределения: 9 — стронция, 10 — калия и натрия

самородной серы определяются особенностями физико-химической миграции элементов в связи с климатическими и другими факторами. По данным А. А. Иванова, современные месторождения солей на территории СССР приурочены к соляному поясу, который протягивается от нижнего течения р. Дуная на западе до Забайкалья на востоке (рис. 71, а). Соляной пояс приурочен к зоне сухих степей, полупустынь и пустынь. Подобные соляные пояса известны и для других эпох развития земной коры (девона, перми и др.). Они определяют общие планетарные предпосылки поисков месторождений солей.

В пределах планетарных аномальных полей выделяются региональные и локальные аномальные поля развития солеродных бассейнов, положение которых связано с контурами морских или озерных бассейнов. Воды их — первоисточники солей. В результате испарения морской или озерной воды происходит формирование за-

лежей отдельных типов минералов солей кальция, натрия, калия, магния и бора (см. рис. 71, б). Как отмечает М. Г. Валяшко, первой солью, выпадающей на самых ранних стадиях сгущения морской воды, является карбонат кальция, затем гипс, галит, к которым присоединяются эпсомит, сильвин, карналлит, бишофит. Этот процесс обуславливает и зональность в распределении солей в солеродном бассейне. При этом калийные соли локализуются обычно в центральной его части.

Над залежами калийных солей в глинисто-мергелистых породах отмечаются рассеянная вкрапленность и прожилки пирита, ангидрита, целестина, гипса, галита, гематита. Например, сопоставление распределения этих минералов в надсолевой толще Старобинского месторождения, выполненное В. С. Блещко, В. И. Коровым, позволяет построить схематический разрез минеральных ореолов, которые легко представить и в геохимической форме (см. рис. 71, в). Непосредственно над соленосной толщей развиты выделения галита, гематита, ангидрита и гипса. Выше по разрезу сохраняются гипс и ангидрит, появляется пирит, который в виде рассеянной вкрапленности встречается до кровли глинисто-мергелистой свиты. В самой верхней части этой свиты выделяется зона развития целестина или барит-целестина, образующих небольшие гнездообразные скопления и прожилки в доломите, известняке и мергеле. Аномалия стронция и бария отмечается в интервале 166—227 м от соленосной свиты с залежами калийных солей. Надсолевой геохимический и минеральный ореолы следует учитывать при бурении глубоких скважин на соль, но более интересны для поисков солей гидрохимические аномалии. Как отмечают М. Г. Валяшко и др., вокруг соляных отложений могут быть встречены водные ореолы двух видов: образованные маточными или седиментационными рассолами и образованные растворяющимся месторождением (рассолы или воды выщелачивания). Воды выщелачивания в основном имеют значение для поисков, но их следует отличать от водных ореолов рассолов. Геохимическим параметром, который можно использовать для этого, является бром-хлорный коэффициент $Bг \cdot 10^{-3} / Cl$. Для седиментационных рассолов такой параметр колеблется от 0,1 до 0,9 в зависимости от зоны развития определенных типов солей (0,1 галит, 0,3—0,6 сильвин, 0,6—0,9 карналлит). Все рассолы выщелачивания будут беднее бромом, чем маточные рассолы, и, следовательно, этот коэффициент соответственно будет снижаться для зон выщелачивания определенных типов солей (рис. 72).

Гидрохимические показатели калиеносности соленосных отложений позволяют прогнозировать положение калийных солей и выделять площади для постановки поисковых работ. Так, по данным П. И. Трофимука, высокие гидрохимические показатели калиеносности отмечаются в Непском артезианском бассейне, расположенном в крайней северной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна. Этот район является одной из основных зон разгрузки соленых и рассольных вод хлоридного натриевого состава. В род-

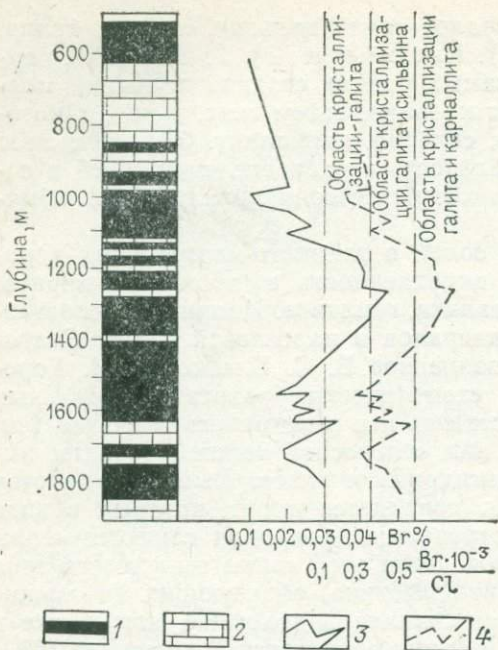


Рис. 72. Графики изменения содержаний брома и бромхлорного коэффициента в разрезе нижнекембрийских соленосных отложений Восточной Сибири (скв. Тыреть-1).
По В. С. Огиенко.

1 — каменная соль; 2 — доломиты, гипсы, ангидриты; графики: 3 — содержания брома, 4 — бромхлорного коэффициента

Для поисков близкоповерхностных скрытых месторождений калийных солей могут использоваться радиогеохимические методы поисков. Например, по данным А. В. Поливцева, скрытые залежи солей создают аномалии калия, выявляемые наземной гаммаспектрометрической съемкой [3].

На экзогенных месторождениях боратов, по данным С. Р. Крайнова и С. Д. Капранова, вокруг залежей боратовых руд образуются отчетливые водные ореолы бора и фтора.

Региональные аномальные геохимические поля стронция выявлены в ряде районов развития карбонатно-гипсоносных отложений, в которых этот элемент образует скопления целестина и реже стронцианита.

Примером сингенетической целестиновой минерализации пластового типа, по данным Ю. А. Бурмина и Ю. А. Севастьянова, может служить Новомосковское месторождение гипса в Тульской области, залегающее на глубине 100—120 м. Здесь в гипсовой и подстилающих толщах озерской толщи верхнего девона имеется 11 прослоев мощностью от 1 до 35 см, содержащих целестин. Целес-

никах здесь минерализация колеблется от 80 до 137 г/л. Воды содержат в большом количестве калийные соли, ежегодный вынос которых реками Непой и Гаженкой достигает 10 тыс. т в год. В источниках преимущественно развиты рассолы выщелачивания. Бром-хлорный коэффициент соответствует рассолам выщелачивания отложений сильвинитовой зоны. На основании гидрохимических показателей П. И. Трофимук рекомендует площади для постановки поисковых работ на калийные соли в кембрийских отложениях осадочного чехла этого района Сибирской платформы.

Очень важной задачей геохимических поисков является определение содержаний в солях элементов-примесей: рубидия, цезия, лития, бора.

тиновые руды, подобные новомосковским, содержатся и на других разведанных месторождениях гипсов Московской синеклизы, о чем свидетельствуют содержания стронция более 1% в гипсах и доломитах. Вокруг скрытых месторождений стронция образуются значительные по размерам его водные ореолы, которые могут служить надежным признаком для поискового прогнозирования.

Месторождения фосфоритов группируются в два главных генетических типа: первичные фосфориты в морских осадочных отложениях и вторичные — остаточно-метасоматического типа в карсте карбонатных слабо фосфатных морских отложений. В геохимических полях фосфориты выделяются аномальными содержаниями фосфора, а также присутствием некоторых элементов-спутников. Нормальное геохимическое поле характеризуется кларковым содержанием 0,1% (в осадочной оболочке), что соответствует 0,25% P_2O_5 . Фосфоритовые руды должны иметь не менее 5% P_2O_5 (по типам руд: 12—18%, 18—24%, свыше 24%). Геохимические аномалии характеризуются содержаниями от 0,1 до 1% фосфора.

Примером осадочных фосфоритов платформенного типа, для которых выявлены подобные аномалии, являются фосфоритовые горизонты верхнемеловых отложений Примугоджарья. По данным А. П. Бачина, эти отложения выходят на дневную поверхность лишь узкими полосами в глубоко врезанных долинах. Ореолы фосфора приурочены или к этим выходам фосфоритов или к толщам перекрывающих их фосфоритизированных конгломератов среднеэоценового возраста.

Геосинклинальные первичные фосфориты, пласты которых обычно имеют крутое падение, характеризуются не только ореолами фосфора с содержанием P_2O_5 до 1% и выше, но и совпадающими с ними повышенными содержаниями урана (радия) до $5-20 \cdot 10^{-4}$ % и аномальными отношениями U/Th.

Остаточные (карстовые) фосфориты вторичного типа также отмечаются отчетливыми ореолами фосфора P_2O_5 и положительными аномалиями U/Th. Как отмечает А. В. Печерский и М. И. Хвостов, при повышенной фосфоритизации карбонатных пород, вмещающих тела вторичных фосфоритов, ореолы фосфора также занимают большие площади, что осложняет использование данных литохимической съемки для выделения карстовых полостей, выполненных рыхлыми фосфоритами. Выход из такого положения авторы видят в применении магнитометрической съемки, так как в рыхлых фосфоритах содержится до 1% магнетита. Другой вариант методики поисков карстовых фосфоритов может быть связан с применением гамма-спектрометрической съемки. По данным В. П. Воробьева и др. [7], подобные месторождения фосфоритов фиксируются даже при аэрогамма-спектрометрической съемке (рис. 73). На интерпретационной карте, составленной по величине U/Th, отчетливо выделяются карстовые полости с фосфоритами.

Рассеянные элементы в углях, например германий, создают отчетливые аномалии, которые могут быть выявлены при геохимических поисках. Нормальное геохимическое поле в осадочных породах характеризуется кларковыми содержаниями германия в пределах от $0,2 \cdot 10^{-4}$ (в карбонатных породах) до $0,8-1,6 \cdot 10^{-4}$ % (в сланцах и песчаниках). На этом фоне в золе углей некоторых месторождений отмечаются аномалии с содержанием германия до $7 \cdot 10^{-3}$ %. Путем оконтуривания таких аномалий выделяются участки угольных пластов для промышленного использования при сжигании угля как энергетического топлива. Кларк концентрации германия в каменных углях отличается наиболее высокими величинами

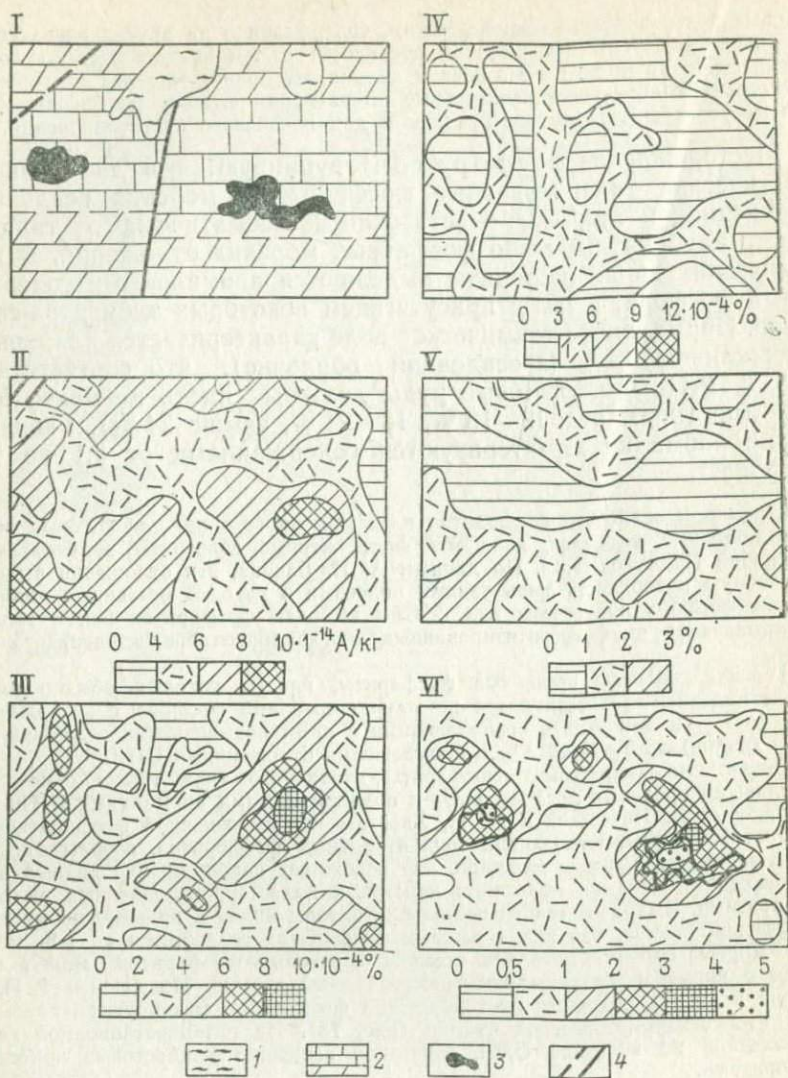


Рис. 73. Аэрогеохимические аномалии фиксирующие проявления фосфоритов остаточных карстовых месторождений [7].

I — геологическая карта; II — карта гамма-поля; III — содержания U(Ra); IV — содержания Th; V — содержания K; VI — интерпретационная карта U(Ra)/Th. 1 — глины; 2 — доломиты; 3 — фосфориты; 4 — разрывные нарушения

нами по сравнению с другими элементами: Ge—1600—2800, В—1000, Be—100—500, Pb—70, Sn—10. Накопление германия в углях объясняется поглощением его растениями, которые в дальнейшем послужили первоисточником углей.

Месторождения углей сопровождаются атмосхимическими ореолами некоторых газовых компонентов, которые могут быть

использованы для прогноза и поисков этих месторождений. По данным А. И. Фридмана и В. А. Петрова, над выходами угольных пластов под рыхлые отложения в подпочвенном воздухе отмечаются отчетливые и устойчивые во времени ореолы углекислого газа и в ряде случаев метана. Углекислый газ образуется при окислении угольного вещества кислородом атмосферного воздуха. В соответствии с установленной Г. Д. Лидиным и А. И. Кравцовым газовой зональностью, вблизи выходов угольных пластов на поверхность выделяется зона азотно-углекислых газов, в которой содержание углекислого газа достигает 20 %.

Рассмотрим примеры газовых ореолов, фиксирующих угольные пласты на некоторых месторождениях Донбасса и Норильского района, по данным А. И. Фридмана.

В центральном районе Донбасса на поле шахты им. Артема отложения угленосного карбона перекрыты рыхлыми четвертичными отложениями мощностью до 20 м. По материалам газовой съемки, которая проводилась по отдельным профилям, фоновые концентрации углекислого газа колеблются от 0,3 до

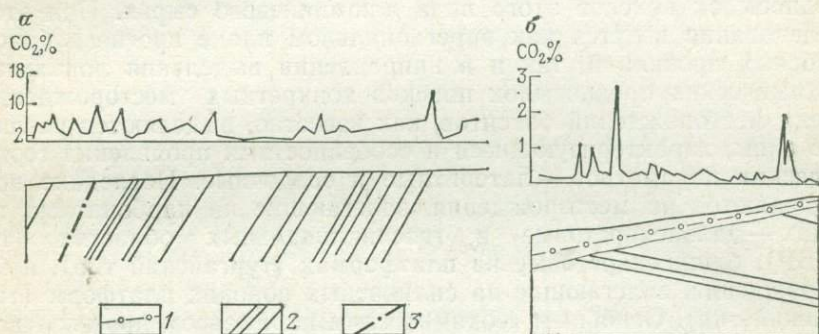


Рис. 74. Атмохимические ореолы углекислого газа над угольными пластами поля шахты им. Артема (а) и Листвяно-Вальковского месторождения (б).
По А. И. Фридману, В. А. Петрову.

1 — рыхлые отложения, 2 — угольные пласты в угленосных толщах, 3 — разрывные нарушения

0,4 %. Над угольными пластами фиксируются ореолы с концентрациями 0,6—1,5 % (рис. 74, а). Содержание углекислого газа в подпочвенном воздухе почти не изменялось по простиранию пластов угля.

В Норильском районе на Листвяно-Вальковском месторождении углей продуктивные отложения тунгусской серии пермо-карбона погребены под рыхлыми отложениями мощностью от 5 до 60 м. Глубина распространения многолетнемерзлых пород составляет 300—400 м. Фоновые содержания углекислого газа в подпочвенном воздухе здесь не превышают 0,13 %. Над угольными пластами содержания углекислого газа составляют 0,42—2,02 % (рис. 74, б). Следовательно, контрастность ореолов равняется 3—15,5, что значительно выше такого же показателя для Донбасса. Содержание метана в аномальных участках достигает десятых долей процента.

Как отмечает А. И. Фридман, атмохимические аномалии над угольными пластами отличаются от аномалий над разрывными нарушениями меньшей протяженностью и шириной аномальных зон, а также отсутствием водорода, тяжелых углеводородных газов и

гелия. Это позволяет производить интерпретацию и оценку газовых аномалий, которые выявляются при проведении газовой съемки в угленосных районах.

Экзогенные месторождения, создающие неотчетливые геохимические аномалии, характеризуются наличием таких главных элементов в составе полезного ископаемого, которые имеют высокие кларки в литосфере. Одним из таких полезных ископаемых являются бокситы, на примере которых будут рассмотрены особенности проявления геохимических аномалий и возможности использования для их оконтуривания геохимических методов.

Кларк алюминия в литосфере равен 8,1 % (около 14 % Al_2O_3); для отдельных типов горных пород кларки алюминия колеблются от 2,4 до 20 %. Среди осадочных пород наиболее значительная величина кларка характерна для глин — 10,45 %. Таким образом, бокситы низких сортов с содержанием алюминия около 15 % (28 % Al_2O_3) трудно выделить на фоне нормального геохимического поля алюминия. Вместе с тем продолжают развиваться разработки геохимических предпосылок поисков этого вида алюминиевого сырья. При этом исследование ведется как в региональном плане прогноза бокситоносных провинций, так и в направлении выделения локальных геохимических предпосылок поисков конкретных месторождений. Среди месторождений бокситов, как известно, выделяются различные типы, характеризующиеся и особенностями проявления геохимических параметров — латеритные и осадочные. Последние подразделяются на месторождения, залегающие на карбонатных породах — дальнекарстовые в геосинклинальных областях (тип СУБР), ближнекарстовые на платформах (тургайский тип), и месторождения, залегающие на силикатных породах платформ (тихвинский тип). Основным геохимическим параметром прогноза всех типов месторождений бокситов является концентрация в породах свободного глинозема Al_2O_3 . В бокситах он должен содержаться в пределах от 28 до 52 %. Следовательно, при прогнозе необходимо выделять такие формации, которые обладали бы наиболее значительными концентрациями свободного глинозема.

Региональные аномальные поля развития свободного глинозема в осадочном цикле намечаются, например, А. Б. Роновым и А. А. Мигдисовым для яснополянского подъяруса нижнего карбона Русской платформы. Как отмечают авторы, в глинах эпох резкой гумидизации климата отмечаются максимальные содержания Al_2O_3 в непосредственной близости от древних кор выветривания. Эпохи накопления глин с повышенными содержаниями этого компонента (от 12 до 18 %) синхронны с эпохами бокситообразования. Для оконтуривания таких глин представляет интерес величина кремниевого модуля $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$. В осадочных породах он равен 0,11—0,33, лишь в континентальных глинах гумидной зоны он достигает 0,56, а в песках составляет всего 0,07.

В аридной зоне кремниевый модуль остается одинаковым как в глинах, так и в песках. В гумидной же зоне, наоборот, алюмосиликаты полностью разлагаются и происходит разделение Al_2O_3

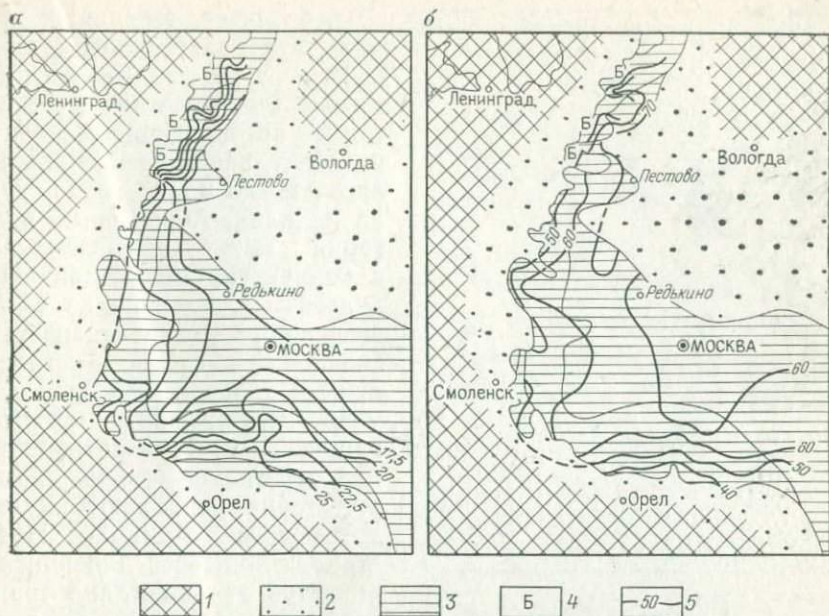


Рис. 75. Литолого-геохимические карты распределения Al_2O_3 (а) и SiO_2 (б) в глинах яснополянского подъяруса нижнего карбона Русской платформы.

По А. Б. Ронову и А. А. Мигдисову (схематизировано).

1 — области выветривания и сноса, 2 — области вероятного распространения яснополянских осадков, впоследствии размытых; 3 — континентальные глины яснополянского подъяруса; 4 — месторождения бокситов; 5 — изолинии содержания Al_2O_3 и SiO_2 .

и SiO_2 . Для целей прогноза бокситовых месторождений А. Б. Ронов и А. А. Мигдисов предлагают построение литолого-геохимических карт с количественной характеристикой распределения Al_2O_3 и SiO_2 . Одна из таких карт построена ими для яснополянского горизонта нижнего карбона Русской платформы, отложения которого представляют собой осадки типичной гумидной области (рис. 75).

По мнению авторов, изучение закономерностей кларкового распределения глинозема и кремнезема, т. е. нормального геохимического поля, может стать одним из основных методов прогноза бокситовых залежей на новых, малоизученных территориях. На фоне нормального поля могут быть выделены региональные аномальные геохимические поля, в пределах которых должны вестись поиски бокситов. Формирование их происходило в условиях общего роста содержания глинозема и снижения концентрации кремнезема в окружающих глинистых осадках. При этом, конечно, следует учитывать и наличие наиболее мощных первоисточников свободного глинозема.

В данном примере обоснование прогноза ведется для поисков месторождений бокситов тихвинского типа, приуроченных к терригенным осадочным породам платформы. Для регионального прог-

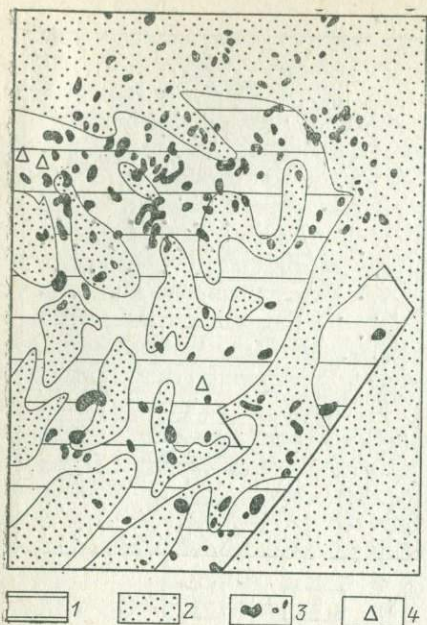


Рис. 76. Схема распределения аэроаномалий ториевой составляющей в осадочных породах, имеющих различные перспективы бокситоносности. По В. А. Цыганову.

1 — карбонатные породы весьма перспективные; 2 — карбонатно-терригенные и терригенные комплексы пород слабоперспективные или неперспективные; 3 — аэроаномалии Th; 4 — проявления бокситов

лий тория, приуроченных к известнякам, ставятся общие и детальные поиски с применением наземных гаммаспектрометрической, магнитной и литогеохимической съемок. Спектральные анализы выполняются на алюминий, железо, титан, а также на микроэлементы (цирконий и др.). Составляются комплексные графики по профилям, на которых показаны распределения содержания тория, алюминия, железа, титана, циркония, а также удельное электрическое сопротивление и мощности рыхлых отложений по данным ВЭЗ. По совокупности данных прогнозируется положение бокситоносных отложений.

На месторождениях ближнекарстового типа литохимические исследования были проведены в одном из районов Енисейского края. Результаты этих исследований будут изложены по данным работы Ю. И. Кривопалова и В. И. Пугача [29]. Бокситовые месторождения здесь связаны с мел-палеогеновыми терригенно-хемогенными отложениями — продуктами переотложения кор выветривания, сохранившимися в карстовых депрессиях протерозойского фундамента. Проведенное литохимическое опробование показало, что наиболее перспективным для прогноза бокситовых залежей представляется использование основных бокситообразующих элементов — алюминия, железа, кремния, титана,

ноза бокситов геосинклинальных дальнекарстового типа начали использоваться дистанционные геохимические методы, позволяющие выявлять и оконтуривать региональные аномальные поля тория, урана и калия. Аномальные поля тория могут быть связаны с концентрациями устойчивых аксессуарных минералов с повышенной радиоактивностью, скопления которых установлены в залежах бокситов. Отмечается, что для бокситов важно Th/K. При интерпретации аэрогеохимических аномалий тория учитывают их геологическую позицию. Представляют интерес для поисков бокситов те аномалии тория, которые приурочены к карбонатным породам, а не к песчано-сланцевым толщам (рис. 76).

Последние могут характеризоваться такими аномалиями в связи с обычным для них наличием аксессуарных минералов с повышенной радиоактивностью. В пределах аэроаномалий

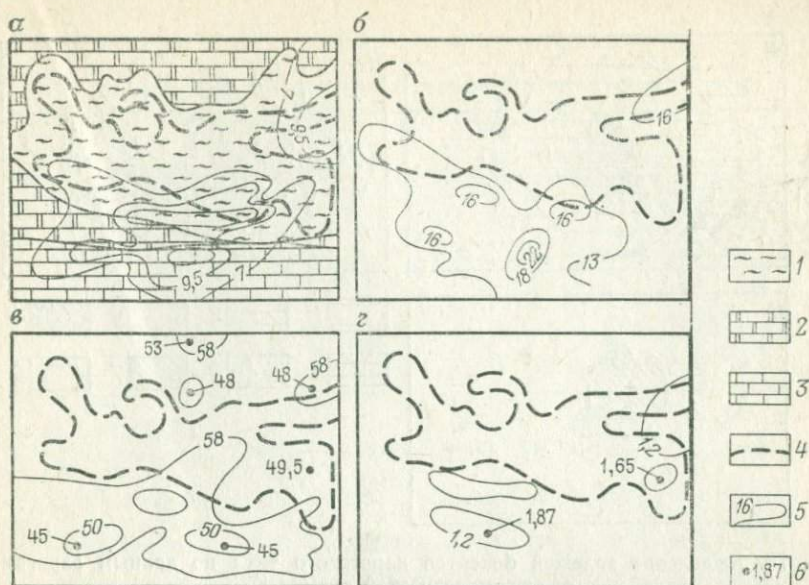


Рис. 77. Вторичные геохимические ореолы, связанные с бокситовой залежью ближнекарстового типа [29]:

а — Fe_3O_4 , б — Al_2O_3 , в — SiO_2 , г — TiO_2 . 1 — глины, бокситы (мел — палеоген), 2 — доломиты, 3 — известняки (протерозой), 4 — проекция бокситовой залежи, 5 — вторичные ореолы, 6 — максимальные содержания компонентов

Бокситовая залежь сопровождается положительными вторичными ореолами Al_2O_3 , Fe_3O_4 и TiO_2 и отрицательными ореолами SiO_2 (рис. 77). Один ореол смещен вниз по склону на 130 м от выхода бокситовой залежи под рыхлые отложения. Второй ореол расположен непосредственно над залежью. Для повышения поисковых возможностей литохимической съемки указанные авторы рекомендуют представлять ее результаты в виде комплексных полиэлементных ореолов. Для этой цели применяется геохимический показатель $\nu = \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{TiO}_2$, в данном случае равный 9,8 SiO_2 . Показатель контрастности, вычисленный по формуле $\gamma = C_{\text{max}} - C_{\text{ф}}/S$, равен для Al_2O_3 3,2; Fe_3O_4 5,2; SiO_2 2,2; TiO_2 1,6. План изолиний значений геохимического показателя увеличивает контрастность геохимических ореолов в 2—6 раз по сравнению с моноэлементными ореолами.

Месторождения бокситов карстового типа выделяются и при дистанционных исследованиях с применением аэрогамма-спектрометрической съемки. По данным В. П. Воробьева и др. [7], они фиксируются по аномальным значениям Th/K при характерном распределении радиоактивных элементов: преобладанием тория над ураном (радием) и низким содержанием калия. Для бокситов отмечаются следующие содержания: калий — низкое (0,01—0,14 %), уран не превышает $1-2 \cdot 10^{-3} \%$, торий резко варьирует в зависимости от материнских пород — первоисточников бокситов. В качестве индикатора оценки аномалий принимается Th/K , для которого строится интерпретационная карта (рис. 78). Здесь видно, что аномальными величинами Th/K свыше 30 отличается водораздель-

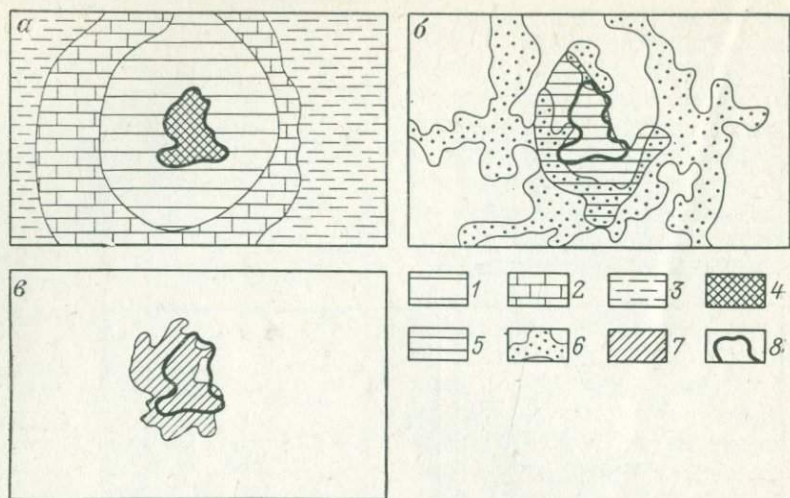


Рис. 78. Выделение залежей бокситов карстового типа по данным аэрогамма-спектрометрической съемки [7].

a — геологическая схема; *б* — схема максимальных содержаний Th и K; *в* — интерпретационная схема Th/K. 1 — алевролиты, глинистые сланцы, песчаники, 2 — доломиты, известняки, 3 — алевролиты, песчаники, известняки, 4 — бокситоносные отложения, 5 — содержания Th свыше $16 \cdot 10^{-4}$ %, 6 — содержания K свыше 3 %, 7 — аномалия Th/K; 8 — контур развития бокситов

ная возвышенность, на которой расположено месторождение бокситов.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

Эффективность геохимических поисков может рассматриваться с различных позиций: поисковой, геологической и экономической.

Поисковая эффективность определяется выявлением месторождений и тел полезных ископаемых с применением геохимических методов в общем комплексе поисковых методов. Основные показатели применения геохимических поисков обобщены В. А. Глуховым [19]. Как видно из табл. 16, наиболее эффективными являлись литохимические методы; с применением гидрохимических методов были сделаны единичные открытия. По В. А. Глухову, биогеохимические методы, «... не выведенные до сих пор из стадии опытной их апробации, пока всюду в поисковом отношении безрезультатны...».

Поисковая эффективность геохимических поисков отчетливо видна в табл. 17.

Расчет поисковой эффективности геохимических поисков В. А. Глухов предлагает производить следующим образом:

$$\mathcal{E}_1 = n/m; \mathcal{E}_2 = m/M; \mathcal{E}_3 = m_1/M; \mathcal{E}_4 = m/M_1; \mathcal{E}_5 = m_1/M_1,$$

Поисковая эффективность геохимических методов [19]

Метод	Годы	Отобрано проб	Выявлено аномалий	По ним открыто		Число проб на открытие одной аномалии	Число аномалий на открытие одного объекта	Число аномалий на открытие промышленного объекта
				месторождений	рудных тел			
Литохимические поиски по вторичным ореолам	1949—	105000000	65 000	90	75	1615	400	720
	1973							
Литохимические поиски по первичным ореолам	1963—	3000000	3 200	5	50	980	60	640
	1973							
Гидрохимические поиски	1952—	4000000	4 200	4	1	950	840	1050
	1973							

Таблица 17

Основные показатели применения геохимических методов поисков

Метод	Начало применения год	Площадь поисков тыс. км ²	Отобрано проб, тыс. шт.	Выявлено аномалий	Проверено аномалий	Открыто рудных объектов		
						месторождений	рудных тел	проявление
Литохимические поиски по вторичным ореолам	1949	5100	105 000	65 000	7000	90	75	80С
Литохимические поиски по потокам	1959	500	10 000	3 000	100	2	0	30
Литохимические поиски по первичным ореолам	1960	—	3 000	3 200	500	5	50	80
Глубинные геохимические поиски	1962	0,2	Нет свед.	20	10	1	8	6
Гидрохимические поиски	1952	600	4 000	4 200	200	4	1	40
Биогеохимические поиски	1938	Нет свед.	59		50	0	0	3
Атмохимические поиски	1963	0,5	20	20	60	0	10	37

где n — число геохимических проб, m — число выявленных аномалий, M — число открытых объектов, m_1 — число проверенных аномалий, M_1 — число открытых промышленных объектов.

На обнаружение одной геохимической аномалии по различным производственным геологическим объединениям расходуется от 22 до 210 тыс. проб; на открытие одного рудного объекта — от 33 до 350 тыс. проб; на открытие одного промышленного месторождения,

т. е. конечного объекта поисков, — от 250 тыс. до 3 500 тыс. проб. Следовательно, если рассматривать вопрос в общем виде, то только массовое геохимическое опробование площадей и участков по сети соответствующей масштабу съемки может привести к выявлению промышленных месторождений. Хотя это, конечно, не исключает возможности открытия месторождений и по значительно меньшему числу геохимических проб.

Геологическая эффективность геохимических методов определяется объемом геохимических данных, полученных по изучаемому геологическому объекту. Эти данные могут включать средние и аномальные содержания химических элементов в различных типах горных пород, общие закономерности их распределения в пределах той или иной площади, участка.

Все эти материалы могут характеризовать нормальные и аномальные геохимические поля, дополняющие поля геологические, геофизические и минералогические и определяющие в совокупности с ними направление прогноза полезных ископаемых.

В настоящее время любые геологические объекты — регионы или районы геологической съемки, перспективные зоны и массивы, минералогические и геофизические аномалии, проявления и месторождения полезных ископаемых — должны иметь необходимую геохимическую характеристику. В зависимости от ее полноты и с учетом масштаба исследований может определяться геологическая эффективность геохимических методов. Например, при изучении районов интрузивных образований выделение потенциально рудоносных интрузивов ориентирует поиски на локальных участках, что способствует сокращению затрат времени и средств на выполнение работ.

Так, по данным В. Д. Отрощенко, использование геохимических предпосылок вольфрамоносности в неизмененных интрузивах гранитоидов при изучении рудных районов в масштабах 1 : 50 000 — 1 : 25 000 позволяет выделять участки для постановки поисково-оценочных работ на вольфрам, исключая из рассмотрения другие площади, где отсутствуют такие предпосылки.

По данным К. О. Осмонбетова, литохимическими методами в стратиграфическом разрезе Уланского хребта прослеживаются толщи карбонатных, кремнистых и эффузивных пород девона, обогащенных (относительно кларка) ртутью (от $1 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-4} \%$), что отличает их от подстилающих и перекрывающих пород с низкими содержаниями ртути ($2 \cdot 10^{-5}$ — $4 \cdot 10^{-5} \%$). Аномальные ее концентрации обнаруживают прямую связь с рудоносными зонами и разрывными нарушениями.

Следовательно, породы, обогащенные ртутью, являлись благоприятными региональными горизонтами для поглощения этого элемента из гидротермальных растворов, создавших месторождения лишь в некоторых участках этих пород. Постановка в пределах районов с подобными образованиями опережающих геохимических поисков должна осуществляться с учетом этой геохимической пред-

посылки, что будет несомненно способствовать повышению не только геологической, но и поисковой эффективности работ.

Экономическая эффективность геохимических поисков определяется тремя главными показателями: удельным весом затрат на их выполнение в общем комплексе методов поисков и разведки месторождений; величиной той части затрат, которая сокращается за счет использования геохимических методов; соотношением стоимости проведенных геохимических поисков и стоимости выявленных прогнозных ресурсов и разведанных запасов.

По данным Г. И. Засухина, стоимость получения геохимических данных в общем комплексе поисковой информации колеблется от 0,5 до 20 %. По ПГО Башкиргеология в целом за определенный период стоимость поисково-геохимических работ составляла около 2 % от общих ассигнований на геологоразведочные работы.

Экономическая эффективность может быть получена за счет рационального комплексирования геохимических методов с другими поисковыми методами, а также при использовании новых способов анализа проб или обработки их результатов. По данным А. Э. Кабо и К. С. Супамбаева, в 1973 г. на территории Киргизии было запланировано сокращение объемов шлихового и литохимического опробования путем разрежения сети проб, основанное на возможности дополнения одного метода другим при сохранении необходимой достоверности изучения объектов. Этим достигалось уменьшение затрат на выполнение указанных методов. Так, при сокращении на 50 % объемов шлихового опробования годовая экономия составляет 32,4 тыс. руб., а при двукратном разрежении сети литохимического опробования — еще 19,7 тыс. руб. Однако при этом особое внимание следует обращать на правильное сочетание комплекслируемых поисковых методов, при котором недостатки одного восполняются достоинствами другого. По материалам тех же авторов, переход от ручной обработки геохимической информации к машинной показал, что если для первой сметная стоимость обработки данных по площади одного планшета масштаба 1 : 50 000 при расчете на один элемент составляла 200 руб., то при машинной обработке (на ЭВМ) 100—120 руб.

Пути повышения эффективности геохимических поисков имеют различные направления, но все они направлены на открытие промышленных месторождений и тел различных видов полезных ископаемых и прежде всего тех из них, которые создают отчетливые геохимические аномалии.

В соответствии с общей схемой определения эффективности поисковых работ [5] намечаются следующие пути повышения эффективности геохимических поисков:

— применение новой техники, технологии и организации работ;

— рациональная методика геохимических поисков на отдельных стадиях и подстадиях геологических, поисковых и разведочных работ;

— выявление геохимических предпосылок поискового прогнози-

рования, а также перспективных площадей для постановки поисковых работ и оценки новых проявлений полезных ископаемых, рекомендуемых для предварительной разведки; выявление скрытых тел полезных ископаемых на стадиях разведки;

— усовершенствование методики интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий;

— получение кондиционных материалов, включающих геохимические данные;

— сокращение объемов горно-буровых работ.

Применение новой техники, технологии и организации работ. Одним из наиболее крупных недостатков при проведении геохимических поисков является примитивная техника пробоотбора и значительный промежуток времени между взятием проб и выдачей результатов их анализа. По данным Н. И. Сафронова, этот период составляет в среднем около 4 месяцев, при колебаниях от 2 месяцев до 1 года.

Устранение этих недостатков позволит резко повысить эффективность применения геохимических методов. Для повышения эффективности геохимических методов при поисках и разведке скрытых месторождений Н. И. Сафронов, например, намечает следующие пути:

— создание и внедрение техники геохимического каротажа скважин с чувствительностью, гарантирующей выявление погребенных литохимических аномалий;

— организация химико-аналитических лабораторий непосредственно в поисковых и разведочных партиях;

— создание прямых физико-химических методов поисков, объединяющих принципы геофизических и геохимических методов, подобных методам контактного способа поляризационных кривых (КСПК) и частичного извлечения металлов (ЧИМ);

— создание полевых спектрально-аналитических установок, использующих лазерное или плазмотронное возбуждение геохимических проб непосредственно на точке исследования, и прибор типа стилометра для анализа на элементы-индикаторы в той же точке. Однако до создания и внедрения в практику подобных установок важной задачей настоящего периода является также разработка и изготовление в серийном масштабе портативных пробоотборников для отбора различных типов геохимических проб. При этом литохимические пробы должны измельчаться на месте их отбора.

Более широкое использование для анализа геохимических проб и геохимического каротажа скважин и горных выработок имеющихся ядернофизических приборов позволяет уже теперь уменьшать сроки анализа и увеличивать эффективность геохимических поисков месторождений многих твердых полезных ископаемых. Как отмечают А. П. Соловов, Е. М. Квятковский и Р. И. Дубов, в ближайшее время прогнозируется увеличение роли литохимических методов без пробоотбора с применением дистанционных и контакто-дистанционных, главным образом ядернофизических методов определения содержания большинства рудных элементов в вари-

антах воздушных, наземных (автомобильных) и глубинных (каротажных) исследований. Намечается также на ближайший период рост объемов атомно-абсорбционного анализа при сохранении ведущей роли эмиссионного спектрального анализа геохимических проб с перспективой замены его в будущем нейтронно-активационным экспресс-анализом. Подчеркивается необходимость организации цифровой автоматической регистрации результатов анализа геохимических проб для прямого ввода этих данных на ЭВМ.

В организационном плане повышению эффективности геохимических поисков будут способствовать следующие мероприятия: — создание руководящих органов по геохимическим методам в составе Министерства геологии СССР и республиканских министерств геологии;

укрепление созданных и организация новых специализированных геохимических партий в составе ПГО;

— повышение внимания к геохимическим методам поисков и разведки месторождений полезных ископаемых в учебных курсах вузов и техникумов. Некоторые исследователи (А. П. Соловов, Е. М. Квятковский, Р. И. Дубов) в качестве важного организационного мероприятия считают уместным поставить вопрос о государственных геохимических (литохимических, атмохимических и гидрохимических) съемках территории СССР.

Повышение эффективности геохимических поисков может быть достигнуто за счет разработки и внедрения в практику более рациональной методики работ. При разработке проектов геохимических поисков необходимо учитывать характер химических элементов и месторождений полезных ископаемых в отношении отчетливости создаваемых ими геохимических аномалий. Для объектов, не создающих отчетливых геохимических аномалий или вообще не создающих геохимических аномалий (см. табл. 2 и 3), геохимические исследования следует проводить с целью получения общей геохимической характеристики геологических объектов. Это может быть выполнено путем выборочного геохимического опробования, а не массового опробования, которое значительно удорожает проекты, но далеко не всегда приносит ожидаемые результаты.

В. А. Загоскин, Г. Н. Головина и др. обращают внимание на необходимость изменения методики геохимических поисков по склоновым отложениям для повышения их эффективности на II стадии работ. При обычном опробовании подпочвенного горизонта 75 % выявленных месторождений открыто на водоразделах и в верхних частях склонов. Для средних и нижних частей склонов предлагается более глубокое опробование с применением легких скважин и шурфов.

В закрытых районах повышение эффективности геохимических поисков на I и II стадиях может быть достигнуто более широким внедрением глубинной геохимической съемки. Э. Ф. Жбанов и др. считают, что глубинный отбор литохимических проб на площадях II и III категорий (полузакрытые и закрытые) должен стать в ближайшие годы ведущим средством поисков. При этом рекоменду-

ется разреженная сеть опробования по сравнению с площадной поверхностной литохимической съемкой. По Центрально-Казахстанскому и Башкирскому ПГО отмечается высокая эффективность глубинной геохимической съемки. Вместе с тем указывается, что основной причиной, тормозящей более широкое внедрение методики глубинных геохимических поисков, является недостаточное число специально приспособленных для этих целей буровых станков (КГК-100 и др.).

Повышение эффективности геохимических поисков достигается при современной и теоретической обоснованной интерпретации и оценке геохимических полей и аномалий. По данным В. А. Глухова, из 80 тыс. геохимических аномалий, зафиксированных в отчетах геологических организаций за определенный период, 20 тыс. аномалий не обосновано и не подтверждено первичными материалами; 16 тыс. отнесены к аномалиям неясного генезиса, т. е. категории аномалий, даже приближенно не оцененных. Из остальных 44 тыс. аномалий проверено и оценено лишь 7 тыс. Выявленные, но неинтерпретированные и не оцененные геохимические аномалии, по мнению В. А. Глухова, являются огромным резервом открытия новых месторождений, который может при его реализации резко повысить эффективность геохимических поисков. ПГО Бурятгеология в период 1965—1970 гг. при проверке 400 из 1500 зафиксированных аномалий было открыто 8 рудных месторождений и около 100 рудопроявлений, в то время как за предшествующий десятилетний период при проверке 60 аномалий выявлено только 2 месторождения и 10 рудопроявлений.

Экономическая эффективность всех видов геологоразведочных работ в современных условиях должна определяться величиной отдачи с каждого рубля затрат. Этот параметр применительно к геохимическим поискам может выражаться стоимостью прогнозных ресурсов полезных ископаемых, определяемых с учетом использования данных по оценке геохимических полей и аномалий; получением геохимической характеристики геологических объектов; сокращением общих затрат на геологоразведочные работы и прежде всего на горно-буровые за счет применения геохимических методов.

Эффективными могут считаться работы, отдача которых составляет не менее 3—5 руб. с каждого рубля затрат.

При составлении проектов геологосъемочных, поисковых и разведочных работ следует предусматривать такой комплекс геохимических исследований, который, наряду с другими методами, обеспечивал бы получение геологической, поисковой и экономической отдачи с каждой единицы затрачиваемых средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью современных геологоразведочных работ является увеличение площадей и глубины геологических исследований с целью обеспечения минеральным сырьем бурно развивающихся промышленности и сельского хозяйства.

Для решения этой задачи используются многие методы, в том числе и геохимические. Они основаны на массовом опробовании геологических объектов, ускоренном анализе проб и наглядном изображении результатов. В процессе развития геохимических методов начинают использоваться не только контактные, но и дистанционные методы, повышающие обзорность исследований. Рациональное комплексирование отдельных геохимических методов в сочетании с другими поисковыми методами способствует повышению общей эффективности прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых. Достигается это путем изучения, интерпретации и оценки геохимических полей и аномалий на основе использования совокупности собственно геохимических, а также минералогических, геологических, ландшафтных и математических данных. Среди них ведущими всегда остаются геологические факторы. В свое время А. Е. Ферсман указывал, что «геохимический метод имеет значение лишь в тесной и гармонической увязке с методами геологии...». Актуальность этого положения не только сохранилась до наших дней, но приобрела еще более глубокий смысл в связи с развитием новых методов геологических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абисалов Э. Г. Опережающие литогеохимические поиски по потокам рассеяния. — Разведка и охрана недр, 1977, № 9, с. 20—24.
2. Алексеенко В. А., Войткевич Г. В. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М., Недра, 1979.
3. Аристов В. В., Ляхов Л. Л. Наземные и глубинные поиски скрытых месторождений твердых полезных ископаемых. — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1982, № 4, с. 77—104, № 5, с. 89—109.
4. Аристов В. В., Алексеев Б. П., Хорин Г. И. Методика составления и поисковое значение геохимических разрезов. — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1980, № 4, с. 69—76.
5. Аристов В. В. Поиски твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1975.
6. Аристов В. В., Тихомиров С. В. Значение современного варианта периодической системы. Д. И. Менделеева для прогноза и поисков полезных ископаемых. — Изв. вузов. Сер. Геология и разведка, 1970, № 11, с. 9—18.
7. Аэрогамма-спектрометрический метод поисков рудных месторождений. Методическое руководство/В. П. Воробьев, А. В. Ефимов, М. И. Альшулер и др. М., Недра, 1977.
8. Барсуков В. Л., Григорян С. В., Овчинников Л. Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., Недра, 1981.
9. Беус А. А., Григорян С. В. Геохимические методы поисков и разведки твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1975.
10. Верховская Л. А., Сорокина Е. П. Математическое моделирование геохимического поля в поисковых целях. М., Недра, 1981.
11. Гаврусевич Б. А. Основы общей геохимии. М., Недра, 1968.
12. Генетические модели эндогенных рудных формаций. Тез. докл. Всес. совещ. 20—22 мая 1981. Новосибирск, т. I и II, 1981.
13. Геохимическая зональность Казахстанской складчатой страны/Е. В. Плющев, А. А. Смыслов, В. В. Шатов и др. — Сов. геол., 1982, № 3, с. 75—87.
14. Геохимические карты и их использование при поисках рудных месторождений. Хабаровск. Тез. докл. школы передового опыта Мингео СССР, 1979, ч. I и II.
15. Геохимические методы поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1980.
16. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981, ч. 1 и 2.
17. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. — Тез. докл. к 3-му Всес. совещ. М., ИМГРЭ, 1982.
18. Геохимические поиски. М., Мир, 1973.
19. Глухов В. А. Состояние применения и геолого-экономическая эффективность геохимических методов поисков в СССР. — В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.
20. Голева Г. А. Гидрогеохимические поиски скрытого оруденения. М., Недра, 1968.
21. Григорян С. В., Мухитдинов Г. Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений за рубежом. М., ВИЭМС, Обзор. Сер. геол., методы поисков и разведки м-ний метал. полезн. ископ., 1982.
22. Дубов Р. И. Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1974.
23. Единые методические указания по применению «Временного положения о классификации прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых» при оценке и учете ресурсов. М., ВИЭМС, 1982.
24. Еремеев А. Н., Соловов А. П. Глубинные поиски погретенных место-

рождений. — В кн.: Вопросы изучения и методы поисков скрытого оруденения. М., 1963, с. 61—84.

25. *Инструкция* по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М., Недра, 1983.

26. *Квятковский Е. М.* Литохимические методы поисков эндогенных рудных месторождений. Л., Недра, 1977.

27. *Ковалевский А. Л.* Биогеохимические поиски рудных месторождений. М., Недра, 1974.

28. *Комов И. Л., Лукашев А. Н., Коплус А. В.* Геохимические методы поисков месторождений неметаллических полезных ископаемых. М., Недра, 1982.

29. *Кривопапов Ю. И., Пугач В. И.* Литогеохимические поиски бокситов на Енисейском Кряже. — Разведка и охрана недр, 1974, № 6, с. 11—16.

30. *Левинсон А.* Введение в поисковую геохимию. Мир, 1976.

31. *Методы* разбраковки и оценки перспектив геохимических аномалий и аномальных площадей. — Тез. докл. 2-й геохим. сессии дальневост. секции СГПМ. Магадан, 1982.

32. *Методы* прикладной геохимии. Иркутск, Наука, 1981.

33. *Методическое* руководство по гидрогеохимическим поискам рудных месторождений/П. А. Удодов, С. Л. Шварцев, Н. М. Рассказов. М., Недра, 1973.

34. *Назаров И. М., Николаев А. Н., Фридман Ш. Д.* Дистанционные лазерные методы поисков месторождений полезных ископаемых. — Сов. геол. 1981, № 11, с. 106—117.

35. *Опыт* и методика геохимических поисков скрытых рудных тел на глубоких горизонтах и флангах рудных месторождений Кавказа. Ереван, Изд. Ереван. ун-та, 1979.

36. *Островский Э. Я., Портнов А. М.* Геолого-геохимические основы аэрогеохимического метода поисков месторождений, 1977, № 5, с. 99—104.

37. *Перельман А. И.* Геохимия биосферы. М., Наука, 1973.

38. *Повышение* эффективности геохимических методов поисков в зоне БАМ. Новосибирск, Наука, 1981.

39. *Поликарпочкин В. В.* Вторичные ореолы и потоки рассеяния. Новосибирск, Наука, 1976.

40. *Рациональная* последовательность работ при геохимических поисках. М., ИМГРЭ, 1982.

41. *Сает Ю. Е.* Вторичные геохимические ореолы при поисках рудных месторождений. М., Наука, 1982.

42. *Сафронов Н. И., Мецераков С. С., Иванов Н. П.* Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. Л., Недра, 1978.

43. *Соловов А. П., Матвеев А. А., Ряховский В. М.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. Учеб. пособие. Сборник задач. М., Изд-во МГУ, 1978.

44. *Стратегия* геохимических поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1980.

45. *Таусон Л. В.* Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М., Наука, 1977.

46. *Трофимов Н. Н., Рычков А. И.* Геохимические поля элементов широкого рассеяния и поиски глубокозалегающих рудных месторождений. М., Недра, 1979.

47. *Фридман А. И.* Газовая съемка при поисках руд и геологическом картировании. Методические рекомендации. М., ИМГРЭ, 1975.

48. *Фурсов В. З.* Методика измерения паров ртути при поисках ртутных месторождений. Методические рекомендации. М., ИМГРЭ, 1975.

49. *Хокс Х. Е., Уэбб Дж. С.* Геохимические методы поисков минеральных месторождений/Под ред. В. И. Смирнова. М., Мир, 1964.

50. *Хорин Г. И.* Геохимические поля Змеиногорского рудного района и полиметаллическое оруденение (Рудный Алтай). — Сов. геол., 1977, № 6, с. 98—109.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Объекты и методы геохимических поисков	4
Системный анализ объектов геохимических поисков	4
Моделирование объектов геохимических поисков	9
Классификация геохимических методов и основные операции их выполнения	35
Методика геохимических поисков	80
Геологические и ландшафтные условия ведения геохимических поисков	80
Методика геохимических поисков на стадии региональных геологосъемочных и геофизических работ	92
Методика геохимических работ на стадии поисков месторождений полезных ископаемых	95
Методика геохимических работ на стадиях предварительной и детальной разведки	100
Методика геохимических работ на стадии эксплуатационной разведки	104
Интерпретация и оценка геохимических полей для прогноза и поисков месторождений твердых полезных ископаемых	105
Общая характеристика и принципы интерпретации нормальных геохимических полей	106
Описание и интерпретация планетарных, региональных и локальных аномальных геохимических полей эндогенного типа	117
Геохимические ореолы и аномалии эндогенных месторождений и принципы их интерпретации и оценки	130
Аномальные геохимические поля, связанные с экзогенными месторождениями твердых полезных ископаемых	177
Эффективность геохимических поисков	190
Заключение	197
Список литературы	198

ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ АРИСТОВ

МЕТОДИКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Редактор издательства Р. В. Добровольская
 Обложка художника К. В. Голикова
 Художественный редактор В. В. Шутько
 Технический редактор А. В. Трофимов
 Корректор Г. П. Горбач

ИБ № 5574

Сдано в набор 02.09.83. Подписано в печать 04.11.83. Т-20368. Формат 60×90¹/₁₆ Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 12,5. Усл. кр.-отт. 12,75. Уч.-изд. л. 15,0. Тираж 4300 экз. Заказ 719/9326-14. Цена 75 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
 Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
 109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

75 коп.

4247

103
—
—

НЕДРА