

**СПРАВОЧНИК
ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ
ПОИСКАМ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ**

**СОВЕТСКОЕ
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ
ОБЩЕСТВО**

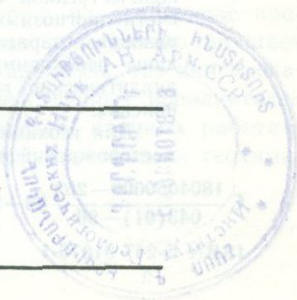


СПРАВОЧНИК ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ПОИСКАМ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Под редакцией доктора
геолого-минералогических наук
А.П. СОЛОВОВА



МОСКВА "НЕДРА" 1990



81681

ББК 26.301

С 74

УДК 550.84

Авторы:

А. П. Соловов, А. Я. Архипов, В. А. Бугров, С. А. Воробьев, Д. М. Гершман, С. В. Григорян, Е. М. Квятковский, А. А. Матвеев, С. А. Миляев, В. А. Николаев, А. И. Перельман, Ю. В. Шваров, Б. Я. Юфа, А. А. Ярошевский

Рецензент д-р геол.-минер. наук *А. Н. Еремеев*

Справочник по геохимическим поискам полезных иско-
С 74 паемых / А. П. Соловов, А. Я. Архипов, В. А. Бугров и др. —
М.: Недра, 1990. — 335 с.: ил.

ISBN 5-247-01070-1

Освещены методика и техника геохимических съемок различной детальности при поисках и разведке рудных месторождений, нефти, газа и других видов минерального сырья. Подробно рассмотрены принципы количественной интерпретации поисковых геохимических данных и подсчета прогнозных ресурсов, в том числе с применением ЭВМ. Охарактеризованы параметры геохимического поля и его локальных аномалий, даны необходимые сведения по общей геохимии, кратко рассмотрены аналитические методы и аппаратура, применяемые при геохимических поисках.

Для геохимиков, геологов и геофизиков, ведущих поиски и разведку месторождений полезных ископаемых.

С 1804050000—262 89—90
043(01)—90

ББК 26.301

ISBN 5-247-01070-1

© Коллектив авторов, 1990

Геохимические методы прогноза, поисков и оценки месторождений полезных ископаемых широко применяются во всем мире. С высокой эффективностью геохимические исследования сочетаются с геологическими и геофизическими съемками, а затем с горными и буровыми работами на всех стадиях геологоразведочного процесса, начиная от региональных съемок обширных территорий до самых детальных работ при эксплуатационной разведке промышленных месторождений. Важнейшее значение геохимические методы имеют при поисках твердых полезных ископаемых, в первую очередь рудных месторождений. В последние годы роль этих методов возросла при поисках и разведке месторождений нефти и газа.

Советскому Союзу принадлежит научный приоритет в создании современных геохимических методов поисков. Появление их относится к 1931—32 гг., когда Н. И. Сафронов (1904—1982) предложил и впервые осуществил на практике поиски рудных месторождений на основе представлений об их вторичных ореолах рассеяния. Одновременно и независимо В. А. Соколов (1900—1971) на основе тех же принципов предложил метод газовой съемки для поисков месторождений нефти и газа.

На поисковых геохимических работах в СССР заняты специалисты различного профиля, многие из которых не получили профессиональной геохимической подготовки. В процессе выполнения геохимических работ возникают многие трудности и разнообразные вопросы, ответы на которые далеко не всегда удается найти в существующих инструкциях, учебных пособиях и монографиях. Помочь в отыскании конкретных сведений и соответствующих решений призван предлагаемый Справочник.

Содержание Справочника в основном подчинено последовательным стадиям геологоразведочного процесса, в специальные главы выделены сведения общего характера (гл. 1, 2) и сведения о поисках нефти и газа (гл. 6).

Справочник составлен группой специалистов, имеющих личный опыт многолетнего ведения геохимических работ; на его основе произведен отбор сведений, необходимость в которых повседневно ощущает геохимик-поисковик. Это позволяет авторам надеяться, что книга окажется полезной для обширного круга непосредственных исполнителей геохимических работ, а также для преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов, специализирующихся в области геохимических методов поисков.

Буквенные символы для обозначения параметров и переменных величин в литературе по геохимическим методам поисков должны иметь устойчивый смысл во избежание путаницы и осложнений. Ниже приводятся главные обозначения, принятые в настоящем Справочнике и рекомендуемые к употреблению.

- A — местный параметр, определяющий смещение ореола рассеяния на склоне;
- A_x — коэффициент биологического поглощения (захвата);
- $2a$ — эффективная ширина геохимической аномалии в м;
- a — коэффициент, учитывающий долю забалансовых руд; угол наклона местности к горизонту;
- α' — склоновый коэффициент аллювия;
- B — коэффициент изменения объема пород при выветривании;
- $2b$ — эффективная длина геохимической аномалии в м;
- β — угол падения рудного тела; множитель для оценки стандарта по размаху определений;
- C_k — содержание химического элемента, отвечающее его кларку;
- C_{ϕ} — фоновое содержание элемента;
- C_x — содержание элемента в точках по профилю;
- C'_x — содержание элемента в потоках рассеяния;
- \bar{C}_x — среднее арифметическое содержание;
- C_x — среднее геометрическое содержание;
- C_{max} — максимальное содержание элемента в геохимической аномалии;
- C'_{max} — максимальное содержание элемента в потоке рассеяния;
- C_p — среднее содержание элемента в полезном ископаемом;
- C_A, C_{A1} — нижнее аномальное содержание элемента;
- $C_{A, m}$ — содержание элемента, признаваемое аномальным при m коррелирующихся точках ($m \leq 9$);
- d — плотность (объемная масса);
- E — энергия рудообразования;
- ε — стандартный множитель ($\varepsilon = \text{antlg } s_{lg}$);
- η — поправочный множитель для пересчета продуктивности надрудного первичного ореола на уровень промышленного оруденения;
- F — сила;
- f — число опробованных уровней (горизонтов) оруденения;
- $\Phi(x)$ — интеграл вероятностей для пределов $\pm x$;
- γ — показатель контрастности слабых геохимических аномалий — отношение полезного сигнала к уровню шума;

- H — глубина по вертикали (в м), на которую ведется подсчет прогнозных ресурсов;
- h — мощность элювиоделювиальных образований;
- h^* — мощность чехла дальнепринесных отложений;
- I — мультипликативный показатель;
- Δh — ежегодный слой денудации;
- i, j — порядковые номера при буквенных обозначениях величин; номера точек наблюдения;
- K_z — коэффициент зональности;
- K_k — кларк концентрации;
- K_x — коэффициент водной миграции элементов;
- k — коэффициент остаточной продуктивности, характеризующий пропорциональность между количеством металла в ореоле и в коренном оруденении (M/M_p ; P/P_p ; q/q_p);
- k' — коэффициент пропорциональности между продуктивностью ореолов и потоков рассеяния (P'_x/P_x);
- κ — коэффициент подобия, характеризующий генетически однотипные месторождения;
- L — длина объекта (геохимической аномалии);
- $2l$ — расстояние между профилями съемочной сети;
- $1/\lambda$ — миграционная способность (подвижность) элемента в первичном ореоле в м;
- λ' — поправочный множитель для оценки истинной продуктивности литохимического потока рассеяния;
- M — надфоновое количество металла по профилю в м% (линейная продуктивность аномалии);
- M_p — количество металла в сечении рудной зоны; линейная продуктивность полезного ископаемого в м%;
- k, m, N, n — число точек, число проб, частость и т. п.;
- v — геохимический показатель зональности: безразмерное отношение между содержаниями (количествами) двух или нескольких химических элементов геохимической аномалии, монотонно изменяющееся по заданному направлению;
- ω — угол; веса химических элементов;
- P — надфоновая площадная продуктивность геохимической аномалии в м² %; вероятность случайного события;
- P_p — площадная продуктивность коренного оруденения в м² %;
- P'_i — полная (устойчивая) продуктивность потока рассеяния в м² %;
- P'_x — кажущаяся продуктивность потока рассеяния в м² %;
- $2p, 2p_x$ — мощность рудного тела в м;
- $2p_y$ — длина рудного тела в м;
- Π — вероятность случайного события;
- Q — количество (запасы) металла в т;
- Q_n — прогнозные (геологические) ресурсы металла в рудопроявлениях до глубины H м;
- q — количество металла в ореоле рассеяния для слоя 1 м в т;

q_p	— количество металла в коренном оруденении для слоя l м в т;
Δq_p	— удельная продуктивность оруденения в т/м/км ² ;
R	— расстояние от вершины водораздела до точки P'_{\max} ; раз- мах наблюдений;
R_0	— расстояние от вершины водораздела до точки начала поступления металла из ореола в русло;
r	— коэффициент корреляции; радиус;
S_x	— площадь водосбора (бассейна денудации) в м ² ;
S_α	— смещение ореола рассеяния к подножью склона в м;
S_β	— смещение ореола рассеяния по восстанию в м;
s	— стандартное отклонение;
σ	— коэффициент гипергенного рассеяния в м;
T	— время;
τ_x	— коэффициент талассофильности химических элементов;
X, x	— направление по профилю (вкост простиранья рудного тела); направление вдоль русла по направлению стока;
Δx	— шаг опробования по профилю в м;
Y, y	— направление по простиранью рудного тела;
Z, z	— направление по падению рудного тела; направление по нормали в дневной поверхности; глубина в м.

Индексы x, y, z, θ, h, p, i и другие при буквенных обозначениях указывают, что данная переменная величина или параметр рассмат- риваются вдоль соответствующего направления (x, y или z), на днев- ной поверхности (θ), на границе коренных пород (h), в рудной зоне (p), в точке с номером i и т. п.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Геохимическое поле (Г. п.) — земное пространство, охарактеризованное содержаниями химических элементов или их соединений, как функциями пространственных координат и времени $C_x = f(x, y, z, T) > 0$. Термин введен П. К. Соболевским в 1932 г. по аналогии с физическими полями Земли. Направление ортогональных осей координат обычно принимается: x — на север (или вкост залежи), y — на восток (или по простирацию), z — на глубину по нормали к горизонтальной плоскости (или по падению залежи).

Для любого химического элемента согласно закону Вернадского $0 < C_x < 100\%$. В преобладающей части пространства значения Г. п. близки к величинам кларков химических элементов C_k для соответствующих геосфер, определяя местный геохимический фон C_f или нормальное Г. п. ($C_f \neq C_k$). Г. п., изменяясь во времени и в пространстве, для каждого момента времени в данной точке имеет только одно значение. Для характеристики Г. п. в области фоновых содержаний элементов служат методы математической статистики, для анализа пространственно-упорядоченных, аномальных значений Г. п. привлекается аппарат уравнений математической физики. Г. п. подчиняется принципу суперпозиции, согласно которому действия нескольких источников складываются. По своей природе Г. п. многомерное, допускает одновременное рассмотрение содержаний многочисленных элементов и различных корреляционных или функциональных зависимостей между ними. Широко практикуется рассмотрение одномерных характеристик типа $C_x = f(x)$, имеющих смысл графиков содержаний химического элемента вдоль профиля, и двухмерных карт изоконцентраций на поверхности $C_x = f(x, y)$ или на глубину $C_x = f(x, z)$, $C_x = f(y, z)$.

Многие геологические процессы протекают в условиях подвижного равновесия или стремятся к регулярному режиму (выветривание и денудация, биогенное накопление и вынос и т. п.) и потому для конкретной эпохи Г. п. не зависит от времени. Это, а также кратковременность наших исследований по сравнению с длительностью геологического времени позволяют в большинстве случаев считать наблюдаемое Г. п. стационарным. На планомерном изучении Г. п. и его локальных аномалий основаны геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых.

1.2. КЛАРКИ ГЕОСФЕР

Средние содержания химических элементов в геосферах Земли именуются в СССР кларками. Термин предложен А. Е. Ферсманом в честь

американского геохимика Ф. У. Кларка (1847—1931), исследования которого положили начало изучению среднего химического состава земной коры.

Для непосредственного геохимического изучения доступны четыре поверхностные оболочки Земли — атмосфера, гидросфера, верхняя часть литосферы (земная кора) и биосфера, охватывающая гидросферу, часть атмосферы и часть литосферы. Земная кора — внешняя твердая оболочка Земли, ограниченная сверху поверхностью суши и дном океанов и морей, снизу — границей Мохоровичича, разделяется, в свою очередь, на осадочную, гранитно-метаморфическую и гранулит-базитовую оболочки континентальной коры и базальтовую оболочку океанической коры (табл. 1), являющиеся продуктами планетной дифференциации глубинного (исходного) вещества Земли. Главные механизмы этой дифференциации — выплавление и дегазация вещества поверхностных оболочек из вещества верхней мантии и комплекс геологических процессов выветривания, осадкообразования, метаморфизма, корового магмообразования и магматической дифференциации — привели к сложному, глубоко дифференцированному распределению элементов и формированию горных пород, а также газовой и жидкой оболочек Земли и, наконец, биосферы, резко различных по химическому составу.

Химический состав атмосферы Земли как динамической оболочки, газы которой участвуют в геохимическом и биогеохимических круговоротах, определяется количественным балансом, индивидуальным для

Таблица 1

Площади поверхности, объемы и массы поверхностных геосфер Земли.
По А. Б. Ронову, А. А. Ярошевскому и А. А. Мигдисову (1989)

Геосферы, оболочки, живое вещество	Площадь поверхности, 10^6 км^2	Объем, 10^6 км^3	Масса, 10^{24} г
Земная кора в целом	510,0	10 210	28,46
осадочная оболочка	—	1130	2,70
гранитно-метаморфическая оболочка	—	2995	8,12
гранулит-базитовая и базальтовые оболочки	—	6085	17,64
Континентальная кора в целом	149,0	6500	18,05
осадочная оболочка	—	765	1,90
гранитно-метаморфическая оболочка	—	2510	6,80
гранулит-базитовая оболочка	—	3225	9,35
Субконтинентальная кора в целом	64,9	1540	4,27
осадочная оболочка	—	250	0,62
гранитно-метаморфическая оболочка	—	485	1,32
гранулит-базитовая оболочка	—	805	2,33
Океаническая кора в целом	296,1	2170	6,14
осадочная оболочка	—	115	0,18
базальтовая оболочка	—	2055	5,96
Гидросфера	361,0	1370	1,41
Атмосфера	510,0	—	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Живое вещество *	—	—	$2,5 \cdot 10^{-6}$

* По данным О. П. Добродеева и И. А. Суетовой (1976), в пересчете на сухое вещество.

каждого элемента, в процессах дегазации, диссипации в космическое пространство, взаимодействия с твердыми породами земной коры, растворением в морской воде и участием в биохимических процессах.

Главные компоненты атмосферы характеризуются следующими содержаниями (в %): N — 75,5; O — 23,1; Ar — 1,28; CO₂ — 0,046, He — $1,3 \cdot 10^{-3}$; Ne — $2,9 \cdot 10^{-4}$; Kr — $7,2 \cdot 10^{-6}$; Xe — $3,6 \cdot 10^{-6}$.

В состав атмосферы входят многочисленные второстепенные и редкие газы (пары воды, озон, метан, летучие соединения металлов, серы, органические соединения и др.), которые присутствуют в незначительном и весьма переменном количестве; их кларки указать невозможно.

Химический состав гидросферы, в массе которой резко преобладают воды океана (табл. 2), обусловлен накоплением на поверхности Земли продуктов дегазации, конденсацией воды и ее взаимодействием как сильного растворителя с горными породами земной коры и газами атмосферы. Средний состав гидросферы количественно контролируют следующие главные механизмы: растворимость соединений химических элементов; равновесия адсорбции, ионного обмена и соосаждения второстепенных элементов на главных по распространенности минералов осадочных пород; динамический баланс поступления (сток с континентов, отчасти гидротермальная деятельность) и осаждения (захват образующимися осадками) химических элементов.

Таблица 2

Кларки гидросферы (масс. доля в %). По А. П. Виноградову (1967), с дополнениями по В. Н. Иваненко (1979), В. В. Гордееву и А. П. Лисицыну (1979) и В. В. Гордееву (1983)

Атомный номер	Элемент	Кларки		Атомный номер	Элемент	Кларки	
		морской воды	речной воды (растворенная форма)			морской воды	речной воды (растворенная форма)
1	H	10,80	11,19	47	Ag	$1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$
2	He	$5 \cdot 10^{-10}$	—	48	Cd	$7 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$
3	Li	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	49	In	10^{-10}	—
4	Be	$5 \cdot 10^{-10}$	—	50	Sn	10^{-9}	$4 \cdot 10^{-9}$
5	B	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	51	Sb	$3 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-7}$
6	C _{неорг.}	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$	52	Te	—	—
7	N	$5 \cdot 10^{-5}$	—	53	J	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$
8	O	85,90	88,80	54	Xe	10^{-8}	—
9	F	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	55	Cs	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-9}$
10	Ne	10^{-8}	—	56	Ba	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
11	Na	1,067	$5 \cdot 10^{-4}$	57	La	$3 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-9}$
12	Mg	0,128	$2,9 \cdot 10^{-4}$	58	Ce	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-9}$
13	Al	$1 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	59	Pr	$6,4 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-10}$
14	Si	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	60	Nd	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-9}$
15	P	$6 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	61	Pm	—	—
16	S	0,0898	$3,8 \cdot 10^{-4}$	62	Sm	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-10}$
17	Cl	1,919	$5,5 \cdot 10^{-4}$	63	Eu	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$
18	Ar	10^{-5}	—	64	Gd	$7 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-10}$
19	K	0,0396	$2 \cdot 10^{-4}$	65	Tb	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$
20	Ca	0,0408	$1,2 \cdot 10^{-3}$	66	Dy	$8,2 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-10}$
21	Sc	$8 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-10}$	67	Ho	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$
22	Ti	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	68	Er	$7,4 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-10}$
23	V	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	69	Tm	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$

Продолжение табл. 2

Атомный номер	Элемент	Кларки		Атомный номер	Элемент	Кларки	
		морской воды	речной воды (растворенная форма)			морской воды	речной воды (растворенная форма)
24	Cr	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	70	Yb	$8,2 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-10}$
25	Mn	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$	71	Lu	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$
26	Fe	$5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6}$	72	Hf	—	—
27	Co	$3 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-8}$	73	Ta	—	—
28	Ni	$5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	74	W	10^{-8}	$3 \cdot 10^{-9}$
29	Cu	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-7}$	75	Re	10^{-9}	—
30	Zn	$1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	76	Os	10^{-10}	—
31	Ga	$2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	77	Ir	—	—
32	Ge	$5 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-9}$	78	Pt	—	—
33	As	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	79	Au	$4 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$
34	Se	$1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	80	Hg	$3 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-9}$
35	Br	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	81	Tl	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$
36	Kr	10^{-8}	—	82	Pb	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$
37	Rb	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	83	Bi	$3 \cdot 10^{-9}$	—
38	Sr	$7,9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	84	Po	—	—
39	Y	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-8}$	85	At	—	—
40	Zr	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	86	Rn	$6 \cdot 10^{-20}$	—
41	Nb	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	87	Fr	—	—
42	Mo	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	88	Ra	10^{-14}	—
43	Tc	—	—	89	Ac	10^{-20}	—
44	Ru	10^{-11}	—	90	Th	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-8}$
45	Rh	—	—	91	Pa	10^{-14}	—
46	Pd	—	—	92	U	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$

Кларки главных элементов (H, O, Na, Mg, Ca, K, Sr, Cl, S, C, Br и V) морской воды рассчитаны для средней солености 34,887‰.

Суммарное содержание в морской воде растворенной и взвешенной форм составляет (в %): Al — $2,1 \cdot 10^{-7}$, Sc — $1,1 \cdot 10^{-10}$, Cr — $2,8 \cdot 10^{-8}$, Fe — $6 \cdot 10^{-7}$, Zn — $1,6 \cdot 10^{-7}$, Y — $1,5 \cdot 10^{-9}$, Zr — $3 \cdot 10^{-9}$, Ce — $1,9 \times 10^{-10}$, Eu — $1,4 \cdot 10^{-11}$, Lu — $2 \cdot 10^{-11}$, Th — $1,6 \cdot 10^{-11}$. Для остальных элементов доля взвешенной формы составляет несколько процентов или десятые и сотые доли процента; для Be, Ge, As, Se, Nb, Ru, In, остальных редкоземельных элементов, а также W, Re, Au, Hg, Pa данные отсутствуют (рассчитано при среднем содержании взвеси 0,2 мг/л). В речной воде для подавляющего большинства элементов доля растворенной формы не превышает нескольких процентов, для элементов-гидролизатов — значительно меньше процента.

Средний химический состав осадочной оболочки в целом (табл. 3) зависит прежде всего от среднего химического состава глубинного вещества, поступающего на поверхность в процессе выплавления и вовлекаемого в процессы эрозии и выветривания, а также от захвата газов в этих процессах, и частично от поступления и разгрузки в бассейнах седиментации циркулирующих водных растворов, дополнительно поставляющих ряд компонентов в форме растворенных соединений.

Кристаллическая часть земной коры (гранитно-метаморфическая и гранулит-базитовая оболочки континентальной коры и базальтовая оболочка океанической коры) геологически гетерогенны и сложены маг-

Таблица 3

Состав (масс. доля в %) осадочной оболочки континентов и океанов, гранитно-метаморфической, гранулит-базитовой оболочек континентов и базальтовой оболочки океанов.

По данным А. Б. Ронова, А. А. Ярошевского и А. А. Мигдисова (1989)

Компонент	Осадочная оболочка		Континентальная кора		Базальтовая оболочка океанической коры
	континентальной коры	океанической коры	гранитно-метаморфическая оболочка	гранулит-базитовая оболочка	
SiO ₂	51,82	34,62	63,08	49,56	50,01
TiO ₂	0,66	0,48	0,54	1,88	1,40
Al ₂ O ₃	12,90	8,45	15,38	17,64	15,02
Fe ₂ O ₃	2,50	4,46	2,24	—	2,47
FeO	2,92	0,94	3,60	11,28	7,48
MnO	0,11	0,83	0,10	0,18	0,18
MgO	5,31	2,36	2,96	6,41	7,70
CaO	9,94	22,50	3,79	8,74	11,69
Na ₂ O	1,95	2,43	2,71	3,32	2,42
K ₂ O	2,22	1,29	2,89	0,63	0,19
P ₂ O ₅	0,16	0,15	0,16	0,36	0,14
C _{орг}	0,48	0,65	0,05	—	—
CO ₂	7,21	15,81	0,81	—	—
SO ₃	0,22	—	0,10	—	—
S _{пир.}	0,22	0,03	0,06	—	—
Cl	0,54	—	0,02	—	—
F	0,05	0,05	0,05	—	—
H ₂ O	3,04	4,95	1,46	—	—

матическими и метаморфическими породами. Химический состав верхней части континентальной коры, ее гранитно-метаморфической оболочки (см. табл. 3) оценивается по составу шитов.

Состав базальтовой оболочки океанов (см. табл. 3) оценивается на основе данных о составе базальтовых пород дна океана. Состав гранулит-базитовой оболочки континентов не доступен непосредственному изучению, и его оценка является модельной. Состав этой оболочки рассчитан на основе предположения о формировании континентальной коры за счет накопления вулканогенных пород складчатых поясов (геосинклинальных и орогенных зон или современных островных дуг), главными из которых являются базальты, андезиты, дациты и риолиты в пропорции 6:3:0,5:0,5, и представлении о геохимическом балансе континентальной коры.

Распространенность главных типов горных пород осадочной и гранитно-метаморфической оболочек континентальной коры приведена в табл. 4.

В настоящее время не опубликованы кларки второстепенных химических элементов континентальной коры, рассчитанные на основе обобщения конкретных данных о их величинах в главных типах магматических, метаморфических и осадочных пород. Принимаемые оценки основаны на идее о геохимическом балансе вещества коры и представлении его в виде некоторой смеси двух наиболее распространенных типов магматических пород — базальтов и гранитов. Химический состав

Таблица 4

Распространенность (% объема оболочки) главных типов осадочных, метаморфических и магматических пород осадочной и гранитно-метаморфической оболочек континентов.

По А. Б. Ронову, А. А. Ярошевскому, А. А. Мигдисову (1989)

Оболочка	Тип пород	Распростра- ненность
Осадочная	Пески и песчаники	23,9
	Глины и глинистые сланцы	45,0
	Карбонаты	15,5
	Кремнистые породы	1,7
	Соли	1,0
	Эффузивы:	
	в целом	12,9
	базальты и траппы	7,4
	андезиты	4,0
	риолиты и дациты	1,5
Гранитно-мета- морфическая	Магматические:	
	в целом	48,5
	граниты, гранодиориты, гранитогнейсы	46,9
	габброиды	1,6
	дуниты, перидотиты	< 0,1
	сиениты, нефелиновые сиениты	< 0,1
	Метаморфические:	
	в целом	51,5
	металесчаники	4,0
	парагнейсы, кристаллические сланцы	39,1
	карбонаты	1,6
	железистые породы	0,4
	амфиболиты, метаморфизованные основные эффузивы	5,4
	метаморфизованные кислые эффузивы	1,0

верхней части континентальной коры (континентальной коры в целом, по А. П. Виноградову, С. Р. Тэйлору и др.) может быть представлен приблизительно как смесь базальтов и гранитов в пропорции 0,33:0,67, что практически тождественно смеси, рассмотренной в классической работе А. П. Виноградова (1962 г.). Для расчета кларков элементов верхней части континентальной коры (гранитно-метаморфическом слое, табл. 5) приняты средние содержания элементов в базальтах и гранитах.

Таблица 5

Кларки химических элементов верхней части континентальной коры (гранитно-метаморфической оболочки), г/т

Атомный номер	Элемент	Кларк	Атомный номер	Элемент	Кларк
1	H	1600	46	Pd	0,01
2	He	—	47	Ag	0,07
3	Li	27	48	Cd	0,2
4	Be	3,5	49	In	0,1
5	B	12	50	Sn	2,5
6	C	2700	51	Sb	0,2

Продолжение табл. 5

Атомный номер	Элемент	Кларк	Атомный номер	Элемент	Кларк
7	N	20	52	Te	0,001
8	O	479 000	53	I	0,5
9	F	500	54	Xe	—
10	Ne	—	55	Cs	4
11	Na	20 100	56	Ba	580
12	Mg	17 900	57	La	34
13	Al	81 400	58	Ce	69
14	Si	295 000	59	Pr	7,7
15	P	700	60	Nd	31
16	S	1000	62	Sm	6,3
17	Cl	200	63	Eu	1,25
18	Ar	—	64	Gd	5,6
19	K	24 000	65	Tb	0,97
20	Ca	27 100	66	Dy	5,3
21	Sc	16	67	Ho	1,2
22	Ti	3200	68	Er	3,1
23	V	110	69	Tm	0,48
24	Cr	99	70	Yb	3
25	Mn	770	71	Lu	0,44
26	Fe	43 700	72	Hf	4
27	Co	23	73	Ta	2,5
28	Ni	58	74	W	1,2
29	Cu	46	75	Re	0,000
30	Zn	76	76	Os	—
31	Ga	19	77	Ir	—
32	Ge	1,5	78	Pt	0,00
33	As	1,7	79	Au	0,004
34	Se	0,05	80	Hg	0,08
35	Br	2	81	Tl	0,7
36	Kr	—	82	Pb	16
37	Rb	110	83	Bi	0,3
38	Sr	290	86	Rn	—
39	Y	28	88	Ra	0,000001
40	Zr	170	89	Ac	—
41	Nb	16	90	Th	12
42	Mo	1	91	Pa	—
44	Ru	—	92	U	3
45	Rh	—			

Примечание. Кларки континентальной коры в целом в настоящее время не могут быть оценены корректно, так как не известен состав гранулит-базитового слоя. Кларки С, О, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe приведены по данным А. Б. Ронова, А. А. Ярошевского и А. А. Мигдисова (1989); кларки остальных элементов рассчитаны по данным А. П. Виноградова (1962) о средних содержаниях элементов в базальтах и гранитах с дополнениями С. Р. Тэйлора (1964); кларк висмута приведен по данным Э. Ф. Миллера, В. П. Прокопчука (1987); кларк радия рассчитан по равновесию с ураном.

Кларки живого вещества приведены в табл. 6. Средний состав биосферы, в которую входят, помимо живого вещества, часть атмосферы, гидросфера, почвы и часть осадочной оболочки, не может быть в настоящее время достоверно рассчитан из-за неопределенности средней пропорции этих типов веществ в биосфере.

Земная кора характеризуется значительной региональной неоднородностью, которая, однако, в настоящее время не может быть охарактеризована достоверными региональными кларками.

Таблица 6

Кларки живого вещества (масс. доля в %).

По А. П. Виноградову (1954, 1970) с дополнениями
Н. Боуэна (1966) и В. В. Добровольского (1983)

Атомный номер	Элемент	Кларк	Атомный номер	Элемент	Кларк
1	H	10	40	Zr	$3 \cdot 10^{-4}$
2	He	—	41	Nb	—
3	Li	$6 \cdot 10^{-5}$	42	Mo	10^{-5}
4	Be	$4 \cdot 10^{-6}$	43	Tc	—
5	B	$1 \cdot 10^{-3}$	44	Ru	—
6	C	18	45	Rh	—
7	N	0,3	46	Pd	—
8	O	70	47	Ag	10^{-6}
9	F	$1 \cdot 10^{-4}$	48	Cd	10^{-7}
10	Ne	—	49	In	—
11	Na	0,02	50	Sn	10^{-5}
12	Mg	0,07	51	Sb	10^{-7}
13	Al	0,02	52	Te	—
14	Si	0,15	53	J	$1 \cdot 10^{-5}$
15	P	0,07	54	Xe	—
16	S	0,05	55	Cs	10^{-5}
17	Cl	0,02	56	Ba	10^{-3}
18	Ar	—	57—71	TR	$n \cdot 10^{-3}$
19	K	0,3	72	Hf	10^{-7}
20	Ca	0,5	73	Ta	—
21	Cs	—	74	W	10^{-6}
22	Ti	10^{-4}	75	Re	—
23	V	10^{-4}	76	Os	—
24	Cr	10^{-5}	77	Ir	—
25	Mn	10^{-3}	78	Pt	—
26	Fe	0,02	79	Au	10^{-8}
27	Co	$2 \cdot 10^{-5}$	80	Hg	$5 \cdot 10^{-7}$
28	Ni	$5 \cdot 10^{-5}$	81	Tl	—
29	Cu	$2 \cdot 10^{-4}$	82	Pb	10^{-4}
30	Zn	$2 \cdot 10^{-3}$	83	Bi	—
31	Ga	10^{-6}	84	Po	—
32	Ge	10^{-4}	85	At	—
33	As	10^{-5}	86	Rn	—
34	Se	10^{-6}	87	Fr	—
35	Br	$1,5 \cdot 10^{-4}$	88	Ra	—
36	Kr	—	89	Ac	—
37	Rb	$2 \cdot 10^{-4}$	90	Th	—
38	Sr	$2 \cdot 10^{-3}$	91	Pa	—
39	Y	$3 \cdot 10^{-5}$	92	U	$8 \cdot 10^{-7}$

Примечания. В основе расчетов положены данные о составе растительности суши — преобладающего по массе живого вещества биосферы. Содержания элементов, как правило, характеризуются большой дисперсией, поэтому для многих второстепенных элементов может быть указан только порядок распространенности.

1.3. ЗАКОН ВЕРНАДСКОГО

Появление высокочувствительных методов определения химического состава природных образований привело к накоплению огромного количества данных о содержаниях элементов в различных геологических объектах — горных породах, рудах, минералах, почвах, природных водах, атмосфере, живых организмах, метеоритах и других видах веще-

ства. Эти результаты привели В. И. Вернадского в 1909 г. к открытию важнейшего геохимического явления — присутствию в каждом природном объекте всех химических элементов, т. е. явления всеобщего рассеяния элементов в природе. Состояние рассеяния отражает стремление химических элементов к равномерному распределению во всем пространстве, связано с ростом энтропии систем при гомогенизации вещества и является главной формой существования основной массы атомов большинства элементов. Рассеяние обусловлено возможностью изоморфного вхождения химических элементов в главные и второстепенные породообразующие минералы, захватом в твердые фазы в форме различных неструктурных примесей (адсорбция на поверхности растущих кристаллов, захват дефектами и дислокациями, вхождение в виде включений маточных растворов и расплавов), наличием «микроминералов», закономерно или случайно распределенных в объеме кристаллов, а также образованием растворимых и летучих соединений и комплексов в расплавах и флюидных фазах в земной коре и на ее поверхности.

Характеризуя открытое им явление, В. И. Вернадский писал: «В каждой капле и пылинке вещества на земной поверхности, по мере увеличения тонкости наших исследований, мы открываем все новые и новые элементы. Получается впечатление микрокосмического характера их рассеяния. В песчинке или капле, как в микрокосме, отражается общий состав космоса. В ней могут быть найдены все те же элементы, какие наблюдаются на земном шаре, в небесных пространствах. Вопрос связан лишь с улучшением и уточнением методов исследования» (Избранные сочинения, т. 1, М. АН СССР, 1954, стр. 401). По предложению Н. И. Сафронова явление всеобщего рассеяния химических элементов в природных образованиях названо «законом Вернадского» [33].

Согласно закону Вернадского «встречаемость» любого химического элемента в пробах природных или искусственных материалов, направляемых на анализ, заранее известна и всегда 100,0%. Вычисляемые иногда показатели «встречаемости» элементов в пробах менее 100% не имеют научного смысла и характеризуют только недостаточную чувствительность принятых методов анализа. Современная геохимия отрицает результаты химического анализа «элемента нет», заменяя их понятием «элемент не обнаружен» (н.о.).

Закон Вернадского справедлив в условиях макромира, на молекулярном уровне его действие прекращается.

1.4. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ

Принятые в геохимии классификации элементов отражают различные особенности их распределения и поведения в природных процессах и связаны с их химическими свойствами и положением в Периодической системе Д. И. Менделеева. Общеприняты классификации В. И. Вернадского и В. М. Гольдшмидта.

Классификация В. И. Вернадского основана на различной способности химических элементов участвовать в природных физических и хи-

мических процессах, в частности в циклических процессах в биосфере. В. И. Вернадский выделил следующие группы элементов (табл. 7): 1) группа благородных (инертных) газов, не участвующих в главных химических земных процессах и только в исключительных случаях дающих соединения с другими атомами; 2) группа благородных металлов (эти элементы почти не образуют соединений в земной коре, а их соединения, главным образом сплавы, образуются в термодинамических условиях, резко отличных от условий биосферы); 3) группа циклических, или органогенных, элементов, наибольшая по числу (для этих элементов характерны многочисленные химические обратимые процессы, каждый элемент дает характерные для определенной геосферы постоянно изменяющиеся соединения); 4) группа рассеянных элементов, среди которых преобладают свободные атомы, и небольшая часть циклических элементов (эти элементы отличаются отсутствием или редкостью химических соединений); 5) группа сильнорадиоактивных элементов (для них характерно неполное обращение в круговых процессах — часть их атомов теряется в результате радиоактивного распада); 6) группа элементов редких земель, выделяемая по признаку очень тесной взаимной связи, совместного поведения в чрезвычайно различных земных условиях [7].

Классификация В. М. Гольдшмидта основана на физико-химических принципах распределения элементов в различных типах природных соединений. Эталонным является распределение элементов в минеральной ассоциации метеоритов, представленной металлом, сульфидом железа, силикатами и оксидами (табл. 8).

Первую группу (сидерофильные элементы) составляют элементы, у которых свободная энергия образования оксидов и сульфидов меньше (по абсолютной величине) энергии образования закиси и сульфида железа. Эти элементы накапливаются в металлической фазе метеоритов и, вероятно, в предполагаемом железном ядре Земли.

Таблица 7

Геохимическая классификация элементов по В. И. Вернадскому

Номер и название группы	Элементы	Число элементов в группе	Относительное количество элементов в группе, %
I. Благородные газы	He, Ne, Ar, Kr, Xe	5	5,44
II. Благородные металлы	Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au	7	7,61
III. Циклические элементы	H, Be, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ge (?), As, Se, Sr, Zr (?), Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, Hf, W, Re, Hg, Tl, Pb, Bi	44	47,82
IV. Рассеянные элементы	Li, Sc, Ga, Br, Rb, Y, Nb, In, I, Cs, Ta	11	11,95
V. Элементы сильнорадиоактивные	Po, Rn, Ra, Ac, Th, Pa, U	7	7,61
VI. Элементы редких земель	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	15	16,30

Таблица 8

Геохимическая классификация элементов.

По В. М. Гольдшмидту [46] с дополнениями

Сидерофильные	Халькофильные		Литофильные	Атмофильные	Биофильные
	в метеоритах	в земной коре			
Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, (Cu), Au, Re, (Mo), (W), N, P, (As), C, Ge, Sn, (Ga), (Hg)	Fe, S, Se, Te, (P), As, Sb, Bi, Zn, Cd, Cu, Ag, (Mn), (Cr), (V), (Ti), (Ca), (Mg), (Na), (K)	Fe, S, Se, Te, As, Sb, Bi, (Ge), (Sn), Pb, Ga, In, Tl, Zn, Cd, Hg, Cu, Ag, (Mn), Mo	Fe, O, (P), (C), (H), F, Cl, Br, J, Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, Al, Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th, U, Si, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, W, Mn, (Ga), (Sn)	H, C, H, O, Cl, Br, J, He, Ne, Ar, Kr, Xe	C, H, O, N, P, S, Cl, Br, J, B, Na, K, Mg, Ca, V, Mn, Fe, Co Cu, Zn, Mo и др.

Примечание. В скобках указаны элементы с промежуточными свойствами, для которых проявление сидерофильных, халькофильных или литофильных свойств является второстепенной, но геохимически важной чертой поведения.

Вторая группа (литофильные элементы) представлена элементами с более высокими, чем у железа, величинами свободной энергии образования оксидов (в расчете на грамм-атом кислорода). Эти элементы концентрируются в силикатной фазе метеоритов, мантии и коре Земли, образуя оксиды, кислородные соли и главным образом силикаты.

Третья группа (халькофильные элементы) образована элементами, концентрирующимися в сульфидной фазе метеоритов в присутствии избытка металлического железа. Несколько иное распределение элементов между сульфидами и силикатами наблюдается в условиях коры и мантии Земли в отсутствии избытка металлического железа. На этом основании выделяется две разных подгруппы халькофильных элементов, т. е. элементов, имеющих тенденцию концентрироваться в сульфидных рудах. Железо служит реперным элементом, по отношению к которому рассматривается распределение остальных элементов, и не относится ни к одной из этих групп (или относится ко всем трем группам).

В качестве четвертой группы (атмофильные элементы) выделяются элементы, которые в свободном состоянии или в форме летучих соединений концентрируются в газовой оболочке Земли.

В пятую группу (биофильные элементы) объединены элементы, которые концентрируются либо в живых организмах, либо в продуктах их жизнедеятельности [46].

Распределение элементов между этими группами определяется их химическими свойствами и тесно связано с положением в Периодической системе Д. И. Менделеева. Иллюстрацией служит положение элементов на кривой атомных объемов (рис. 1), которая отражает периодический

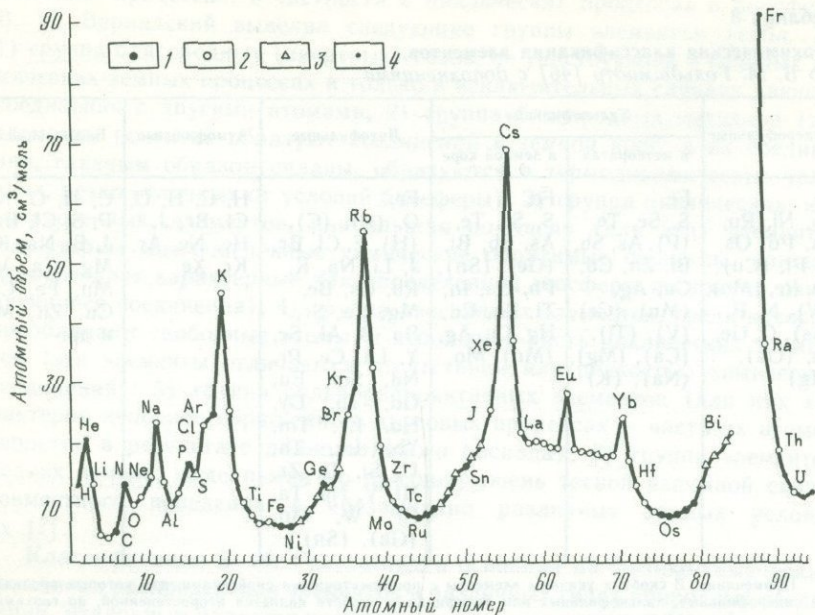


Рис. 1. График атомных объемов:

1—4 — элементы: 1 — сидерофильные, 2 — литофильные, 3 — халькофильные, 4 — остальные (Fe, атофильные и некоторые радиоактивные). Для At, Rn (между Bi и Fr) и Ac нет данных

характер изменения химической связи элементов в зависимости от их атомного номера: на минимумах этой кривой располагаются сидерофильные элементы, на нисходящих ветвях — литофильные, на восходящих — халькофильные; около максимумов находятся атофильные элементы; группу биофильных элементов, по А. П. Виноградову, составляют элементы, образующие в условиях биосферы подвижные газообразные или воднорастворимые соединения, легко поглощаемые растениями в процессах метаболизма.

В геохимии используются и другие классификации, обычно отражающие определенные свойства элементов, проявляющиеся в тех или иных процессах. Например, говорят о главных, второстепенных и редких элементах, подчеркивая различную их распространенность в земной коре и, отчасти, «обычность» или «редкость» их минералов в природе. А. Н. Заварицкий выделил группы элементов горных пород, магматических эманаций, семейства железа, редких элементов и др. При характеристике поведения элементов в процессах магматического фракционирования говорят о когерентных (совместимых) и некогерентных (несовместимых) элементах, которые захватываются (когерентные элементы) структурами главных породообразующих минералов и рассеиваются в ходе магматической эволюции и лишь в малых количествах допускаются (некогерентные элементы) в структуры минералов и накапливаются в остаточных магмах. При характеристике поведения элементов в водных системах выделяют, например, таласофильные (гидрофильные) элементы, образующие подвижные, воднорастворимые соединения.

По уровню содержаний элементов в природных образованиях их принято условно разделять на макроэлементы ($> 0,1\%$) и микроэлементы ($\leq 0,1\%$).

В геологической практике широко применяется термин «рудные элементы», в составе которых выделяют «черные металлы» (Fe, Cr, Mn, Ti), «цветные металлы» (Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Al, Mg), редкие (Sn, W, Mo, Bi, Sb, Hg, Ta, Nb, Be и др.) и драгоценные (Ag, Au, Pt и платиноиды) металлы, редкие и рассеянные элементы (Cd, Jn, Re, Hf, Ga, Ge, Tl и др.), радиоактивные элементы (U, Ra, Th и их эманации). Иногда выделяют группу тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Hg); термин «редкие щелочи» объединяет Li, Rb и Cs. Все эти классификации имеют частный и не строгий характер, однако применяются в практике геохимических поисков.

1.5. СРЕДНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Основные закономерности распределения элементов в магматических породах установлены в классических работах У. Кларка, В. Гольдшмидта, В. И. Вернадского, А. Е. Ферсмана. В дальнейшем происходило уточнение и дополнение данных, обусловленное расширением объектов исследования (дно океана, верхняя мантия, внеземные объекты) и появлением новых, более чувствительных и точных, преимущественно физических методов анализа. Современные сводки данных о средних содержаниях химических элементов в главнейших типах магматических пород составили А. П. Виноградов (1962), К. Турекьян и К. Ведеполь (1961) и С. Тэйлор (1964). Позднее была опубликована сводка геохимических данных под редакцией К. Ведеполя (1969—1974). Геохимические особенности магматической породы существенно зависят от ее формационной принадлежности. Это осложняет не только саму проблему достоверной оценки средних содержаний элементов в главных типах пород, но и делает геологически неоднозначной интерпретацию таких цифр. Проблема оценки средних содержаний элементов в магматических породах в зависимости от их формационной и региональной принадлежности не решена в современной геохимии. Исключение составляют базальты океанической коры, достаточно хорошо изученные и отличающиеся от континентальных базальтов.

В табл. 9 приведены средние химические составы главных типов магматических пород, полученные на основании усреднения большого (десятки тысяч) числа индивидуальных анализов. В качестве основы оценки содержаний второстепенных элементов здесь преимущественно использованы данные А. П. Виноградова (1962), С. Тэйлора (1972) с изменениями, учитывающими новые материалы К. Ведеполя (табл. 10).

Для платиноидов и некоторых других элементов достоверные оценки средних содержаний отсутствуют, для многих микроэлементов данных недостаточно.

Сводок данных о средних содержаниях элементов в метаморфических породах в литературе нет; в табл. 11 приведены данные о содержаниях химических элементов в самом распространенном типе метаморфических пород — кристаллических сланцах и парагнейсах.

Таблица 9

Средние химические составы (масс. доля в %) главных типов магматических пород

Компонент	Ультраосновные (перидотиты)	Основные		Средние			Кислые	
		базальты континентов	базальты океанов	андезиты	диориты	дациты	риолиты	граниты и гранодиориты
SiO ₂	44,10	50,75	50,65	59,84	57,08	66,62	74,13	70,19
TiO ₂	0,03	1,82	1,41	0,79	1,79	0,59	0,27	0,42
Al ₂ O ₃	0,95	15,35	15,15	17,24	16,95	16,08	13,70	14,77
FeO	8,49	11,28	10,47	6,49	7,64	4,35	2,13	3,36
MnO	0,13	0,19	0,18	0,15	0,15	0,10	0,06	0,07
MgO	45,37	6,77	7,60	3,25	4,42	1,67	0,40	1,10
CaO	0,80	9,55	11,83	6,56	7,16	4,02	1,23	2,29
Na ₂ O	0,09	2,67	2,43	3,61	3,43	3,87	3,49	3,71
K ₂ O	0,03	0,93	0,19	1,83	1,73	2,82	4,51	3,89
P ₂ O ₅	0,01	0,29	0,14	0,24	0,41	0,17	0,08	0,20

Примечания. Все Fe пересчитано на FeO; составы пересчитаны на 100,00%.

Источники данных: ультраосновные породы — средний состав перидотитов офиолитовых комплексов; базальты континентов — усредненные данные Р. Дэли (1936), В. Мэнсона (Manson, 1967), Р. Лемэтра (*Le Maitre*, 1976) с дополнениями по А. Б. Ронову и др. (1984); базальты океанов — по А. А. Ярошевскому и Г. И. Цехони (1986); андезиты — усредненные данные Р. Дэли, С. Тэйлора (1972), Р. Лемэтра, Б. Г. Лутца (1980), А. А. Беуса (1981) с дополнениями по А. Б. Ронову и А. А. Ярошевскому (1976); диориты — по данным А. А. Беуса; дациты — усредненные данные Р. Дэли, Р. Лемэтра, А. Эварта (1983), Б. Г. Лутца и А. А. Беуса; риолиты — усредненные данные Р. Дэли, С. Нокколдс (*Nockolds*, 1954), Р. Лемэтра, А. А. Беуса, А. Эварта с дополнениями по А. Б. Ронову и А. А. Ярошевскому; граниты и гранодиориты — усредненные данные Р. Дэли, А. А. Беуса с дополнениями по А. Б. Ронову и А. А. Ярошевскому.

Таблица 10

Средние содержания (в г/т) химических элементов в главных типах магматических пород

Атомный номер	Элемент	Ультраосновные	Основные		Средние	Кислые
			базальты континентов	базальты океанов		
1	H	—	—	—	—	—
2	He	—	—	—	—	—
3	Li	2	10	10	10	35
4	Be	0,4	0,5	0,5	1,5	5
5	B	5	5	—	20	15
6	C	100	100	—	200	300
7	N	10	20	—	20	20
8	O	439 000	440 000	441 000	462 000	480 000
9	F	100	400	—	500	800
10	Ne	—	—	—	—	—
11	Na	2200	19 800	18 000	26 800	27 500
12	Mg	273 000	40 800	45 700	19 600	6630
13	Al	5000	81 200	79 800	91 200	78 100
14	Si	205 000	237 000	236 000	280 000	328 000
15	P	100	1270	620	1050	870
16	S	200	250	430	200	300
17	Cl	100	60	—	100	200
18	Ar	—	—	—	—	—
19	K	300	7730	1540	15 200	32 300
20	Ca	5690	71 000	84 400	46 900	16 400
21	Sc	15	35	40	30	6

Продолжение таблицы 10

Атом- ный номер	Элемент	Ультраоснов- ные	Основные		Средние	Кислые
			базальты континентов	базальты океанов		
22	Ti	500	10 900	8420	4700	2500
23	V	50	275	300	150	35
24	Cr	3 000	250	260	60	25
25	Mn	1000	1440	1430	1160	540
26	Fe	65 600	87 700	80 800	50 400	26 100
27	Co	100	48	60	24	10
28	Ni	2000	145	110	25	15
29	Cu	40	100	80	55	20
30	Zn	50	110	80	72	60
31	Ga	2	18	20	18	20
32	Ge	1	1,5	1,5	1,5	1,5
33	As	1	2	—	2	1,5
34	Se	0,02	0,05	0,16	0,05	0,05
35	Br	0,12	3	0,2	4,5	1,5
36	Kr	—	—	—	—	—
37	Rb	1	17	3,5	40	150
38	Sr	20	300	120	400	290
39	Y	2,9	23	32	21	31
40	Zr	5	120	90	110	200
41	Nb	1	8	7	11	20
42	Mo	0,2	1	1	1,1	1
44	Ru	0,15	—	0,001	—	—
45	Rh	0,03	—	0,0002	—	—
46	Pd	0,09	0,02	—	—	—
47	Ag	0,05	0,1	0,03	0,1	0,05
48	Cd	0,06	0,2	0,13	2	0,2
49	In	0,02	0,1	0,02	0,2	0,1
50	Sn	0,5	1,5	1,4	1,2	3
51	Sb	0,1	0,2	0,02	0,2	0,2
52	Te	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001
53	J	0,1	0,5	—	0,3	0,5
54	Xe	—	—	—	—	—
55	Cs	0,01	1	0,05	1,7	5
56	Ba	20	240	40	350	750
57	La	0,92	12	4,5	19	45
58	Ce	1,9	27	13	38	90
59	Pr	0,32	3,4	1,5	43	9,8
60	Nd	1,4	14	10	16	40
62	Sm	0,40	3,8	3,4	3,7	7,6
63	Eu	0,16	1,15	1,21	1,1	1,3
64	Gd	0,74	4,5	3,8	3,6	6,2
65	Tb	0,12	0,71	0,77	0,64	1,1
66	Dy	0,57	4,2	5,2	3,7	5,9
67	Ho	0,16	0,93	1,1	0,82	1,3
68	Er	0,40	2,6	3,2	2,3	3,4
69	Tm	0,067	0,41	0,55	0,32	0,52
70	Yb	0,38	2,3	3,0	2,2	3,3
71	Lu	0,055	0,34	0,45	0,30	0,49
72	Hf	0,6	3	2,4	3	5
73	Ta	0,02	0,5	0,3	0,7	3,5
74	W	0,3	0,7	0,5	1	1,5
75	Re	0,2	0,0007	0,0009	—	—
77	Ir	0,01	—	0,00002	—	—
78	Pt	0,02	0,02	0,0023	—	—

Продолжение таблицы 10

Атомный номер	Элемент	Ультраосновные	Основные		Средние	Кислые
			базальты континентов	базальты океанов		
79	Au	0,007	0,004	0,00023	0,003	0,004
80	Hg	0,03	0,08	0,02	—	0,08
81	Tl	0,01	0,1	0,01	0,3	1
82	Pb	0,2	8	0,8	10	20
83	Bi	0,005	0,05	0,007	0,07	0,4
90	Th	0,07	2,7	0,22	4,8	17
92	U	0,025	1,0	0,10	1,25	3,4

Примечания. Источники данных: ультраосновные породы — по А. П. Виноградову (1962) и К. Велеполю (1975); базальты континентов — по А. П. Виноградову и С. Тэйлору (1964) с дополнениями по К. Велеполю и А. Б. Ронову (1988); базальты океанов — по данным А. А. Ярошевского и Т. И. Цехони (1986) с дополнениями по К. Велеполю (1981); средние породы — по С. Тэйлору (1972), К. Велеполю (1975) и С. Тэйлору и С. Макленнану (1985); кислые породы (граниты и гранодиориты) — по А. П. Виноградову и С. Тэйлору (1964) с дополнениями по А. Б. Ронову; данные по Bi — по З. Ф. Миллеру и В. П. Прокопчук (1987).

Таблица 11

Средние содержания (в г/т) некоторых химических элементов в кристаллических сланцах и парагнейсах.

По данным А. Б. Ронова и А. А. Ярошевского (1976) и А. Б. Ронова и др. (1989)

Атомный номер	Элемент	Среднее содержание	Атомный номер	Элемент	Среднее содержание
1	H	2450	38	Sr	160
6	C	2360	39	Y	27
8	O	480 000	40	Zr	210
9	F	700	41	Nb	14
11	Na	15100	56	Ba	670
12	Mg	19600	57	La	30
13	Al	90100	58	Ce	65
14	Si	286000	59	Pr	7,6
15	P	790	60	Nd	27
16	S	1020	62	Sm	5,5
17	Cl	200	63	Eu	1,35
19	K	22800	64	Gd	4,9
20	Ca	21200	65	Tb	0,84
21	Sc	19	66	Dy	4,5
22	Ti	3720	67	Ho	0,99
23	V	150	68	Er	2,7
24	Cr	162	69	Tm	0,41
25	Mn	930	70	Yb	2,3
26	Fe	51 900	71	Lu	0,39
27	Co	24	72	Hf	6,1
28	Ni	70	82	Pb	17
29	Cu	43	90	Th	12,5
30	Zn	100	92	U	2,5
37	Rb	130			

В табл. 12 приведен средний химический состав главнейших типов пород осадочной оболочки континентов. Основой расчета послужили анализы сложносмешанных проб, составленных из десятков тысяч образцов осадочных пород Русской платформы, с учетом доступного лите-

Таблица 12

Средние химические составы (масс доля в %) главных типов осадочных пород континентальной земной коры.

По данным А. Б. Ронова, А. А. Ярошевского и А. А. Мигдисова (1989)

Компонент	Пески и песчаники	Глины и глинистые сланцы	Карбонаты	Соли, гипсы и ангидриты	Кремнистые породы
SiO ₂	67,62	57,85	13,73	0,38	82,25
TiO ₂	0,59	0,84	0,13	—	0,29
Al ₂ O ₃	11,32	16,83	2,25	0,07	4,71
Fe ₂ O ₃	2,02	3,10	0,85	0,03	2,53
FeO	2,33	3,30	0,72	0,01	1,85
MnO	0,08	0,13	0,09	—	0,29
MgO	1,86	2,75	5,73	0,40	0,94
CaO	3,98	3,09	38,55	9,96	1,42
Na ₂ O	1,87	1,37	0,30	38,79	0,44
K ₂ O	2,12	3,30	0,55	0,26	1,10
P ₂ O ₅	0,14	0,18	0,11	—	0,15
C _{орг.}	0,28	0,80	0,36	—	0,48
CO ₂	2,40	2,23	34,73	0,65	1,47
SO ₃	0,03	0,03	0,31	13,42	0,13
S _{нпр.}	0,18	0,35	0,12	—	0,14
Cl	0,06	0,08	0,05	44,43	—
F	0,03	0,06	0,03	0,02	—
H ₂ O	3,21	3,93	2,46	1,61	1,88
-O=S+Cl ₂ + +F ₂	0,12	0,22	0,09	10,03	0,07

Примечания. Все составы пересчитаны на 100,00%. Средние составы пород рассчитаны как средневзвешенные (с учетом объемных соотношений) для соответствующих пород платформ, геосинклиналей и орогенных зон континентов.

ратурного материала. В табл. 13 представлены оценки содержаний элементов в некоторых типах осадочных пород.

Таблица 13

Средние содержания химических элементов (в г/т) в глинах и глинистых сланцах континентов.

По данным А. Б. Ронова, А. А. Ярошевского и А. А. Мигдисова (1989) с дополнениями по данным А. П. Виноградова (1962) и С. Тэйлора и С. Макленнана (1985)

Атомный номер	Элемент	Среднее содержание	Атомный номер	Элемент	Среднее содержание	Атомный номер	Элемент	Среднее содержание
1	H	5080	29	Cu	60	58	Ce	66
2	He	—	30	Zn	90	59	Pr	8
3	Li	60	31	Ga	30	60	Nd	31
4	Be	3	32	Ge	2	62	Sm	6,6
5	B	100	33	As	6,6	63	Eu	1,41
6	C	19 000	34	Se	0,6	64	Gd	5,6
7	N	600	35	Br	6	65	Tb	1
8	O	491 000	36	Kr	—	66	Dy	4,6
9	F	600	37	Rb	150	67	Ho	1,2
10	Ne	—	38	Sr	220	68	Er	3,2
11	Na	7860	39	Y	29	69	Tm	0,51
12	Mg	15 400	40	Zr	190	70	Yb	2,7

Атомный номер	Элемент	Среднее содержание	Атомный номер	Элемент	Среднее содержание	Атомный номер	Элемент	Среднее содержание
13	Al	86 600	41	Nb	19	71	Lu	0,5
14	Si	261 000	42	Mo	1	72	Hf	6,5
15	P	610	44	Ru	—	73	Ta	3
16	S	4200	45	Rh	—	74	W	2,7
17	Cl	800	46	Pd	—			
18	Ar	—	47	Ag	0,1	75	Re	—
19	K	25 100	48	Cd	0,3	76	Os	—
20	Ca	29 400	49	In	0,05	77	Ir	—
21	Sc	18	50	Sn	4	78	Pt	—
22	Ti	4680	51	Sb	2	79	Au	0,001
23	V	120	52	Te	0,01	80	Hg	40
24	Cr	110	53	J	1	81	Tl	1
25	Mn	700	54	Xe	—	82	Pb	20
26	Fe	46 600	55	Cs	15	83	Bi	0,25
27	Co	20	56	Ba	640	90	Th	11,8
28	Ni	60	57	La	33	92	U	2,7

1.6. ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИРОДЕ

Следуя за Н. И. Сафроновым [33], все многообразие видов и форм существования химических элементов в природе целесообразно рассматривать с двух позиций — качественной и количественной характеристик поведения элементов, выделяя соответственно минеральную и безминеральную форму, концентрированное и рассеянное состояние.

Минеральная форма. В земной коре установлено около 4 000 минеральных форм, что значительно меньше теоретически возможных. Причина этого — низкие кларки многих элементов. Между числом собственных минеральных видов N и кларком элемента C_k существует корреляционная связь: $N = 200 \sqrt[4]{C_k} \cdot 2^{\pm 1}$. Элементы, образующие большее количество минеральных видов, нежели это следует из данной формулы, могут быть названы *минералофильными*, меньше — *минералофобными* (табл. 14). Минералофобность элементов объясняется главным образом явлением изоморфизма: элементы с низкими кларками «захватываются» собственными минералами элементов с более высокими кларками ($Rb \rightarrow K$; $TR \rightarrow Ca$; $Cr \rightarrow Fe$, Mg ; $Ga \rightarrow Al$ и др.). Почти все минералофильные элементы относятся к группе халькофильных, а минералофобные — к группе литофильных, как и подавляющее число элементов породообразующих минералов.

Весьма существенна роль микроминеральных форм нахождения элементов в природе, причем формирование микроминералов может идти как одновременно с кристаллизацией макроминералов, так и позднее при распаде твердых растворов, а также в процессе «самоочищения» макроминералов от примесей микроэлементов. В конкретной физико-химической и термодинамической обстановке формируются минералы оптимальных для данной среды размеров, причем с течением времени возможно укрупнение минералов за счет растворения более мелких зерен.

Таблица 14

Способность элементов к минералообразованию

Классификация Г. М. Гольдшмидта	Элементы		
	минералофильные	нормального минерало- образования	минералофобные
Литофильные	B, U	Li, Be, O, F, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, V, Mn, Nb, Ba, Ta, W, Fe	Sc, Ti, Cr, Br, Rb, Sr, Y, Zr, J, Cs, La, TR, Hf, Th
Халькофильные	S, Cu, As, Ag, Sb, Te, Se, Pb, Bi	Zn, Cd, Pd, Sn, Hg	Ga, Ge, Jn, Tl
Сидерофильные	Pt, Au	C, P, Fe, Co, Ni, Mo, Ru, Rh, Os, Jr	Re

Безминеральная форма. Наиболее характерны следующие безминеральные формы нахождения элементов в природе (для большинства элементов гидросферы, атмосферы и биосферы — господствующие): природные истинные и коллоидные растворы, газовые смеси, органическое вещество, изоморфные примеси; структурные и неструктурные включения в минералах; скопление в межминеральных полостях; скрытокристаллические (аморфные) соединения; квазигазообразное состояние (по В. И. Вернадскому); сорбированное состояние в минеральном поглощающем комплексе; растворы во внутрикристаллических, пленочных и гравитационных водах; пары и газы в порах и трещинах; хелаты (металлоорганические соединения). Провести четкую границу между безминеральной и микрокристаллической формой практически невозможно. С практической позиции удобно все безминеральные формы нахождения элементов в литосфере объединить в два подвида: *подвижные* и *прочносвязанные* по признаку извлекаемости элементов-примесей из механически измельченных пород и руд простым выщелачиванием, не разрушающим кристаллическую решетку минералов, хотя такое деление в значительной мере условно.

В обобщенном виде соотношение минеральной и безминеральной форм существования элементов в литосфере приведено в табл. 15. Относительная роль минеральной формы падает с уменьшением кларка элементов с некоторым отклонением в сторону завышения для минералофильных (Cu Ag Pb U и др.) и занижения для минералофобных элементов (Se, Ga, Re, TR и др.).

В рудах для главных рудных элементов характерна минеральная форма существования. Для элементов-примесей с уменьшением их содержаний в рудах сначала возрастает роль микроминеральных, а затем безминеральных форм. В первичных ореолах наблюдается аналогичная картина — с удалением от рудных тел минеральные формы нахождения сменяются микроминеральными, а затем безминеральными.

В гипергенных литохимических аномалиях роль безминеральных форм рудных элементов возрастает, особенно во вторичных аккумуляциях

Таблица 15

Минеральная и безминеральная формы нахождения элементов в литосфере, %

Группа	Число элементов	Элементы	Минеральный вид		Безминеральный вид	
			Макро-формы	Микро-формы	Прочно-связанные формы	Подвижные формы
I	8	O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg	95 ÷ 98	$n \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 1$	$N \cdot 10^{-1}$
II	6	Ti, P, Ba, Sr, Zn, Cr	$n \cdot 10$	$n \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 5$	$n \cdot 1$
III	6	H, F, S, C, Cl, B	$n \cdot 1$	$n \cdot 1$	$n \cdot 10$	$n \cdot 10$
IV	12	Li, Be, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sn, Pb, U	$n \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10$	$n \cdot 5$	$n \cdot 5$
V	13	Ce, Nb, Mo, Ag, Sb, Se, Ta, W, Au, Hg, Bi, Pt, Te	$n \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 5$	$n \cdot 10$	$n \cdot 5$
VI	18	Su, Ga, Ge, Br, Ru, Rh, Pd, Cd, In, Tl, Cs, I, La, Y, Re, Os, Ir, Th	$n \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10$	$n \cdot 5$
VII	13	Rb, TR, Hf	0	$n \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10$	$n \cdot 5$

ях на восстановительном, кислотно-щелочном и сорбционном барьерах, в солевых наложенных ореолах и потоках рассеяния.

Закономерности миграции химических элементов в земной коре находят отражение в минеральных видах и формах их нахождения в нормальном геохимическом поле и его локальных первичных и вторичных геохимических аномалиях. Поэтому с усложнением задач поисков все чаще прибегают к изучению форм нахождения рудных элементов в геохимическом поле, к избирательному анализу или к выявлению комплексных полиэлементных геохимических аномалий, оптимальное проявление которых наблюдается в различных формах нахождения основных элементов-индикаторов месторождений.

Неравномерность содержаний химических элементов — характерное свойство всех геологических образований. При заданной системе опробования можно изучать это свойство на разных уровнях, начиная от минералов и кончая Землей в целом. В любом случае можно наблюдать на отдельных участках относительно равномерное распределение элементов. По сути дела в основу деления земной коры на оболочки, структурно-формационные блоки, горные породы и минералы положен критерий однородности их состава. Среднее содержание в определенном типе геологического образования с учетом присущих ему флуктуаций является количественной характеристикой существования химического элемента. Для любых химических элементов эти содержания в природных образованиях могут изменяться от весьма малых до очень высоких; запрещенными, согласно закону Вернадского, являются только содержания равные нулю и 100%.

Исходными данными при оценке средних содержаний служат содержания элементов в конкретных геологических *пробах*, которые в общем случае зависят от их размера (объема, массы). Этот признак имеет второстепенное значение при опробовании объектов гидросферы и атмосферы, характеризующихся локальной однородностью. В отличие от этого, опробование полнокристаллических, крупнозернистых и обломочных горных пород или объектов биосферы в зависимости от выбранного размера проб способно приводить к существенно различным результатам. При размерах проб, соизмеримых с размерами минеральных зерен, содержание в них химического элемента может соответствовать мономинеральному составу одного из компонентов кристаллической породы и резко отличаться от содержаний в соседней пробе того же размера. В большинстве случаев уменьшение размера проб при опробовании одного типа горных пород (и одного вида организмов) обеспечивает несмещенную (т. е. достоверную) оценку среднего содержания, увеличивая только дисперсию данных и доверительный интервал оценки. Независимо от этого, при обсуждении вопросов поисковой геохимии, если это специально не оговорено, всегда имеются в виду макроразмеры проб.

Обширные эмпирические данные показывают, что при массовом опробовании геохимическое поле характеризуется преобладанием относительно низких и сравнительно постоянных содержаний химических элементов, определяемых их кларками, и только в редких случаях существенно превышает этот уровень. Для многих хозяйственно важных элементов эти фоновые содержания составляют только 10^{-4} ... $10^{-6}\%$, что делает их извлечение экономически нецелесообразным. Это в равной мере относится к макроэлементам и любым видам минерального сырья, для добычи которых современная промышленность преимущественно ориентируется на их природные скопления (месторождения), по содержаниям ценных компонентов многократно превышающих средний уровень. Соответственно в практических целях принято различать рассеянное и концентрированное состояние элементов в литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере.

Рассеянное состояние характеризуется повсеместными содержаниями химических элементов, близкими к их кларкам для соответствующих геосфер, и в современную эпоху признается недостаточным для промышленного извлечения большинства элементов. Концентрированное состояние отвечает повышенным содержаниям элементов, близким к требованиям промышленности для соответствующих полезных ископаемых. Концентрированное и рассеянное состояние элементов связаны непрерывными переходами и объективных границ между ними не существует. Для количественной характеристики этих состояний служит кларк концентрации — отношение содержания элемента в конкретном объекте к его кларку: $K_k = C_x / C_k$. Величина K_k может быть больше и меньше 1, указывая в последнем случае на децентрацию (вынос) элемента.

Концентрированное состояние характеризуется двумя показателями: степенью концентрации (содержаниями) и массой (запасами) элементов в объекте. Наибольший интерес, естественно, представляют макро-

Таблица 16

Кларки концентраций элементов в полезных ископаемых

K_k	Химические элементы	Число элементов
$n \cdot 1$	Si, Al, Sc, K, Ti, Fe, Ca	7
$n \cdot 10$	Zr, Mg, Na, Hf, Tl, P, Y, Rb, Li, Br	10
$n \cdot 10^2$	Nb, C, Co, Ba, La, TR, V, Se, Ta, Th, Sr, Mn, Ni, U, Cu, F, S, Zn, H	31
$n \cdot 10^3$	In, B, Sn, Cr, Au, Cs, Cl, Mo, Pb, Pt, Ge, Be, W, Te, He	15
$n \cdot 10^4$	Ac, Cd, As, Sb, Hg, Bi	6

объекты, к которым относятся месторождения полезных ископаемых. Степень концентрации элементов в месторождениях полезных ископаемых охарактеризована в табл. 16 ориентировочными величинами K_k на 1985 г. Для большинства элементов, образующих месторождения твердых полезных ископаемых, значения K_k рассчитаны как отношение средних содержаний элемента в добываемых рудах к его кларку в литосфере. Дополнительно в таблицу включены Вг, добываемый из рассолов, и He, для которых K_k рассчитаны соответственно по отношению к кларкам гидросферы и атмосферы. Значения K_k для H приведены для нефти по отношению к его кларку в литосфере.

1.7. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАССЕЯННЫМ И КОНЦЕНТРИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

На основе эмпирических данных и соответствующих расчетов многих авторов [20] преобладающим для всех химических элементов является рассеянное состояние.

В основу этого вывода положены подсчеты геохимических количеств главных рудных элементов в континентальной коре до глубины 1 км в сопоставлении с их мировыми запасами в промышленных месторождениях, многократно увеличенных за счет неполноты их выявления. Так, по подсчетам Н. И. Сафронова [33] эти соотношения характеризуются цифрами, приведенными в табл. 17, в которой учтенные запасы в месторождениях для разных металлов увеличены от 40 до 250 раз. Средняя арифметическая степень концентрации по данным табл. 17 для 11 химических элементов составила 0,0533%, т. е. совершенно ничтожную величину. Данные других авторов подтверждают этот вывод.

Между кларками элементов в земной коре и промышленными запасами этих элементов в месторождениях одного класса крупности, как известно, существует тесная корреляция (рис. 2). Аналогичная зависимость устанавливается между кларками рудных элементов в земной коре и глобальными запасами этих элементов в известных на земном шаре месторождениях. С учетом ожидаемого в будущем прироста промышленных запасов металлов за счет снижения кондиций и новых открытий эта зависимость характеризуется уравнением регрессии [21], на основе которого можно принять $Q_{\Sigma\Sigma} = 5 \cdot 10^{12} C_k$ т/км. Здесь $Q_{\Sigma\Sigma}$ — глобальные запасы в земной коре любого элемента в состоянии концент-

Таблица 17

Геохимические запасы важнейших металлов в континентальной коре до глубины 1 км [33]

Металл	В рассеянном состоянии, т	В месторождениях, т	Доля запасов в месторождениях, %
Железо	$2,1 \cdot 10^{16}$	$4,3 \cdot 10^{12}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
Медь	$4,2 \cdot 10^{13}$	$1,82 \cdot 10^{10}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Свинец	$6,7 \cdot 10^{12}$	$1,02 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Цинк	$2,1 \cdot 10^{13}$	$1,16 \cdot 10^{10}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$
Никель	$3,3 \cdot 10^{13}$	$6,0 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Кобальт	$1,2 \cdot 10^{13}$	$5,25 \cdot 10^7$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
Олово	$1,7 \cdot 10^{13}$	$5,0 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Вольфрам	$4,2 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Молибден	$1,2 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^8$	$8,0 \cdot 10^{-3}$
Ртуть	$2,9 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^{-1}$
Золото	$2,1 \cdot 10^9$	$3,15 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^{-1}$

Примечание. Кларки приняты по А. П. Виноградову (1959), плотность пород 2,79 т/м³.

рации (т. е. в месторождениях) до глубины 1 км. Принимая величину геохимических запасов элементов в пределах суши до той же глубины согласно расчету $149 \cdot 10^6 \text{ км}^2 \cdot 2,79 \cdot 10^9 \text{ т/км}^3 \cdot C_k = 4,16 \cdot 10^{17} C_k \text{ т/м}$, легко подсчитать среднюю степень их концентрации $(5 \cdot 10^{12} C_k / 4,16 \cdot 10^{17} C_k) 100\% = 0,12\%$. Эта цифра подтверждает порядок средней величины этого показателя, полученной Н. И. Сафроновым, — 0,0533%.

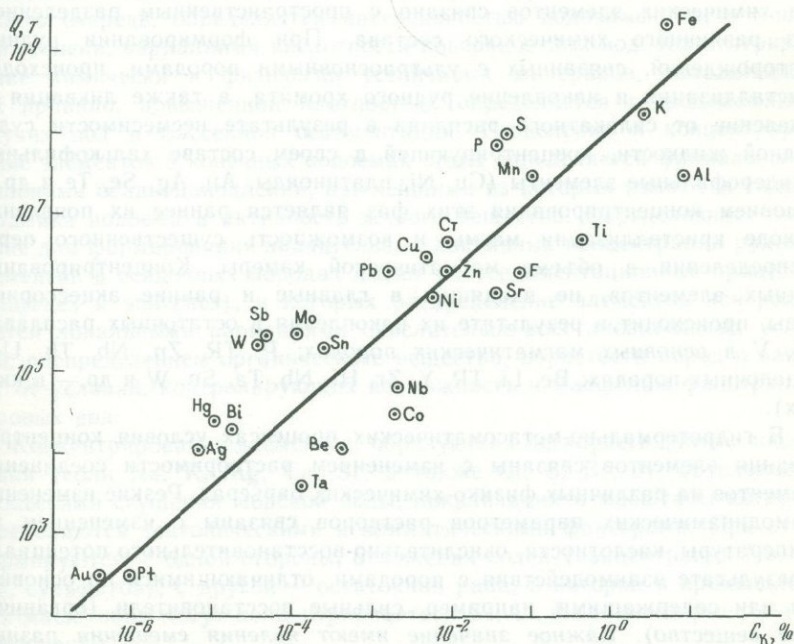


Рис. 2. Корреляционная зависимость между кларками земной коры и запасами элементов в месторождениях одинаковой крупности

Преобладание рассеянного состояния элементов над концентрированным непосредственно следует из первоначальной гомогенности протопланетного пылевого облака. Переход химических элементов в концентрированное состояние требует затрат внешней энергии и сочетания благоприятных для этого геологических условий, которые наступают относительно редко. В то же время переход элементов из концентрированного в рассеянное состояние протекает непрерывно и самопроизвольно.

Н. И. Сафронов на основе законов термодинамики установил зависимость, определяющую оценку энергетических затрат на рудообразование:

$$E = K_k \ln K_k,$$

где E — энергия в джоулях и K_k — кларк концентрации данного химического элемента в руде относительно его кларка в гранитах [33].

1.8. ФАКТОРЫ И УСЛОВИЯ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Все геологические процессы ведут к разделению химических элементов, рассеянию одних и концентрированию других, в том числе с образованием залежей полезных ископаемых. Факторы и механизмы концентрирования в различных процессах весьма разнообразны.

В магматических процессах наиболее существенное перераспределение химических элементов связано с пространственным разделением фаз различного химического состава. При формировании рудных месторождений, связанных с ультраосновными породами, происходит кристаллизация и накопление рудного хромита, а также ликвация — отделение от силикатного расплава в результате несмесимости сульфидной жидкости, концентрирующей в своем составе халькофильные и сидерофильные элементы (Cu, Ni, платиноиды, Au, Ag, Se, Te и др.). Условием концентрирования этих фаз является раннее их появление в ходе кристаллизации магмы и возможность существенного перераспределения в объеме магматической камеры. Концентрирование рудных элементов, не входящих в главные и ранние акцессорные фазы, происходит в результате их накопления в остаточных расплавах (Ti, V в основных магматических породах; P, TR, Zn, Nb, Th, U — в щелочных породах; Be, Li, TR, Y, Zr, Hf, Nb, Ta, Sn, W и др. — в кислых).

В гидротермально-метасоматических процессах условия концентрирования элементов связаны с изменением растворимости соединений элементов на различных физико-химических барьерах. Резкие изменения термодинамических параметров растворов связаны с изменением их температуры, кислотности, окислительно-восстановительного потенциала в результате взаимодействия с породами, отличающимися по основности или содержащими, например, сильные восстановители (органическое вещество). Важное значение имеют явления смешения разных растворов, явления автосмещения различных порций одного и того же раствора, претерпевших различное по масштабам взаимодействие

с породами, изменение давления и температуры при адиабатическом расширении или вскипании растворов, а также изменение динамики фильтрации растворов.

Масштабы возникающих концентраций рудных элементов определяются контрастностью геохимического барьера, объемом и составом фильтрующихся растворов. Закономерные ассоциации химических элементов в таких концентрациях и зональность их распределения в пространстве зависят от конкретных форм переноса элементов и типа геохимического барьера. Огромное разнообразие геохимических типов рудных месторождений и их масштабов определяется пестротой и разнообразием геологических условий (типом вмещающих пород, характером их смены в пространстве, распределением пористости и зон повышенной проницаемости, составом гидротермального раствора, соотношением объемов раствора и взаимодействующих с ним пород) и многофакторностью процесса.

В условиях выветривания и осадочной дифференциации концентрации элементов обусловлено их разделением в зависимости от растворимости (подвижности) в водных растворах, механической дифференциации взвешенных твердых фаз, процессами осаждения и соосаждения из водных растворов. Наименее растворимые в водных растворах соединения и ничтожно растворимые продукты гидролиза силикатов и алюмосиликатов концентрируются в остаточных корах выветривания. Масштабы накопления элементов здесь зависят от интенсивности выщелачивания и выноса растворимых соединений, что, в свою очередь, определяется интенсивностью водообмена и, в меньшей степени, вариациями кислотности поверхностных вод. Концентрирование химически и физически устойчивых минералов, обладающих, как правило, повышенной плотностью, определяется гидродинамикой текучих вод и бассейнов седиментации. Разделение и концентрирование элементов в конечных водоемах стока определяется фаціальными условиями осадконакопления, важнейшими из которых являются гидродинамика водоема и активность живого вещества. Определяющее значение для формирования значительных локальных концентраций рудных элементов в осадочных породах имеют постседиментационные процессы (диагенез и эпигенез), в которых распределение элементов контролируется локальными вариациями окислительно-восстановительных условий, распределением органического вещества, пористости пород и зависят от условий, контролирующих возможность и масштабы фильтрации поровых вод.

Концентрирование элементов, образующих легкорастворимые соединения (соли Na, K, Mg, Ca, Sr, а также Cl, S, Br, J), обусловлено процессами сгущения морской воды, локализация и масштабы которых определяются тектоническими и климатическими факторами. При этом формируются, с одной стороны, отложения солей (концентрации Na, K, Mg, сульфатов), с другой — остаточная рапа, в которой в промышленных масштабах могут концентрироваться Sr, Li, Br и некоторые другие компоненты.

1.9. КАТЕГОРИИ ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАПАСОВ

При организации поисковых работ геологическая задача должна формулироваться в сырьевых терминах, а результаты работ выражаться цифрами прогнозных ресурсов минерального сырья заданного качества в объектах определенной крупности. Прогнозные ресурсы твердых полезных ископаемых в зависимости от стадии работ делятся на три категории (в порядке увеличения достоверности): P_3 — P_2 — P_1 . Запасы минерального сырья по степени изученности месторождений подразделяются на предварительно оцененные (категория C_2) и разведанные (C_1 , В, А) [21]. Согласно Постановлению Совета Министров СССР от 30.11.81 г. № 1128 прогнозные ресурсы категории P_3 учитывают возможность формирования и промышленной локализации месторождений того или иного вида полезных ископаемых на основании благоприятных стратиграфических, литологических, тектонических и палеогеографических предпосылок, выявленных при производстве в оцениваемом районе средне- и мелкомасштабной геологических съемок, дешифровке космических снимков, а также при анализе результатов геофизических и геохимических исследований. Количественная оценка ресурсов этой категории производится по предположительным параметрам на основе аналогии с более изученными районами, площадями, бассейнами, где имеются разведанные месторождения того же генетического типа.

Прогнозные ресурсы категории P_2 учитывают возможность обнаружения в бассейне, районе, рудном узле, рудном поле новых месторождений полезных ископаемых, предполагаемое наличие которых основывается на положительной оценке выявленных при мелкомасштабной геологической съемке и поисковых работах проявлений полезного ископаемого, а также геофизических и геохимических аномалий, природа и возможная перспективность которых установлены единичными выработками. Количественная оценка ресурсов предполагаемых месторождений, представления о форме, размерах тел полезного ископаемого, его минеральном составе и качестве основываются на аналогиях с известными месторождениями того же формационного (генетического) типа.

Прогнозные ресурсы категории P_1 учитывают возможность прироста запасов за счет расширения площадей распространения тел полезного ископаемого за контуры подсчета запасов по категории C_2 или дополнительного выявления новых тел полезного ископаемого на разведанных, разведываемых, а также выявленных при поисково-оценочных работах месторождениях. Для количественной оценки ресурсов этой категории используются представления о промышленном типе месторождения [30].

Оценка ресурсов основывается на результатах геологических, геофизических и геохимических исследований площадей возможного распространения полезного ископаемого, а также на геологической экстраполяции имеющихся данных по более изученной части месторождения о форме и строении тел полезного ископаемого, его минеральном составе и качестве (концентрации полезных компонентов), струк-

турных особенностях, литологических и стратиграфических предпосылок, определяющих площади и глубины распространения полезного ископаемого, представляющего промышленный интерес.

1.10. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО КРУПНОСТИ

По размеру запасов месторождения обычно подразделяются на уникальные, крупные, средние и мелкие. В основу этого деления положена встречаемость месторождений в земной коре. Так, по В. И. Красникову, уникальные месторождения единичны, крупных месторождений известны десятки, и на их базе обычно создаются ведущие предприятия горно-рудной промышленности. По В. И. Смирнову [35], уникальные месторождения насчитываются десятками, крупные — сотнями, мелкие — тысячами.

Предлагаемые разными авторами таблицы группировки месторождений по крупности приводятся без достаточных обоснований величины запасов и их соотношений в соседних классах. Крупные, по К. Б. Ильину, месторождения лития, бериллия, тантала соответствуют мелким месторождениям этих элементов, по А. И. Гинзбургу, и т. д. Степень неопределенности группировки месторождений по запасам в различных классификациях превышает допустимые пределы.

Наиболее удачную десятичную классификацию рудных месторождений по масштабу запасов предложил В. И. Красников еще в 1959 г. Согласно этой классификации мелкими именуется минимально-промышленные месторождения любого сырья, запасы которых принимаются за единицу. Запасы месторождений каждого следующего класса крупности принимаются в среднем отличающимися на математический порядок. Обозначая запасы мелкого месторождения $n \cdot 10^m$ т, где в зависимости от вида сырья n принимается значение 1, 2, 3...9, а m имеет смысл любого целого положительного или отрицательного числа, имеем запасы среднего месторождения $n \cdot 10^{m+1}$ т, а крупного — $n \cdot 10^{m+2}$ т. Соответственно, условные средние «запасы» непромышленного рудопроявления (первого от мелких месторождений в сторону убывания крупности) составят $n \cdot 10^{m-1}$ т, а уникального месторождения — $n \cdot 10^{m+3}$ т. Десятичная классификация не является догмой, с тем же успехом ее можно построить на троечном, двоечном или восьмиричном принципе.

Создание современной теории поисков и разведки невозможно без введения количественной иерархии объектов, основанной на математической зависимости между классами. На конкретных примерах (табл. 18) легко убедиться, что десятичная классификация хорошо отражает существующие представления о соотношениях между запасами месторождений различной крупности. Приведенные цифры запасов являются средними для каждого из классов, границы которых определяются соотношениями $0,316 n \dots 3,16 n$. Шкала является подвижной и в зависимости от сырьевой конъюнктуры и местных условий значения n и m могут изменяться.

По кадастру рудных месторождений СССР с учетом десятичной классификации В. И. Красников подсчитал для 10 важнейших металлов

Таблица 18

Десятичная классификация месторождения по масштабу запасов.

По В. И. Красникову с поправками

Полезные ископаемые	Примерные запасы, т			Значения n
	мелкие	средние	крупные	
Железные руды	$n \cdot 10^7$	$n \cdot 10^8$	$n \cdot 10^9$	3—5
Бокситы, фосфориты	$n \cdot 10^6$	$n \cdot 10^7$	$n \cdot 10^8$	2—5
Марганцевые и хромитовые руды, плавиковый шпат	$n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^6$	$n \cdot 10^7$	1—5
Медь, свинец + цинк, никель (сульфидный) ниобий	$n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^6$	1—5
Сурьма, молибден, вольфрам (WO_3), олово	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^5$	1—3
Ртуть, бериллий (BeO), кобальт, серебро, уран, висмут	$n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^4$	1—3
Редкие и рассеянные элементы	$n \cdot 10$	$n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^3$	1—9
Золото, платина	n	$n \cdot 10$	$n \cdot 10^2$	1—5

соотношения между числом месторождений различной крупности, подтвердив известное преобладание мелких объектов над крупными. Найденные соотношения рассматривались им в качестве природных зависимостей. А. П. Соловов показал, что зарегистрированные в кадастре месторождения, отражая результат нашей поисковой деятельности, смещают истинные соотношения между численностью объектов различных размеров в пользу более крупных месторождений. После пересчета, основанного на различных вероятностях обнаружения при поисках крупных, средних и мелких месторождений (см. 2.18), соотношения между их численностью составили $N_{кр.} : N_{ср.} : N_{мелк.} = 1:7:49$. Обобщенные соотношения между численностью месторождений и промышленными запасами в классах отражает рис. 3.

Обосновав соотношения между промышленными и геохимическими

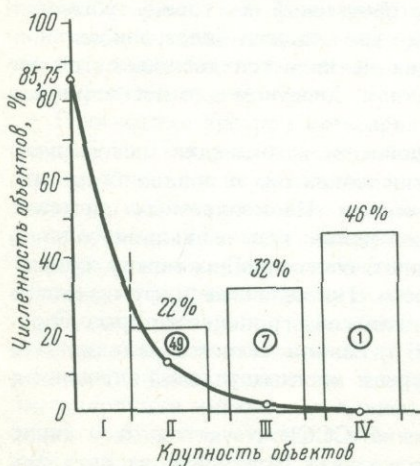


Рис. 3. Соотношения между численностью и крупностью рудных объектов. По А. П. Соловову:

I—V — классы объектов: I — непромышленные рудопроявления, II — мелкие, III — средние, IV — крупные месторождения. Цифры в кружках — число объектов. Промышленные запасы в классе указаны над гистограммой

запасами металла в классах крупных, средних и мелких месторождений (соответственно 0,8; 0,7—0,6 и 0,5—0,4), А. П. Соловов пришел к выводу о постоянстве геохимических запасов в классах [36].

Согласно другой точке зрения [20], природное распределение численности месторождений различной крупности и запасов в классах можно аппроксимировать логарифмически нормальными законами по аналогии с распределением самородков золота различной крупности или проб с разным содержанием в рудном теле, на что в свое время обращал внимание Н. К. Разумовский. При таком распределении численности и запасов месторождений каждого элемента должен быть класс, в котором сосредоточены максимальные запасы, а слева от него — класс с максимальным числом месторождений (рудопроявлений); при этом различия между классами возрастают с ростом дисперсии распределений. Наблюдаемые эмпирические закономерности относятся к интервалу между двумя максимумами. Можно предполагать, что для получения правой части кривой Q_i недостаточно статистического материала, а для получения левой ветви кривой N_i недостаточна детальность исследований мелких месторождений и рудопроявлений на значительных площадях. В тексте настоящего Справочника более полное отражение нашла гипотеза о равенстве запасов в классах.

Согласно среднестатистическим данным по рудным районам мира, на 10 тыс. км² в среднем приходится одно крупное месторождение (того полезного ископаемого и того генетического типа, которое можно ожидать на данной территории в соответствии с ее геологическим строением и историей геологического развития).

1.11. ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Под геолого-промышленными типами месторождений полезных ископаемых понимаются такие морфогенетические типы, которые отвечают современным горнотехническим условиям их промышленного освоения. К числу важнейших требований, предъявляемых промышленностью к минеральному сырью, относятся: а) содержания основных рудных компонентов, минеральный и химический состав руд, обуславливающие ценность месторождения и определяющие технологию переработки руд; б) геологические условия залегания и морфология рудных тел, характеризующие особенности отработки месторождения; в) запасы основных металлов, влияющих на рентабельность эксплуатации месторождения и окупаемость затрат на его освоение.

Группировка рудных месторождений по геолого-промышленным типам проводится по комплексу геологических признаков, характеризующих условия рудообразования, структурно-морфологические особенности и минеральный состав пород и руд. Классификация промышленных типов рудных месторождений может претерпевать изменения как в сторону ее расширения, так и сокращения. Выделение новых типов месторождений, снижение кондиций на минеральное сырье, появление новых технологических приемов добычи, обогащения и т. д. — все это приводит к расширению перечня типов. Потеряли значение важные в прошлом железорудные месторождения типа «железных шляп» кол-

чеданных месторождений Урала, существенно сократилось промышленное значение жильных месторождений молибдена или пегматитовых месторождений бериллия.

Таблица 19

Геолого-промышленные типы рудных месторождений [30, 47]

Основной металл	Промышленный тип месторождений	Попутное извлечение	Представители
Медь	Медно-порфировый	Mo, Ag, Au	Алмалык, Коунрад; месторождения Чили и США
	Медно-колчеданный Медистых песчаников и сланцев	Zn, Ag, Au Zn, Pb, Co	Гай, Сибай, Учалы Джезказган, Удокан; Медный пояс Замбии и Заира; Мансфельд (ГДР)
	Медно-никелевый Медно-скарновый	Ni, Co, Pt Mo, Au, Co	Талнах, Октябрьское Саяк
Свинец и цинк	Колчеданно-полиметаллический	Cu, Ag, Au, Bi	Ленингорск, Зырянск; Брокен-Хилл (Австралия)
	Стратиформный в карбонатных породах	Ag, Ba, Cu	Миргалимсай, Жайрем; Миссури-Миссисипи (США)
	Гидротермальный жильный и пластовый Скарновый	Ag Ag, Mo, Bi	Садон, Згид; Рудные Горы (ГДР) Алтын-Топкан, Верхнее, Садовое
Никель и кобальт	Сульфидный магматический	Cu, Pt, Au	Печенга, Мончегорск, Норильск, Сёдбери (Канада); Камболда (Австралия)
	Силикатные коры выветривания	—	Кемпирсайское, Буруктал, Синарское месторождение, Новой Каледонии и Кубы
Кобальт	Кобальт-арсенидный	Ag	Ховуаксы; Бу-Аззер (Марокко)
Олово	Гидротермальный касситерит-силикатный, касситерит-сульфидный	W	Депутатское, Первоначальное, Солнечное, Арсеньевское, Валькумей; Маунт-Плезант (Канада)
	Жильный	—	Корнуэлл (Великобритания); месторождения Боливии
	Россыпи	W	Пыркакайский район, Кинта (Малайзия)
Вольфрам	Скарново-шеелитовый Грейзеновый Гидротермальный кварц-касситерит-вольфрамит-шеелитовый Россыпи	Mo, Be Sp	Восток 2; Санг-Донг (Южная Корея) Акчатау, Спокойное Иультин, Богуты; Ляндушань (КНР) Месторождения КНР, Бирмы, Индонезии

Продолжение таб. 19

Основной металл	Промышленный тип месторождений	Попутное извлечение	Представители
Молибден	Скарновый Грейзеновый Гидротермальный (кварц-молибденитовый штокверк)	W W, Be	Тырныауз, Каратас I Коктенколь, Булуктай Жирикен, Шахтама; Клаймакс (США)
	Медно-молибденитовый	Cu	Каджаран, Сорское
Золото	Метаморфизованные конгломераты	U	Витватерсранд (ЮАР); Тарква (Гана)
	Черносланцевый	—	Мурунтау
	Кварцево-жильный	—	Многовершинное, Зодское
	Золото-сульфидный жильный	Ag	Кочбулак, Дарасун, Березовское; Колар (Индия)
Золото-серебряный	Ag	Карамкен, Балей; Комсток (США)	
Россыпи (аллювиальные)	—	Бассейны рек Бодайбо, Алдана, Колымы	
Ртуть	Гидротермальный жильный и пластовый	Sb	Никитовка, Хайдаркан, Чонкой, Акташ, Тамватней; Альмаден (Испания)
Сурьма	Гидротермальный жильный и пластовый	Au Hg	Сарылах, Кадамджай; Мёрчисон (ЮАР)
Ниобий, тантал	Карбонатитовый	P	Нижне-Саянское; Боррейро де Араша (Бразилия)
	Пегматитовый Коры выветривания	Li, Rb, Cs Sp	Берник-Лейк (Канада); Месторождения Малайзии и Бразилии
Хром	Магматический (залежи хромитов)	—	Алмаз-Жемчужина, 40 лет КазССР; Бушвельдский комплекс (ЮАР); Великая Дайка (Зимбабве)
Марганец	Морской осадочный Океанического дна	Co, Ni, Cu	Никополь, Чиатура; Оброчище (НРБ) Тихий, Атлантический, Индийский океаны

В табл. 19 перечислены важнейшие промышленные типы месторождений некоторых металлов, определяющие их современную сырьевую базу и добычу. С классификационной стороны этот перечень не является строгим, промышленные типы месторождений выделены на основе различных геологических признаков. Более того, генетическая принадлежность части главнейших типов месторождений вызывает разногласия (в частности, золотоносные конгломераты Витватерсранда или медистые песчаники Джекказгана) и выделение этих промышленных типов не ставит задачу решения спорных вопросов. В то же время сле-

дует учитывать, что отнесение конкретного объекта к определенному геолого-промышленному типу имеет первостепенное значение для его дальнейшего изучения и оценки.

1.12. ТРЕБОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ К ПОЛЕЗНЫМ ИСКОПАЕМЫМ

Объектами промышленной разработки являются месторождения полезных ископаемых — природные скопления минерального сырья, по качеству, количеству и условиям нахождения обеспечивающие в данную эпоху его экономически выгодное извлечение из недр с целью переработки и товарного обращения. Минеральное сырье относится к числу невозобновляемых ресурсов, промышленные запасы любого месторождения имеют конечные размеры (массу) и к определенному сроку неизбежно истощаются. Поэтому в задачу геологической службы, наряду с пристоном разведанных запасов полезных ископаемых на действующих предприятиях, входит обнаружение новых месторождений с целью расширенного воспроизводства запасов минерального сырья, подготовленного для промышленного использования. При этом учитывается, что потребность человечества в минеральном сырье и его ежегодная добыча непрерывно возрастают. Обеспеченность запасами минерального сырья — один из важнейших показателей промышленного потенциала государств.

Понятие о промышленном месторождении имеет геолого-экономический смысл и непрерывно изменяется по мере роста потребности в определенных видах сырья, развития технологии его добычи и переработки, открытия новых месторождений, в том числе новых генетических типов сырья, или обнаружения новых важных свойств конкретного химического элемента и его соединений. Эти изменения отражаются в мировых ценах на продукты добывающей промышленности и происходят на фоне общего снижения средних содержаний полезных компонентов в добываемом сырье при одновременном росте требований к его запасам в месторождениях, признаваемых в данную эпоху промышленными.

Помимо классификации месторождений по размеру запасов минерального сырья их принято разделять по качеству сырья (в частности, по средним содержаниям извлекаемых компонентов) на месторождения с богатыми, рядовыми и бедными рудами. Эти определения не могут рассматриваться в качестве природных (генетических) характеристик геологических объектов, поскольку они целиком зависят от уровня развития техники и конкретного (как правило, временного) выбора нижнего промышленного «бортового» (C_6) содержания химического элемента (или его соединений), включаемого в подсчет запасов. Так, например, конкретное скопление рудного сырья в контуре высокого бортового содержания металла оценивается в качестве месторождения среднего размера с богатыми рудами или признается непромышленным объектом. При понижении C_6 оно же может приобрести оценку крупного по запасам месторождения с рядовыми или бедными рудами. Подобные переоценки происходят постоянно. Поэтому цифры промышленных

запасов минерального сырья в месторождениях и средние содержания извлекаемых компонентов в их контуре не являются геохимическими параметрами и должны с большой осторожностью привлекаться для обоснования законов геохимии. Достаточно указать, что средние содержания меди в добываемых рудах за последние 100 лет снизились в 10 раз, а учетные запасы меди многократно возросли.

Несмотря на временный и неустойчивый характер количественных характеристик промышленных месторождений, для каждой эпохи существуют некоторые обобщенные показатели, определяющие их хозяйственное значение. Подавляющая часть мировой добычи и учетных запасов минерального сырья сосредоточена в небольшом числе крупных и очень крупных месторождений. Это позволяет уточнить понятие о крупном месторождении. Это объект, который по своим минимальным промышленным запасам и качеству сырья допускает в данных экономических условиях рентабельную организацию самостоятельного добывающего предприятия, в частности, горно-обогатительного комбината (ГОК) или нефтяного промысла. Принимая в качестве наиболее удобной десятичную классификацию месторождений по крупности (см. 1.10), будем именовать феноменальным объект, который по размеру запасов в десять раз превышает запасы уникального месторождения. Соответственно, для средних месторождений с запасами сырья, составляющими 1/10 запасов крупного месторождения, предполагается целесообразной групповая отработка, а мелкие месторождения приобретают практическое значение только вблизи разведываемых или эксплуатируемых крупных месторождений того же сырья. Все эти критерии должны приниматься во внимание при проектировании поисковых геохимических работ и оценке их результатов.

Конкретные требования промышленности к запасам сырья и средним содержаниям извлекаемых компонентов, достаточных для рентабельной отработки объекта, определяются сложными многоступенчатыми зависимостями. Годовая производительность добывающего предприятия, система отработки месторождения (открытая или подземная) зависят от масштаба его запасов, генетического типа и морфологии рудных тел, в свою очередь влияют на выбор бортового содержания C_b , которое определяет цифру промышленных запасов Q и среднее содержание C_p компонентов в добываемом сырье.

В целом, задача установления кондиций на минеральное сырье (минимально-промышленных содержаний извлекаемых компонентов) составляет только одну сторону сложной проблемы геолого-экономической оценки месторождений, рассмотрение которой выходит за рамки данного Справочника.

Во всех случаях перед поисковыми работами в рудных районах ставится задача обнаружения новых крупных месторождений с богатыми и легкообогатимыми рудами, а в нефтяных районах — крупных месторождений малосернистых, легких сортов нефти на умеренной глубине, в первую очередь в экономически развитых районах. В малообжитых, труднодоступных и экономически менее развитых районах открытие только крупных месторождений следует рассматривать в качестве единственной задачи геохимических поисков, и требования

промышленности к запасам крупного месторождения увеличиваются. Так, по данным В. А. Перваго, медно-порфировое месторождение с запасами 3,0 млн. т Cu в обычных экономических условиях отвечает середине класса крупных месторождений этого типа в границах 1,0—10,0 млн. т Cu. В условиях Крайнего Севера требования к середине класса повышаются до 5,0 млн. т Cu и соответственно увеличиваются границы класса крупных месторождений до 1,6—16 млн. т Cu. Аналогичным образом должны изменяться требования к классу крупных нефтяных месторождений. В старых горно-рудных и нефтепромысловых районах требования промышленности к результатам геохимических поисков расширяются в сторону открытия месторождений средней крупности, а в условиях дефицита разведанных запасов действующих предприятий — вплоть до мелких.

В табл. 20 приведены данные о промышленных запасах и средних содержаниях извлекаемых компонентов для класса крупных месторождений важнейших видов полезных ископаемых. Эти цифры следует рассматривать в качестве сугубо приближенных, поскольку большин-

Таблица 20

Ориентировочные характеристики крупных месторождений полезных ископаемых (на 1.01.1988 г., центр класса)

Полезное ископаемое	Запасы $n \cdot 3,16^{\pm 1}$	Среднее содержание \bar{C}_p
Медь	3 млн. т	0,8% Cu
Свинец и цинк	2 млн. т	5% (Pb + Zn)
Никель (сульф.)	1 млн. т	1% Ni
Кобальт	30 тыс. т	0,3% Co
Олово	100 тыс. т	0,5% Sn
Вольфрам	300 тыс. т	0,4% WO ₃
Молибден	300 тыс. т	0,2% Mo
Ниобий	200 тыс. т	0,8% Nb ₂ O ₅
Тантал	10 тыс. т	0,1% Ta ₂ O ₅
Бериллий	20 тыс. т	0,5% BeO
Висмут	20 тыс. т	0,2 Bi
Ртуть	20 тыс. т	0,2% Hg
Сурьма	300 тыс. т	5% Sb
Барий	5 млн. т	50% BaSO ₄
Цирконий	5 млн. т	50 кг/м ³ ZrSiO ₄
Иттрий	3 млн. т	0,5% Y
Цезий	3 млн. т	0,3% Cs
Лантан	2 млн. т	0,5% La
Серебро	10 тыс. т	200 г/т Ag
Золото	300 т	4 г/т Au
Платина	300 т	4 г/т Pt
Железо	5 млрд. т	Более 45% Fe (руды)
Хром	30 млн. т	Более 45% Cr ₂ O ₃ (руды)
Марганец	30 млн. т	20% Mn
Титан	5 млн. т	100 кг/м ³ TiO ₂
Фосфор	400 млн. т	20% P ₂ O ₅
Алюминий	300 млн. т	25% Al ₂ O ₃
Фтор	20 млн. т	40% CaF ₂
Стронций	1 млн. т	5% Sr
Литий	1 млн. т	1% Li ₂ O
Калий	500 млн. т	Более 10% K ₂ O
Бор	100 млн. т	10% B ₂ O ₃

ство месторождений характеризуется комплексным составом сырья (например, медно-молибденовые, медно-никелевые, золото-серебряные, молибдено-вольфрамовые месторождения; из полиметаллических руд добываются свинец, цинк, медь, серебро, золото, висмут, кадмий; из медно-порфирировых месторождений помимо меди и молибдена добываются золото и серебро и т. д.). Это позволяет вести рентабельную отработку месторождений при более низких содержаниях или меньших промышленных запасах основного компонента. Для большинства твердых полезных ископаемых характеристики относятся к месторождениям, допускающим открытую разработку; Au, Pt, Sn, W и некоторые другие металлы добываются из россыпей.

В условиях нашей страны требования добывающей промышленности к месторождениям полезных ископаемых должны определяться Положением о Государственном предприятии (Объединении), принятым в 1987 г., с учетом его прибыльности и самофинансирования [34]. Во многих развивающихся странах разрабатываются некоторые легкодоступные мелкие месторождения золота, а также месторождения богатых медных, свинцово-цинковых, оловянных, вольфрамовых, хромитовых, железных и других типов руд для удовлетворения нужд местной промышленности. Такие месторождения, играя полезную роль в экономике этих стран, тем не менее не могут служить базой для создания современных горно-рудных предприятий.

1.13. КРУПНЕЙШИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИРА

При выработке стратегии геохимических поисков, особенно для геологически недостаточно изученных и экономически неосвоенных районов, большое значение имеет правильный выбор объектов приисков, которыми, в первую очередь, должны быть крупные месторождения (см. табл. 20). Это обусловлено тем, что основу минерально-сырьевой базы горно-рудной промышленности большинства стран по главным видам полезных ископаемых составляет относительно небольшое число крупных и очень крупных месторождений. Средние и мелкие по запасам месторождения обычно играют подчиненную роль, и на их долю в сумме приходится только незначительная часть общих запасов соответствующих руд, хотя численно они резко преобладают над крупными объектами.

Характеристика некоторых крупнейших месторождений мира по запасам и содержаниям ведущих металлов дается в табл. 21, 22. Следует иметь в виду, что поисковые работы не должны ориентироваться на выявление именно таких месторождений, принадлежащих к классу уникальных (и «феноменальных»), которые на исследуемой территории могут отсутствовать. Приведенные сведения полезны для оценки возможного масштаба природных объектов. Цифры, помещенные в табл. 22, правильно характеризуют порядок запасов металлов в перечисленных месторождениях (по абсолютной величине в разных источниках имеются незначительные расхождения).

Таблица 21

Крупнейшие месторождения, Cu, Ni, Co, Pb, Zn, Sn, W, Mo, Sb

Месторождение (страна, тип оруденения)	Запасы, млн т	Средние содержания металлов, %	Запасы и (или) средние содержания сопутствующих металлов
Медь			
Эль-Теньенте (Чили, медно-порфировое)	44,0*	1,16	Mo—200 тыс. т, 0,03%
Чукикамата (Чили, медно-порфировое)	35,0*	1,25	Mo—120 тыс. т, 0,006%
Олимпик Дам (Австралия, стратиформное)	35,2	1,60	U ₃ O ₈ —1,32 млн т; Au—1320 т
Медистые песчаники:			
Замбии	28,0*	3,10	—
Заира	25,0*	3,58	—
Бьютт (США, жильное)	9,0*	3,50	Ag—30...90 г/т
Рио-Тинто (Испания, колчеданно-полиметаллическое)	7,0*	0,7—2,5	Pb—до 1%; Zn—до 2%
Никель (сульфидные руды)			
Садбери (Канада)	14,3*	0,7—1,5	Cu—0,8...1,9%; Pt—0,4 г/т
Камболда (Австралия)	3,0	3,2	—
Никель, кобальт (латериты)			
Лонг-Пойнт Баронг (Филиппины)	2,0	1,3	Co—0,12%
Свинец, цинк			
Брокен-Хилл (Австралия, колчеданно-полиметаллическое)	55,0* Pb+Zn	12,7 Pb .13,6 Zn	Ag—180 г/т; Cu—0,4%
Миссисипи-Миссури (США, стратиформное)	Pb—12,0 Zn—11,0	до 25,0% Pb+Zn	—
Ред-Дог (США, колчеданно-полиметаллическое)	Pb—3,9 Zn—13,0	5,0 Pb 17,1 Zn	Ag—8300 т
Олово			
Корнуэлл (Великобритания, жильное)	3,3*	0,3—0,8	—
Льяльягуа (Боливия, штокверковое)	0,53*	0,86	—
Вольфрам			
Мак Тунг (Канада, скарновое)	0,60	0,96 WO ₃	—
Мак-Миллан Пасс (Канада, скарновое)	0,325	0,90 WO ₃	—
Сангдонг (Южная Корея, скарновое)	0,20*	0,78 WO ₃	Mo—0,02%; Bi—0,046%
Молибден			
Клаймакс (США, штокверковое)	1,8*	0,26	WO ₃ —0,03%
Гендерсон (США, штокверковое)	0,96	0,25	
Сурьма			
Сигуаншань (КНР, сурьмяно-кремнисто-карбонатное)	1,9*	3,5—4,0	—

Таблица 22

Крупнейшие месторождения Ве, Та, Nb, Ag, Au, хромитов и фосфоритов

Месторождение (страна, тип оруденения)	Запасы, млн т	Средние содержания металлов, %	Запасы и (или) средние содержания сопутствующих металлов
Бериллий (тыс. т ВеО)			
Кингс-Маунтин (США, пегматитовое)	120,0	0,3 ВеО	—
Редскин-Шток (США, грейзеновое)	50,0	1,0 ВеО	—
Боа Виста (Бразилия, пегматитовое)	40,0	0,2—0,3 ВеО	—
Спер-Маунтин (США, пластовое)	38,0	0,5—0,7 ВеО	—
Тантал, ниобий (тыс. т Та₂O₅, Nb₂O₅)			
Араша (Бразилия, карбонатитовое)	5600,0	2,0—3,5 Nb ₂ O ₅ Nb ₂ O ₅	—
Ока (Канада, карбонатитовое)	480,0	0,5 Nb ₂ O ₅	U ₃ O ₈ — 0,02%; TR ₂ O ₃ — 0,3%
Тор Лейк (Канада, пегматитовое)	19,1 260,0	Ta ₂ O ₅ Nb ₂ O ₅	0,03 Та ₂ O ₅ 0,4 Nb ₂ O ₅
Серебро (тыс. т)			
Потоси (Боливия, жильное)	35,0*	3000 г/т	Sp — 4,0%
Кобальт (Канада, жильное, серебро-арсенидное)	20,0*	До 5%	Co — до 8%; Ni — до 14%
Золото (тыс. т)			
Рудное поле Витватерсранд (ЮАР, золотоносные конгломераты)	75,5*	10,0— 12,5 г/т	U — 90 тыс. т; Ag — 1500 т
Поркюпайн (Канада, жильное)	1,55*	9,7—15,0 г/т	—
Калгурли (Западная Австралия, жильное)	1,3	6,0 г/т	—
Хоумстейк (США, черносланцевая формация)	1,2	10,0— 20,0 г/т	—
Колар (Индия, жильное)	0,9	15,0 г/т	—
Хромиты (млрд т)			
Шварцкоп (ЮАР, Рюстенбург)	1,0	48,0% Cr ₂ O ₃	—
Великая Дайка (Зимбабве)	0,4	48,0—50,0 Cr ₂ O ₃	—
Фосфориты (млн т руды)			
Сечура (Перу, осадочное)	600,0	15,0 P ₂ O ₅	—

Примечания: 1. Знаком * отмечены запасы с учетом отработанных. 2. Источники данных: Е. М. Некрасов (1988), В. И. Смирнов и др. (1981), П. Д. Яковлев (1986); Mining Annual Review (1983—1985); Mining Magazine (1984, vol. 149, N 1; vol. 150, NN 1, 5, 7 and 151, N4); Engineering and Mining Journal (1983; vol. 184, N 2, 1984, vol. 185, NN 1—5); American Mining Congress Journal (1984; vol. 70, N 9); Canadian Mining Journal (1984, vol. 105, N 2); Mining Journal (1984, vol. 302, 303, 1985, vol. 304, 305); Latin American Mining Letter (1984, vol. 3, N 6); Metal Bulletin (1983, 1984, 1985); Western Miner (1984, vol. 57, NN 2—4); Tim International (1983, vol. 56, N 6); Northern Miner (1984, vol. 69, NN 44, 47, 49).

1.14. УЧЕННЫЕ ЗАПАСЫ, ДОБЫЧА И ОЦЕНКА МИРОВЫХ РЕСУРСОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Состояние запасов и добычи полезных ископаемых — один из существенных факторов, влияющих на характер и направленность геологоразведочных работ, в том числе и геохимических поисков, во всем мире. Данные о запасах и добыче ряда металлов в мире приведены в табл. 23.

По важнейшим металлам средняя обеспеченность запасами по уровню добычи составляет от 20—25 до 45—50 лет и только по некоторым из них, например по литию и ниобию, обеспеченность превышает 100 лет, а по редким землям — более 200 лет. Наименьшая обеспеченность запасами характерна для известных и используемых с древних времен «старых» металлов, а наибольшая характерна для «новых», не так давно открытых и используемых человечеством.

Оценки мировых ресурсов, приведенные в табл. 23, — суммарное количество полезных ископаемых в недрах (как выявленных, так и не обнаруженных), наличие которых прогнозируется на основании геологических и иных предположений.

Таблица 23

Ученные запасы, годовая добыча и оценка мировых ресурсов
важнейших металлов (без СССР и социалистических стран) [47, 49]

Металлы	Запасы	Добыча	Ресурсы (оценка)
В млн т			
Медь	847,6	6,2	1357,5
Свинец	187,2	2,35	1580
Цинк	296,8	4,82	2100
Никель	95,0	0,125	219,5
Кобальт	4,2	0,017	6,24
Олово	7,56	0,155	27,54
Вольфрам (WO ₃)	2,05	0,020	3,87
Молибден	11,84	0,046	20,09
Сурьма	1,87	0,026	2,17
Редкие земли (сумма)	8,7	0,03	44,5
Литий (Li ₂ O)	13,4	0,0054	51,3
Ниобий (Nb ₂ O ₅)	15,3	0,0352	21,02
В тыс. т			
Тантал (Ta ₂ O ₅)	132,0	0,535	185,4
Бериллий (BeO)	945,0	0,64	2907,0
Ртуть	117,0	3,0	367,0
Золото	58,2	1,06	75,2
Серебро	470,0	9,76	1070,0
Металлы платиновой группы (сумма)	18,55	—	77,85

Примечание: 1. Дополнительные ресурсы в морских конкрециях: Cu — 700 млн т, Ni — 80 млрд т, Co — 230 млн т. 2. Источники данных: Mineral Commodity Summaries (1984, 1985); Mineral Facts & Problems (1984, 1985); Mineral Commodity Profiles (1984); World Metal Statistics (1984, 1985); Lead & Zinc Statistics (1984, 1985); International Refractory & Hard Metals (1984, vol. 3, N 3); World Mining (1984, 1985); Canadian Mining Journal (1984, vol. 105, N 6); Mining Annual Review (1983, 1984, 1985); Western Miner (1984, vol. 57, N 2); Minerals Yearbook (1983, 1984); Mining Magazine (1984, vol. 150, NN 1, 5, 6 and 149, N 1, 151, N 4); Mining Journal (1984, vol. 302, 303); Metal Bulletin (1984, 1985); Journal of Metals (1984, vol. 36, N 4); Mining Engineering (1984, vol. 36, N 5).

В доле общих запасов полезных ископаемых все большую роль начинают играть новые промышленно-генетические типы месторождений так называемых «рассеянных» типов руд, обладающих значительными запасами при относительно низких содержаниях металлов (например, стратиформные — для меди, свинца и цинка, штокверковые — для молибдена, редкометалльные апограниты — для тантала и ниобия и др.). Дальнейший прирост мировых запасов полезных ископаемых может в значительной мере зависеть от выявления новых, нетрадиционных типов месторождений «бедных» руд, при поисках которых геохимическим методам принадлежит ведущая роль.

До недавнего времени освоение ресурсов полезных ископаемых носило преимущественно экстенсивный характер, т. е. шло путем увеличения объема и разновидностей извлекаемого из недр сырья. В настоящее время наряду с необходимостью наращивания запасов стоит задача перехода от экстенсивного к интенсивному способу эксплуатации ресурсов полезных ископаемых, т. е. к более полному, эффективному и всестороннему их использованию.

1.15. АПРИОРНЫЕ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИЙ

Априорные оценки — ориентировочный подсчет ресурсов минерального сырья, ожидаемых на рассматриваемой площади, до производства поисковых (в частности, геохимических) съемок. Оценки вне категорий могут выражаться в т/м, в цифрах до глубины 100 м или 1000 м (не более) или числом ожидаемых и допустимых для обнаружения крупных месторождений конкретного сырья. Условия залегания и качество предполагаемого минерального сырья принимаются отвечающими современным требованиям промышленности.

Основой априорных оценок служат геологическая карта и знание закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых. Априорные оценки целесообразны для геологически слабо изученных и геохимически непоискованных обширных районов площадью более 300 тыс. км². Они не применяются к оценке ресурсов стройматериалов — глин, стекольных песков, известняков, доломитов, мрамора, гранита, щебня и прочих инертных материалов, а также пьезооптического сырья и драгоценных камней, за исключением алмазов.

Априорные оценки ресурсов ископаемых углей, нефти, газа и минеральных солей допустимы только при наличии соответствующих крупных геологических структур — угленосных, нефтегазоносных или солеродных бассейнов, они могут характеризовать их в целом или их неизученную часть. В каждом отдельном случае эти оценки базируются на конкретных геологических данных и общих геохимических закономерностях. В качестве неписанного правила напомним, что «нефть находят всегда и везде, где ее ищут». Более сложными и дифференцированными являются априорные оценки ресурсов твердых полезных ископаемых. Их перечень включает 30—35 видов минерального сырья, в том числе руды черных (Fe, Mn, Cr, Ti, V), цветных (Cu, Pb+Zn, Ni, Co), редких и малых (Sn, Mo, W, Bi, Be, Nb, Ta, Sb, Hg, Li, Zr, Sr), драгоценных

(Ag, Au, Pt) металлов и радиоактивных элементов (U, Th), а также бокситы, фосфориты, флюорит, барит, алмазы (коренные месторождения и возможные россыпи Au, Pt, Sn) и некоторые другие. В этот перечень не вошли платиноиды, редкие земли и рассеянные элементы, добываемые попутно из руд других металлов и не образующие самостоятельных месторождений (Cd, In, Re, Se, Te, Ga, Ge, Hf и др.), мышьяк (не являющийся полезным ископаемым) и некоторые менее важные виды сырья. В зависимости от геологического строения и размеров территорий следует ожидать совместное или раздельное нахождение полезных ископаемых.

Простейшие априорные оценки локальных участков возможны хорошо известным методом аналогий. Пусть имеется геохимически изученный участок площадью S_0 со средней удельной продуктивностью (на 1 км^2) полезного ископаемого Δq_0 т/м и смежный с ним геологически однотипный неизученный участок площадью S км². Тогда априорная оценка ресурсов Q_H второго участка (в т) до целесообразной глубины H составит

$$Q_H = S \Delta q_0 \alpha H,$$

где $\alpha < 1,0$ — поправочный множитель, учитывающий возможное снижение его продуктивности по сравнению с изученным. Площади S_0 и S при этом должны быть соизмеримы.

Для априорной оценки ресурсов обширных территорий площадью в сотни тысяч и миллионы квадратных километров метод аналогий не пригоден. Решение этой задачи возможно на основе геолого-статистических моделей рудоносных территорий.

При построении этих моделей исходят из положения, что в среднем на 10 тыс. км² встречается одно крупное месторождение. На площади такого размера единственный крупный объект, очевидно, представляет собой только один из вышеперечисленных 30—35 видов твердых полезных ископаемых. На 100 тыс. км² допустимо ожидать 10 крупных и одно уникальное месторождение, которые в принципе могут принадлежать как к 11 различным, так и к одному единственному виду минерального сырья. Два крайних состояния системы мало вероятны, правильнее предположить, что эти месторождения принадлежат к четырнадцати разным видам полезных ископаемых, определяя ту или иную геохимическую характеристику данной территории. На площади 1 млн км² следует ожидать 100 крупных, 10 уникальных и одно феноменальное месторождение (см. 1.10) при одновременном увеличении их разнообразия. В их числе могут быть месторождения всех 30—35 видов полезных ископаемых. Однако такое сочетание различных месторождений на площади в 1 млн км² не может быть одинаковым и противоречило бы отчетливо выраженной специализации крупных металлогенических провинций мира. Поэтому для территорий этого размера более вероятно ожидать совместное нахождение только 10—15 видов полезных ископаемых. Разнообразие сочетаний определяют геохимические различия между территориями. При общем числе $C_{30}^{10} = 30\ 045\ 015$ возможных сочетаний из 30 элементов по 10, фактически реализуется только ограниченное число сочетаний, преимущественно

Таблица 24

Рудоносные территории (модель)

Площадь, км ²	Число полезных ископаемых	Число ожидаемых месторождений				
		крупных	уникальных	феноменальных	экстра-класса	всего
10 тыс	1—2	1	—	—	—	1
100 тыс	4—5	10	1	—	—	20
1 млн	10—15	100	10	1	—	300
10 млн	30	1000	100	10	1	4000
30 млн	30—35	3000	300	30	3	12000

отвечающих природным геохимическим ассоциациям элементов (например, Fe, Ti, Cr, Ni, Co, Cu, Pt ... или Cu, Pb, Zn, Ag, Au, Bi ... и т. д.).

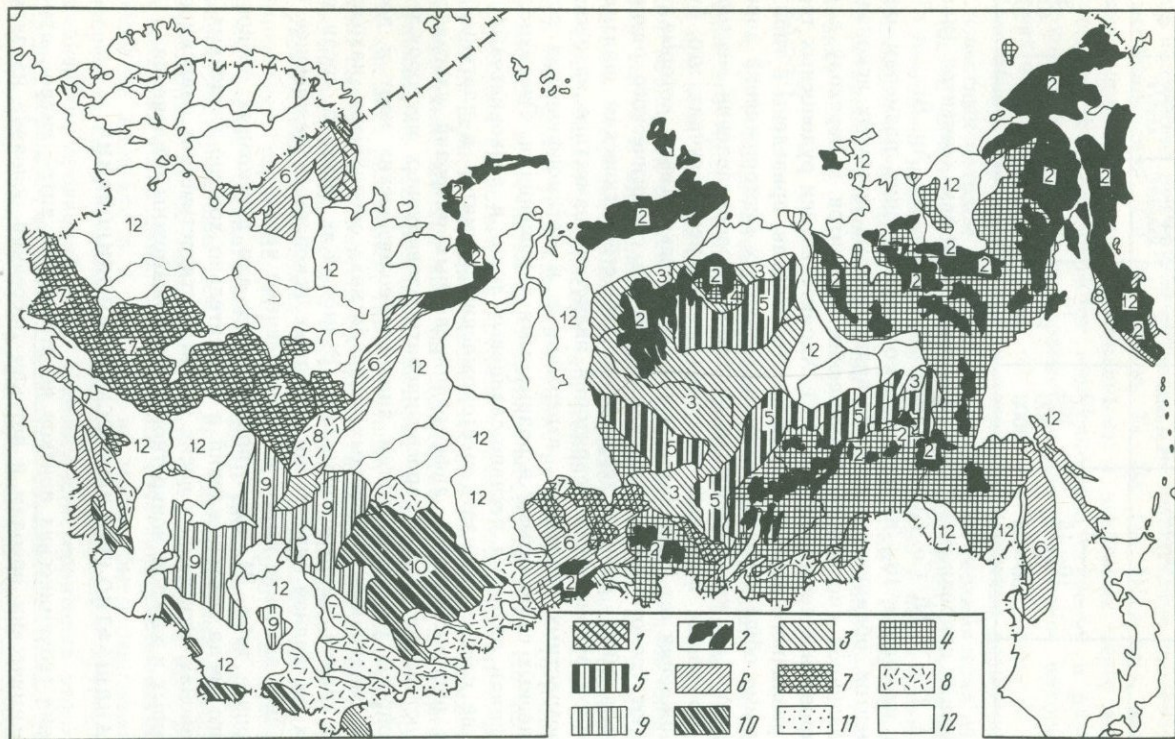
На площадях 10—30 млн км², соответствующих размерам целых континентов, обнаруживаются все виды твердых полезных ископаемых при различной способности химических элементов к переходу в концентрированное состояние (см. 1.7). Характеристики рудоносных территорий различного размера, согласно этой модели, приведены в табл. 24.

Помимо общего числа ожидаемых крупных месторождений априорные оценки должны содержать сведения о распределении месторождений по видам полезных ископаемых. Во всех случаях это будут месторождения тех видов сырья и тех генетических типов, которые соответствуют геологическому строению, истории геологического развития и металлогении данной территории. Общегеологическим признаком возможной рудоносности территорий является совместное нахождение разновозрастных осадочных, изверженных и метаморфических пород, осложненных складчатыми и разрывными нарушениями. Очевидно, что на площади развития песчано-сланцевых толщ и лейкократовых гранитов не следует ожидать месторождений хромитов и платины, а в районе распространения дифференцированных интрузий ультраосновного состава не следует прогнозировать оловорудных месторождений. Эти вопросы решаются путем анализа геологических карт и дополняются сведениями о древних разработках, случайными находками рудных свалов, данными шлиховых съеомок. Как правило, среди ожидаемых на данной территории полезных ископаемых важнейшее промышленное значение имеют их определенные виды.

Данные табл. 24 могут привлекаться для прогнозных оценок резервного числа месторождений в относительно хорошо изученных рудных районах. Эти данные носят характер статистических зависимостей, от которых в каждом конкретном районе возможны отклонения.

1.16. ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ

Методика геохимических поисков по вторичным лито-, гидро-, атмо- и биогеохимическим ореолам и потокам рассеяния основана на законах миграции химических элементов в ландшафтах — в горных породах, в коре выветривания, континентальных отложениях, почве, воде, растениях.



Территория СССР неоднородна по условиям ведения геохимических поисков, что связано с рельефом, климатическими особенностями, геологическим строением и зональностью ландшафтов.

Ландшафтно-геохимическое районирование по условиям геохимических поисков в масштабах 1:1 000 000 и мельче проводится по литературным и фондовым данным, на основе информации, содержащейся на геологических, топографических, почвенных, геоморфологических, гидрогеологических, геоботанических и прочих картах и в соответствующих текстовых материалах [27].

На рис. 4 показана схема ландшафтно-геохимического районирования СССР по условиям геохимических поисков в масштабе 1:40 000 000.

При районировании в масштабе 1:200 000 и крупнее (местами и для масштаба 1:500 000) проводятся и полевые съемочные работы. При этом помимо ландшафта учитываются также возможности отдельных методов поисков, особенности месторождений и другие факторы. Районирование включает в себя объединение отдельных контуров ландшафтно-геохимической карты в районы, однотипные по условиям поисков. Важными критериями при этом являются условия эрозионного вскрытия рудоносной формации и древней коры выветривания, мощность и генезис рыхлых отложений, типы вторичных ореолов рассеяния, наличие геохимических барьеров и безрудных аномалий, физико-химические условия среды. Для каждого района в легенде к карте (или к объяснительной записке) указываются рациональное сочетание поисковых методов, особенности применения каждого метода (представительный горизонт опробования, время опробования, типы геохимических барьеров и зон выщелачивания, индикаторные элементы и т. д.).

Рис. 4. Ландшафтно-геохимическое районирование территории СССР по условиям геохимических поисков:

1—2 — тундровые ландшафты: 1 — с небольшими островами многолетнемерзлых пород, 2 — с широким распространением многолетнемерзлых пород; 3—5 — таежно-мерзлотные ландшафты: 3 — на бескарбонатных породах в условиях платформенных формаций и траппов, 4 — на бескарбонатных породах в условиях геосинклинальных формаций и шитов, 5 — на породах, содержащих карбонаты, в условиях платформенных формаций; 6 — лесные ландшафты без многолетнемерзлых пород в условиях геосинклинальных формаций и шитов; 7, 8 — степные и лесостепные ландшафты: 7 — в условиях платформенных формаций, 8 — в условиях геосинклинальных формаций; 9, 10 — сухие степи и пустыни: 9 — в условиях платформенных формаций, 10 — в условиях геосинклинальных формаций; 11 — горно-луговые ландшафты в условиях геосинклинальных формаций; 12 — ландшафты с мощными рыхлыми отложениями, перекрывающими месторождения и их остаточные ореолы рассеяния. Тундровые ландшафты. В результате интенсивного морозного выветривания образуются грубообломочные механические ореолы. Процессы окисления слабы, зона окисления рудных месторождений маломощна. Воды маломинерализованные, местами кислые. Таежно-мерзлотные ландшафты. Широко распространены многолетнемерзлые породы, преобладает низкая минерализация вод, процессы выноса из почв металлов ослаблены, вторичные ореолы часто развиты с поверхности. Зона окисления местами выражена слабо и неглубока. Лесные ландшафты. Промышленный режим почв и коры выветривания, вынос многих металлов из верхних горизонтов почв, значительное развитие процессов окисления, изобилие поверхностных водооттоков и выходов грунтовых вод со слабой и средней минерализацией. Остаточные ореолы рассеяния ослаблены. Степные и лесостепные ландшафты. Вынос наиболее подвижных металлов из верхних горизонтов почв, интенсивное развитие процессов окисления, воды слабо- и среднеминерализованные. Сухие степи и пустыни. Слабая миграция большинства металлов в почву и коре выветривания. Вторичные ореолы с поверхности. Интенсивное развитие процессов окисления, поверхностные воды часто отсутствуют, грунтовые воды местами залегают глубоко, не имеют выходов на поверхность и сильно минерализованы. Горно-луговые ландшафты. Большое влияние на образование и смещение остаточных ореолов рассеяния оказывают сильно расчлененный рельеф и высокая обводненность. Воды обычно очень мало минерализованные, с низкими фоновыми содержаниями рудных элементов

1.17. БАЛАНС ВЛАГИ НА ЗЕМЛЕ

Земная поверхность на границе атмосферы за год получает $7,1 \cdot 10^{24}$ Дж тепла в форме солнечного излучения или в среднем около 2,1 Дж на 1 см^2 в минуту. Из этого количества 42% отражается обратно в мировое пространство, а 58% поглощается земной поверхностью и атмосферой*. Это громадное количество энергии совершает колоссальную работу на поверхности земли, определяет тепловой режим океана и атмосферы, формирует климат и служит источником жизни на земле.

Около половины солнечной энергии, поглощаемой поверхностью, расходуется на испарение влаги. В результате последующей конденсации паров в атмосфере на поверхность земли выпадают осадки, определяющие следующий баланс влаги на земле.

<i>Среднегодовое испарение, тыс. км³ (мм слоя воды):</i>	<i>Среднегодовое выпадение осадков, тыс. км³ (мм слоя воды):</i>
с поверхности океана ... 448,7(1242)	на поверхность океана 411,6(1139)
с поверхности суши 62,4(420)	на поверхность суши 99,5(670)
всего 511,1(1662)	всего 511,1(1662)

На поверхность суши в среднем ежегодно выпадает в виде атмосферных осадков больше влаги, нежели ее расходуется на испарение. Этот избыток (37,1 тыс. км³ в год) образует речной сток с суши. Реки земного шара переносят огромное количество твердых и растворенных веществ, поступающих в мировой океан или в конечные водоемы внутриматерикового стока, площадь которых составляет 41,8 млн км² (27% современной суши).

1.18. КОЭФФИЦИЕНТ ВОДНОЙ МИГРАЦИИ

Для оценки интенсивности водной миграции элементов используется предложенный Б. Б. Полюновым специальный коэффициент — отношение содержания химического элемента в сухом остатке воды к его содержанию в породах, с которыми эта вода находится в контакте:

$$K_x = \frac{m_x \cdot 100}{a C_x},$$

где m_x — содержание элемента x в воде (в г/л), a — минерализация воды (в г/л), C_x — содержание элемента x в водовмещающих породах (в %).

Использование K_x позволяет сравнивать интенсивность водной миграции элементов с их содержаниями в породах. Ориентировочные значения K_x для некоторых элементов приведены в табл. 25.

* Вследствие встречного теплового (длинноволнового) излучения Земли ее тепловое состояние в среднем не меняется, так как получение тепла от Солнца и его расход взаимно уравновешены. Возможность возникновения «парникового эффекта» вследствие техногенного накопления CO_2 в атмосфере в данном случае не рассматривается.

Таблица 25

Интенсивность миграции элементов в подземных водах зоны гипергенеза ($\alpha=0,43$ г/л)

Элемент	Содержание элементов		Коэффициент водной миграции K_x
	в подземных водах зоны гипергенеза (по С. Л. Шварцеву), г/л	в литосфере (по А. П. Виноградову), %	
1	2	3	4
Хлор	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	644
Бром	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	203
Йод	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$4,10^{-5}$	99
Магний	$1,86 \cdot 10^{-2}$	1,87	2,3
Кальций	$4,3 \cdot 10^{-2}$	2,96	3,3
Натрий	$4,55 \cdot 10^{-2}$	2,50	4,2
Фтор	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	1,6
Цинк	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	0,94
Стронций	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	1,2
Молибден	$2,06 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	4,4
Калий	$4,49 \cdot 10^{-3}$	2,50	0,43
Уран	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	3,1
Фосфор	$5,75 \cdot 10^{-5}$	$9,3 \cdot 10^{-2}$	0,14
Марганец	$4,94 \cdot 10^{-5}$	0,1	0,11
Никель	$3,31 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	0,13
Медь	$5,58 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,27
Железо	$5,47 \cdot 10^{-4}$	4,65	0,02
Алюминий	$2,79 \cdot 10^{-4}$	8,05	0,008
Титан	$1,07 \cdot 10^{-5}$	0,45	0,005
Хром	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	0,08
Ванадий	$2,06 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-3}$	0,05
Цирконий	$1,30 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,017
Торий	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,07

1.19. ТАЛАССОФИЛЬНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Кларки концентраций элементов в океане относительно кларков земной коры именуется талассофильностью (табл. 26). Талассофильность велика у Cl (111), H (71) и Br (30) и мала у Fe ($1 \cdot 10^{-6}$), Si ($1,6 \cdot 10^{-6}$), Ba ($7,7 \cdot 10^{-5}$), P, Ni ($5 \cdot 10^{-5}$). Элементы с высокой талассофильностью надолго задерживаются в океане, с малой — быстро его покидают. Малые величины коэффициентов водной миграции K_x (см. 1.18) и талассофильности τ_x элементов определяют ограниченное значение гидрохимического метода для поисков соответствующих месторождений полезных ископаемых.

Таблица 26

Талассофильность элементов. По А. И. Перельману

Элементы	Талассофильность	Элементы	Талассофильность
Хлор	$1,1 \cdot 10^2$	Золото	$9 \cdot 10^{-4}$
Водород	$7,1 \cdot 10^1$	Молибден	$9 \cdot 10^{-4}$
Бром	$3 \cdot 10^1$	Цинк	$6 \cdot 10^{-4}$
Кислород	$1,8 \cdot 10^0$	Цезий	$5 \cdot 10^{-4}$

Элементы	Талассофильность	Элементы	Талассофильность
Сера	$1,8 \cdot 10^0$	Медь	$4 \cdot 10^{-4}$
Натрий	$4,2 \cdot 10^{-1}$	Ртуть	$3 \cdot 10^{-4}$
Бор	$4 \cdot 10^{-1}$	Свинец	$3 \cdot 10^{-4}$
Йод	$1,2 \cdot 10^{-1}$	Барий	$7,7 \cdot 10^{-5}$
Углерод	$9 \cdot 10^{-2}$	Фосфор	$5 \cdot 10^{-5}$
Селен	$8 \cdot 10^{-2}$	Никель	$5 \cdot 10^{-5}$
Магний	$7 \cdot 10^{-2}$	Кобальт	$5 \cdot 10^{-5}$
Стронций	$4 \cdot 10^{-2}$	Торий	$3 \cdot 10^{-5}$
Калий	$1,6 \cdot 10^{-2}$	Галлий	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Кальций	$1,2 \cdot 10^{-2}$	Лантан	$1 \cdot 10^{-5}$
Мышьяк	$8 \cdot 10^{-3}$	Иттрий	$1 \cdot 10^{-5}$
Азот	$5 \cdot 10^{-3}$	Ванадий	$5 \cdot 10^{-6}$
Литий	$4,7 \cdot 10^{-3}$	Марганец	$4 \cdot 10^{-6}$
Фтор	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Церий	$4 \cdot 10^{-6}$
Рубидий	$1,3 \cdot 10^{-3}$	Скандий	$4 \cdot 10^{-6}$
Уран	$1,2 \cdot 10^{-3}$	Кремний	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Олово	$1,2 \cdot 10^{-3}$	Железо	$1 \cdot 10^{-6}$

1.20. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ

Геохимические барьеры — участки земной коры, где на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация. На этих барьерах образуются рудные и безрудные геохимические аномалии, в связи с чем теория геохимических барьеров является одной из методологических основ геохимических поисков месторождений. В почвах, илах озер, морей и океанов, корах выветривания, водоносных горизонтах артезианских бассейнов и гидрогеологических массивов, протекают геохимически однотипные механические, физико-химические и биогеохимические процессы концентрации элементов.

Механические барьеры — участки резкого уменьшения интенсивности механической миграции, на которых формируются золотые, оловянные, платиновые, монацитовые, алмазные и прочие россыпи. Физико-химические барьеры — участки резкого уменьшения интенсивности водной миграции элементов в результате изменения температуры, давления, Eh, pH и других характеристик. На биогеохимических барьерах образуются угольные залежи, торф, концентрации металлов в гумусовых горизонтах и т. д.

Физико-химические барьеры классифицируются по фактору, приводящему к концентрации элементов. Выделяется 7 основных типов барьеров, обозначаемых буквами латинского алфавита от А до G. В результате резкой смены восстановительных условий на окислительные возникает кислородный барьер А. Если кислородные воды встречают восстановительную среду, то формируется сероводородный В или глеевый С барьеры. В местах резкого повышения pH образуется щелочной барьер D, при резком уменьшении pH — кислый барьер Е. С аналогичных позиций выделяются испарительные F и сорбционные G барьеры.

При выделении типов барьеров имеет значение не только характер изменения условий (кислые — щелочные, окислительные — восстанови-

тельные и т. д.), но и количественные пределы этого изменения. Так, на менее восстановительном барьере осаждаются уран и селен, а при более низком Eh — и молибден. На слабоокислительном барьере осаждается железо, на резкоокислительном (в условиях более высокого Eh) — железо и марганец или только марганец.

В земной коре в одном и том же месте нередко совмещаются различные геохимические процессы, в связи с чем выделяются комплексные барьеры, когда концентрации химических элементов связаны с одновременной реализацией нескольких процессов. Например, резкое понижение рН часто приводит к осаждению химических элементов, образующих труднорастворимые соединения в более кислой среде (например, Mo, Sn). Однако, при подкислении раствора может происходить и восстановление U, Se, Mo и других элементов. Так, в одном и том же месте образуется комплексный барьер — и кислый, и восстановительный (E — B). Детально изучен комплексный кислородно-сорбционный (A — G) барьер. От комплексных следует отличать совмещенные барьеры, когда на одном и том же участке сначала на барьере одного типа концентрируется одна парагенная ассоциация элементов, а через некоторое время в связи с изменившимися условиями и типом барьера — другая. Совмещенные барьеры могут формироваться как в пределах одного геологического этапа, так и со значительным разрывом в геологическом времени (иногда в десятки миллионов лет).

Для двухсторонних геохимических барьеров характерна миграция химических элементов с противоположных сторон. В результате на барьере концентрируются элементы, обладающие противоположными свойствами. Например, в зонах окисления сульфидных руд в известняках формируются двухсторонние кислотно-щелочные барьеры E — D. Слабощелочные, обогащенные SiO₂ воды, заключенные в известняках, контактируют здесь с кислой средой, обязанной окислению сульфидов. В результате на кислом барьере E происходит осаждение SiO₂, развивается окремнение известняков. С другой стороны, в сернокислых растворах окисляющихся сульфидных руд легко мигрируют Cu, Zn, Fe и другие металлы. При встрече таких вод с известняками возникает щелочной барьер D, на котором металлы осаждаются в виде малахита, азурита, смитсонита, гидрогётита и других минералов. В этом случае геохимический барьер работает на два фронта: в сторону от руд — щелочной барьер D, по направлению к рудам — кислый барьер E.

Выделяются макро-, мезо- и микробарьеры. В зависимости от способа массопереноса различаются диффузионные и инфильтрационные барьеры. Первые характерны для застойных условий, для эпох прогибания геосинклиналей, вообще для нисходящих тектонических движений. Инфильтрационные барьеры более связаны с восходящими тектоническими движениями, орогенными этапами развития складчатых поясов, инфильтрационными этапами развития артезианских бассейнов.

Концентрация рудных элементов на физико-химических барьерах зависит, с одной стороны, от типа барьера (A, B, C и т. д.), а с другой, — от состава вод, поступающих к барьеру. На сочетании этих двух факторов построена систематика геохимических барьеров (табл. 27).

Таблица 27

Главнейшие типы физико-химических барьеров. По А. И. Перельману

Окислительно-восстановительные условия		Кислородные воды				Глеевые воды			
Щелочно-кислотные условия	1. Сильнокислые	2. Кислые и слабокислые	3. Нейтральные и слабощелочные	4. Сильнощелочные (содовые)	5. Сильнокислые	6. Кислые и слабокислые	7. Нейтральные и слабощелочные	8. Сильнощелочные (содовые)	
Границы рН в зоне гипергенеза	< 3	3—6,5	6,5—8,5	> 8,5	< 3	3—6,5	6,5—8,5	> 8,5	
Тип геохимического барьера	Кислородный А	A1 Fe	A2 Fe, Mn, Co	A3 Mn	A4 —	A5 Fe	A6 Fe, Mn, Co	A7 Mn, Co	A8 —
	Сульфидный (сероводородный и др.) В	B1 Cu, Pb	B2 Ag, Cu, Zn, Pb	B3 —	B4 Cu, Ag, Zn, Mo	B5 —	B6 —	B7 Fe, Co, Ni, Cu, Zn	B8 Cu, Zn
	Глеевый С	C1 Cu, U, Mo	C2 Cu, U, Mo	C3 Cu, U, Mo	C4 Cu, Ag, U, Mo	C5 —	C6 —	C7 —	C8 —
	Щелочной D	D1 Ba, Fe, Co, Ni, Cu, Zn	D2 Ba, Co, Ni, Cu, Zn, Be	D3 —	D4 —	D5 —	D6 Sr, Ba, Mn, Fe, Co, Cu, Zn	D7 —	D8 —
	Кислый E	E1 —	E2 —	E3 Mo	E4 Ag, Be, Mo	E5 —	E6 —	E7 Mo	E8 Be, Mo
	Испарительный F	F1 Sr, Cu, Mo	F2 —	F3 B, F, Sr, Mo	F4 B, F, Mo	F5 —	F6 —	F7 —	F8 —
	Сорбционный G	G1 —	G2 Ba, Zn, Ni, Co, Pb, Cu, Mo	G3 —	G4 —	G5 —	G6 Ba, Zn, Ni, Co, Pb, Cu	G7 —	G8 —

Каждый тип барьера может реализоваться в различных геологических условиях — в почвах, илах, корках выветривания, водоносных горизонтах артезианских бассейнов, зонах разломов и т. д. Масштабы концентраций также могут различаться — от слабых геохимических аномалий до рудных тел месторождений. Чаще всего эти концентрации представлены слабыми геохимическими аномалиями, реже — рудопроявлениями, еще реже — промышленными месторождениями. Для некоторых типов барьеров известны только слабые аномалии.

1.21. МОДУЛИ СТОКА ГЛАВНЕЙШИХ РЕК СССР

Под модулем стока продуктов выветривания понимается количество твердого и растворенного вещества, транспортируемого реками в единицу времени с единицы площади водосбора. Твердый материал в реках переносится в основном во взвешенном состоянии, в меньшей степени путем влечения по дну. В первом приближении это соотношение принимается равным 10:1. Сведения о модулях стока взвешенных наносов и растворенных веществ, определяющих количество продуктов водной эрозии, могут быть получены из «Гидрологических ежегодников».

В табл. 28 приведены модули стока в низовьях наиболее крупных рек СССР. Соотношения величин твердого и растворимого стока меняются в зависимости от географического положения и климатических

Таблица 28

Модули стока главнейших рек СССР.
По материалам Г. В. Лопатина (1952)

Река	Площадь водосбора, тыс. км ²	Средний сток воды, км ³	Среднегодовой сток вещества, т/км ²		Соотношение модулей твердого и растворимого стока
			твердый	растворимый	
Кура	188	18	210	23,4	9,0
Терек	43,7	11	637	70,7	9,0
Теджен	70,6	0,89	38,8	5,1	7,6
Амударья	226,8	42	469	78,0	6,0
Или	131,5	14	73,8	19,2	3,8
Сырдарья	218,9	13,5	60,8	27,6	2,2
Яна	244,7	31	14,0	3,9	3,6
Индирикка	360,4	57	25,9	9,1	2,9
Колыма	644,1	120	8,0	5,5	1,5
Амур	1843	346	31,0	10,1	3,1
Печора	326,9	129	22,0	16,7	1,3
Дон	422,5	28	16,7	14,7	1,1
Урал	220	11	16,5	15,1	1,1
Волга	1380	255	20,3	33,7	0,6
Днепр	503,4	53	4,6	16,1	0,29
Днестр	72,0	10	38,2	42,2	0,9
Северная Двина	360,3	111	17,8	47,7	0,37
Нева	282,3	82	3,2	10,2	0,31
Обь	2485	394	5,9	12,2	0,48
Енисей	2599	548	4,6	11,4	0,40
Лена	2425	488	5,3	17,0	0,31
Хатанга	346,1	101	4,4	27,4	0,16

условий района. Реки горных районов Кавказа, Средней Азии и Казахстана характеризуются значительным преобладанием твердого стока над растворимым: Кура и Терек — в 9 раз; Риони, Кубань, Кума — в 4,2...4,4 раза; Теджен — в 7,6 раза; Зеравшан — в 7,3 раза; Амударья — в 6 раз. Более ощутима доля растворенных веществ в горных реках холодного климата, для которых при неизменном преобладании твердого стока рассматриваемое соотношение составляет около 3,5:1,0 (Амур, Яна, Индигирка). Для рек северных залесенных районов, протекающих в условиях влажного климата, величина отношения падает до 2:1 (Печора, Колыма, Витим). Обратные соотношения, при которых преобладает растворимый сток, характерны для равнинных рек европейской части СССР (Луга — 0,13; Нева — 0,31; Онега — 0,2, Северная Двина — 0,37) и значительной части Сибири (Обь — 0,48; Енисей — 0,40; Хатанга — 0,16; Лена — 0,31). Соотношение модулей стока в основном определяется величиной стока твердого материала, которая изменяется от 0,19 (Сарысу) до 684 т/км²/год (Риони), т. е. более чем в 3,5 тыс. раз. Величина растворимого стока колеблется от 2,2 (Нура) до 161 т/км²/год (Риони).

В табл. 29 приведены средние величины твердого и растворимого стока для отдельных водосборных бассейнов СССР. По этим данным соотношение между взвешенным, влекомым наносами и растворенным веществом для рек СССР составляет 1,5:0,15:1. Для территории нашей страны величина среднего ежегодного стока наносов и растворенных веществ равняется 846,3 млн т, что составляет около 5% стока со всей поверхности суши [36]. Если учесть, что территория СССР составляет 15% площади суши, то вынос продуктов водной эрозии значительно меньше среднего выноса со всего земного шара. Причина этого — значительная облесенность территории СССР и широкое распространение многолетней мерзлоты. Сумма твердого и растворимого стока определяет величину ежегодного слоя денудации Δh (в мм/год), режим фор-

Таблица 29

Твердый и растворимый сток с территории СССР.
По Г. В. Лопатину (1952)

Бассейны морей	Площадь водосбора, млн км ²	Средний сток воды, км ³	Среднегодовой сток, млн т		
			твердый	растворимый	суммарный
Балтийского	0,6	158	2,1	7,1	9,2
Черного и Азовского	1,2	158	40,8	30,7	71,5
Баренцева и Белого	1,0	346	16,3	28,0	44,3
Карского	6,1	1166	33,0	65,9	98,9
Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского	4,6	882	35,7	63,3	99,0
Каспийского	2,9	305	135,3	59,8	195,1
Аральского и других бессточных озер и рек Средней Азии	2,0	94	144,1	33,3	177,4
Берингова, Охотского и Японского	3,2	850	112,2	38,7	150,9
Всего	21,6	3959	519,5	326,8	846,3

мирования потоков рассеяния и скорость обновления вторичных остаточных ореолов рассеяния месторождений.

1.22. ЕЖЕГОДНЫЙ СЛОЙ ДЕНУДАЦИИ

Ежегодный слой денудации — величина, характеризующая среднее понижение уровня суши в результате деятельности рек, ветра, ледников и других агентов эрозии. Наиболее полно процесс денудации развивается в форме эрозионной и растворяющей деятельности временных и постоянных водотоков. Ежегодный слой денудации Δh соответствует скорости эрозии, выраженной в линейных единицах на единицу времени (например, в мм/год). Средняя величина Δh для суши близка к 0,1 мм/год (табл. 30), различаясь по некоторым данным от 0,05 мм/год (Г. В. Лопатин, 1959) до 0,23 мм/год (Ж. Фурнье, 1971).

По данным табл. 30 средневзвешенная величина Δh для суши в целом составляет 0,13 мм/год.

Среднее ежегодное понижение отдельных участков суши в связи с особенностями их геологического строения, различным количеством атмосферных осадков, разнообразием рельефа, климатических условий и режима стока отличается от среднегодового Δh для суши в целом. Например, высокие значения ежегодного слоя денудации (в мм/год) зарегистрированы в пределах Большого Кавказа (0,7) и Альп (0,86), в бассейнах рек Амударьи (0,96) и Вахш (1,63). Максимальными значениями Δh (4 мм/год) характеризуется о. Калимантан. В отличие от этого в бассейне реки Волги ежегодный слой денудации не превышает 0,005 мм/год [36].

Для местных условий Δh можно получить по значениям модулей твердого и растворимого стока (см. 1.21). Так, для горных районов отмечается четкая зависимость скорости денудации от ландшафтных особенностей территорий. В условиях высокогорных районов Казахстана ежегодный слой денудации составляет $0,18 \pm 0,01$ мм/год; из них 90% приходится на долю механического стока. В переходных условиях от высокогорья к среднегорью, отвечающих горно-луговым геохимическим ландшафтам, величина Δh составляет $0,06 \pm 0,02$ мм/год, из которых

Таблица 30

Ежегодный слой денудации континентов [22]

Континент	Площадь, млн км ²	Ежегодный слой денудации Δh , мм/год	В том числе		Соотношение механической и химической эрозии
			механическая эрозия, мм/год	химическая эрозия, мм/год	
Азия	44,89	0,209	0,166	0,043	3,9
Африка	29,81	0,072	0,047	0,025	1,9
Северная Америка	20,44	0,113	0,073	0,040	1,8
Южная Америка	17,98	0,148	0,093	0,055	1,7
Европа	9,67	0,075	0,043	0,032	1,3
Австралия	7,96	0,044	0,033	0,011	3,0

70% приходится на долю механического стока. В условиях горно-лесных ландшафтов при сильной задернованности ежегодный слой денудации — $0,035 \pm 0,007$ мм/год, на долю химического стока приходится половина этой величины. В низкогорных степных ландшафтах ежегодный слой денудации составляет $0,1 \pm 0,015$ мм/год, увеличиваясь в местах распашки земель.

1.23. РАСТВОРИМОСТЬ МИНЕРАЛОВ

Под растворимостью минералов понимается концентрация их в насыщенном растворе при данной температуре и давлении. В международной системе единиц растворимость измеряется в моль/л, в технических приложениях — часто в г/л. Большинство природных минералов (силикаты, оксиды, сульфиды, самородные металлы) обладают низкой растворимостью. Высокая растворимость характерна для галонидных соединений — хлоридов, многих сульфатов и некоторых других менее распространенных минералов. Абсолютно нерастворимых минералов не существует. С повышением температуры растворимость большинства минералов растет. Природные воды с минерализацией более 50 г/л называются рассолами.

В табл. 31 охарактеризована растворимость некоторых наиболее распространенных минералов в условиях атмосферного давления и тем-

Таблица 31

Растворимость некоторых минералов

Минерал	Растворимость		Примечания
	моль/л	г/л	
Галит NaCl	6,13	358,5	20° C
Сильвин KCl	4,60	343,2	
Бишофит $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	8,22	1670,0	
Кальцит $CaCO_3$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	—
Сода $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	3,24	928,0	
Смитсонит $ZnCO_3$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	18—20° C
Бикарбонат цинка $Zn(HCO_3)_2$	$3,74 \cdot 10^{-3}$	0,7	180° C
Бикарбонат свинца $Pb(HCO_3)_2$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	0,14	
Церуссит $PbCO_3$	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	18—20° C
Гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$1,39 \cdot 10^{-2}$	2,4	0° C
Барит $BaSO_4$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$	
Тенардит Na_2SO_4	1,34	190,0	
Мирабилит $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	0,342	110,0	
	5,96	1920,0	30° C
Эпсомит $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	2,88	710,0	—
Мелантерит $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0,946	263,0	18—20° C
Госларит $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	1,85	531,2	
Моренозит $NiSO_4 \cdot 7H_2O$	0,979	274,8	
Биберит $CoSO_4 \cdot 7H_2O$	0,946	265,8	
Халькантит $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0,790	172,0	
Англезит $PbSO_4$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	0,041	—
Повеллит $CaMoO_4$	$5,60 \cdot 10^{-5}$	0,0112	
Вульфенит $PbMoO_4$	$3,00 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	
Флюорит CaF_2	$1,65 \cdot 10^{-4}$	0,016	

ператур, близких к обстановке, в которой ведутся геохимические поиски. Выборочно приведены величины растворимости в зависимости от температуры и давления CO_2 .

Для характеристики труднорастворимых соединений служит показатель — «произведение растворимости» (ПР) (произведение молярных концентраций ионов данного минерала в его насыщенном растворе). Если в равновесных сильно разбавленных растворах молекулы растворенного вещества полностью диссоциированы, растворимость минералов определяется зависимостью $C_{\text{моль/л}} = \sqrt{\text{ПР}}$. В более общем случае, в состоянии истинных растворов могут преобладать недиссоциированные молекулы. Для расчетов с ПР необходимо знать константы диссоциации и реальные формы нахождения элементов в природных водах. В частности, содержания рудных элементов в природных водах выше определяемого произведением растворимости их главнейших сульфидов и устойчивых вторичных минералов в связи с образованием комплексных неорганических соединений с различными лигандами и металлоорганических соединений повышенной растворимости. Однако ПР значительно ниже растворимости неустойчивых в природной обстановке вторичных сульфатов тех же металлов в связи с обменными химическими реакциями, осаждением гидроксидов и сорбцией. При формировании солевых наложенных ореолов рассеяния эти процессы ведут к «закреплению» рудных элементов в твердой фазе.

В горячих газовой-жидких гидротермах рудные элементы переносятся в форме комплексных хлоридных, сульфатных, хлоридно-бикарбонатных, фторидных и других легкорастворимых соединений. Данных о растворимости минералов в сложных системах недостаточно.

Произведение растворимости постоянно для данной температуры и давления. Из этого следует, что добавление к солевому раствору другой, более растворимой соли, имеющей ион, одноименный с ионом первой, понижает растворимость первой соли. Например, растворимость CaF_2 понизится, если к раствору CaF_2 прилить раствор гипса CaSO_4 . Растворимость англезита PbSO_4 в зоне окисления сульфидных месторождений особенно низка в связи с избытком сульфатов (CuSO_4 , ZnSO_4 и др.). Последние как бы предохраняют англезит от растворения. После выщелачивания других сульфатов растворимость англезита может повышаться.

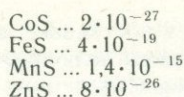
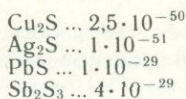
К хорошо растворимым веществам правило произведения растворимости количественно не применимо, им можно пользоваться при растворимости минерала в воде менее 0,01 моль/л (приблизительно менее 1 г/л). Большинство минералов обладает меньшей растворимостью, что и определяет большое значение этого правила в геохимии. Зная содержание в растворе одних ионов, с помощью произведения растворимости можно ориентировочно определять концентрацию других ионов.

Произведение растворимости ПР некоторых химических соединений (при 25° С)

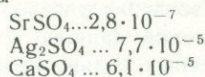
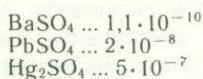
Сульфиды

$\text{Bi}_2\text{S}_3 \dots 1,6 \cdot 10^{-72}$
 $\text{HgS} \dots 4 \cdot 10^{-58}$
 $\text{CuS} \dots 8 \cdot 10^{-37}$

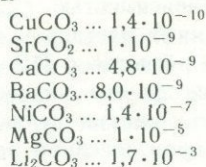
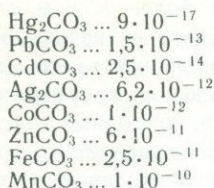
$\text{Sb}_2\text{S}_5 \dots 1 \cdot 10^{-30}$
 $\text{NiS} \dots 1,4 \cdot 10^{-24}$
 $\text{CdS} \dots 1 \cdot 10^{-29}$



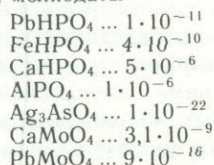
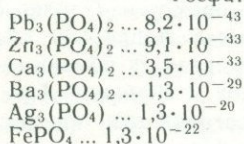
Сульфаты



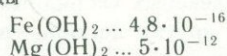
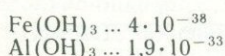
Карбонаты



Фосфаты, арсенаты, молибдаты



Гидроксиды



1.24. pH ОСАЖДЕНИЯ ГИДРОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

При определенной температуре произведение концентрации иона водорода на концентрацию иона гидроксида в молях на литр есть величина постоянная, именуемая ионным произведением воды:

$$[\text{H}^+] \times [\text{OH}^-] = K_{\text{H}_2\text{O}}$$

При 22° С $K_{\text{H}_2\text{O}}$ равна 10^{-14} . В водах, имеющих нейтральную реакцию ($\text{H}^+ = \text{OH}^-$), концентрация каждого из этих ионов составляет 10^{-7} моль/л, в щелочных водах $[\text{H}^+] < 10^{-7}$, а в кислых $[\text{H}^+] > 10^{-7}$. Для удобства обозначения принята степень кислотности — щелочности среды характеризовать показателем pH, представляющим собой отрицательный логарифм концентрации водородных ионов или для нейтральной среды: $\text{pH} = -\lg [10^{-7}] = 7,0$.

Интенсивность водной миграции химических элементов сильно зависит от кислотности или щелочности природных вод. Большинство химических элементов образует наиболее растворимые соединения в сильно кислых средах и менее растворимые — в нейтральных. Соединения некоторых элементов легко растворимы в щелочных растворах с pH 9 ... 10.

Кислые и слабокислые воды (pH < 6) благоприятны для миграции Ca, Sr, Ba, Pb, Cu, Zn, Cd, Cr³⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, Ni²⁺. В щелочных

Таблица 32

рН осаждения гидроксидов из разбавленных растворов солей при 25° С

Гидроксиды	рН	Гидроксиды	рН	Гидроксиды	рН
Sn(OH) ₄	2	Bi(OH) ₃	4,5	Fe(OH) ₂	5,5
Zr(OH) ₄	2	La(OH) ₃	8,0	Pb(OH) ₂	6,0
Th(OH) ₄	3,5	Sc(OH) ₃	4,9	Co(OH) ₂	6,8
Ti(OH) ₄	1,4—1,6	Ce(OH) ₃	7,4	Mn(OH) ₂	9,0
Sb(OH) ₃	0,9	Y(OH) ₃	6,8	Cd(OH) ₂	6,7
Fe(OH) ₃	2,48	Sn(OH) ₂	3,0	Mg(OH) ₂	10,5
Ga(OH) ₃	3,5	Be(OH) ₂	5,7	Hg(OH) ₂	7,0
Al(OH) ₃	4,1	Ni(OH) ₂	6,7	Ag(OH)	9,0
In(OH) ₃	3,7	Cu(OH) ₂	5,4	UO ₂ (OH) ₂	4,2
Cr(OH) ₃	5,3	Zn(OH) ₂	5,2	NbO ₂ (OH)	0,4

водах (рН > 7) многие из этих элементов слабоподвижны. В щелочных водах подвижны Cr⁶⁺, Se⁶⁺, Mo⁶⁺, V⁵⁺, As⁵⁺.

В табл. 32 показаны величины рН начала выпадения гидроксидов металлов из разбавленных растворов их солей. Осаждение гидроксидов заканчивается обычно при величинах рН на 0,5—1,5 единицы выше, чем рН начала осаждения. Поэтому правильнее говорить об интервале рН осаждения, который, например, для Mg²⁺ составляет 10,5—11; для Ni²⁺—6,7—8; для Al³⁺—4,1—6,5 и т. д.

1.25. СТАДИИ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Общая тенденция формирования коры выветривания — вынос наиболее подвижных элементов и относительное накопление наименее подвижных, особенно Si, Al, Fe. Согласно Б. Б. Полюнову, выветривание горных пород проходит четыре стадии от обломочной к обизвесткованной коре (вынесена часть катионов), к сиалитной и, наконец, к аллитной (вынесена большая часть катионов, кремнезема, в коре накапливаются гидроксиды алюминия и железа).

Направление выветривания, тенденция процесса едины, но различия в климате определяют скорость процесса и конечную стадию — в пустыне аллитная стадия не достигается (рис. 5). На территории СССР ближе всего к аллитной стадии красноземы влажных тропиков Аджарии (район Батуми). Широко распространены в ряде районов СССР погребенные коры выветривания аллитной стадии, сформированные в палеоклиматических условиях (например, триас-юрские коры выветривания Северного Казахстана и Южного Урала). В современную эпоху стадия аллитного выветривания проявлена в экваториальных ландшафтах влажных тропиков (например, латеритные коры выветривания Гвинеи и связанные с ними крупнейшие месторождения высокосортных бокситов). Известны закономерные геохимические сопряжения элювиальной коры выветривания и континентальных отложений. Так, в сухих степях и пустынях элювий обычно относится к первой или второй стадиям и содержит CaCO₃ (обломочная обизвесткованная кора), а в континентальных отложениях накапливаются продукты первой фазы — легко растворимые хлориды и сульфаты (см. рис. 5).

Климатические условия	Фазы развития			
	Обломочная	Обызвесткованная (сиаллитная и обломочная)	Кислая сиаллитная (ненасыщенная)	Аллитная
Сухой климат степей и пустынь. Испарение превышает осадки (промывание коры выветривания слабое)	▨			
Влажный климат умеренного пояса (осадки превышают испарение, промывание коры выветривания сильное)	▨	▨	▨	
Влажный климат тропиков субтропиков и экваториальных стран (осадки превышают испарение, промывание коры выветривания сильное)	▨	▨	▨	▨

Рис. 5. Фазы развития коры выветривания изверженных пород в зависимости от климатических условий. По Б. Б. Польшову

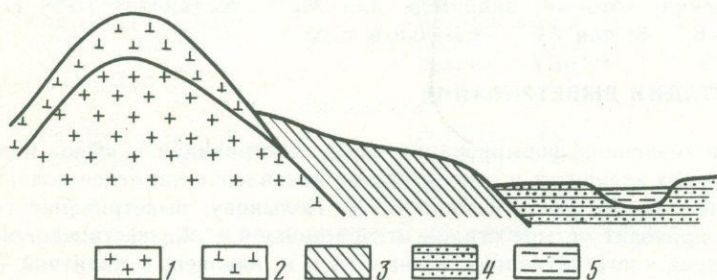


Рис. 6. Сиаллитный ортоэлювий и его производные (1-й вариант): 1 — коренные породы; 2—3 — солесборная область (вынос Cl^+ , O_2^- , Ca^{2+} , Na^+ , меньше Mg^{2+} и K^+); 2 — сиаллитный ортоэлювий, 3 — сиаллитный делювий (бескарбонатный); 4—5 — область аккумуляции солей; 4 — карбонатный элювий (лессовидный), 5 — пресное озеро с жесткой водой и известковым сапропелем на дне

В таежной зоне развития элювия достигает третьей фазы, и производные аккумуляции имеют глинистый состав.

Коры выветривания изверженных и метаморфических пород Б. Б. Польшов назвал ортоэлювием. Кристаллические породы формировались в условиях, отличных от земной поверхности и поэтому они изменяются особенно сильно.

Кора выветривания морских осадочных пород называется параэлювием. Изменение осадочных пород при выветривании по сравнению с изверженными породами часто менее значительно.

Элювий континентальных отложений называется неозэлювием. Эти отложения образовались на земной поверхности или в водоемах суши. Неозэлювий часто выражен неотчетливо, так как континентальные отложения сами являются переотложенными продуктами выветривания и

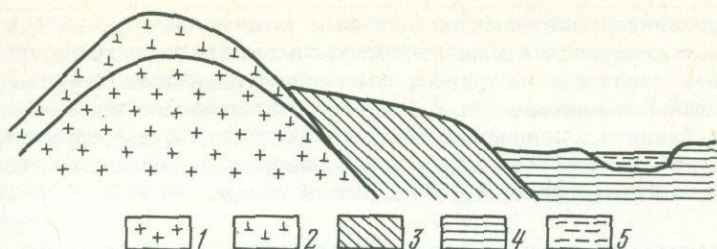


Рис. 7. Сиаллитный ортоэлювий и его производные (2-й вариант). Область аккумуляции легкорастворимых солей отсутствует (транспорт в морские бассейны):

1 — коренные изверженные породы; 2—5 — солесборная область (вынос Cl^- , O_2^- , Ca^{2+} , Na^+ , меньше Mg^{2+} и K^+): 2 — сиаллитный ортоэлювий, 3 — сиаллитный делювий (бескарбонатный), 4 — сиаллитный аллювий (бескарбонатный), 5 — пресное озеро с бескарбонатным сапропелем

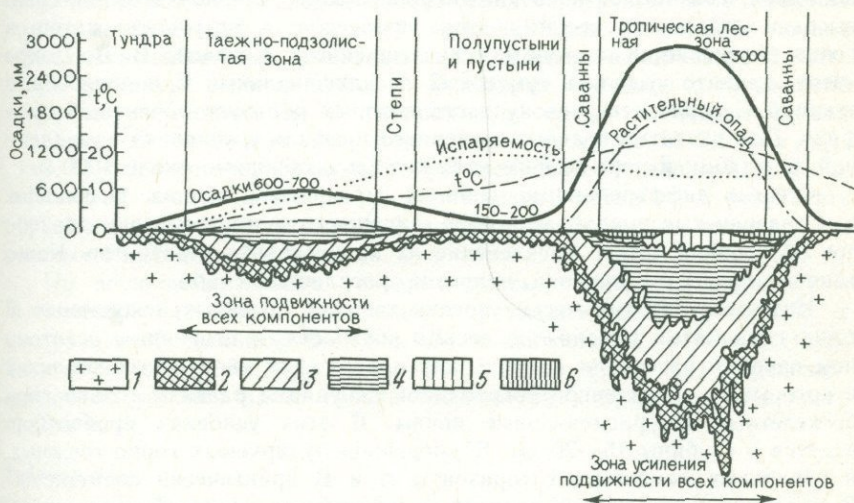


Рис. 8. Схема развития коры выветривания тектонически неактивных площадей в различных ландшафтных зонах. По Н. М. Страхову:

1 — коренные породы; 2 — зона дресвы, химически мало измененной; 3 — гидрослюдисто-монтмориллонит-бейделлитовая зона; 4 — каолинитовая зона; 5 — зона охр; Al_2O_3 , панцирь $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$

в элювиальных условиях изменяются слабо*. Ландшафтно-геохимическая характеристика и биоклиматическая зональность территорий решающим образом зависят от соотношений между количеством осадков, их испаряемостью и среднегодовой температурой местности (рис. 6, 7). Совокупность этих признаков определяет мощность и полноту развития коры выветривания, которую наглядно отражает схема Н. М. Страхова (рис. 8). В условиях замедленной денудации тектонически неактивных площадей отчетливо проявляются различия между формированием кор

* В практике геохимических поисков термины орто-, пара- и неэлювий устойчивого применения не получили (прим. ред.).

выветривания в ландшафтах пустынь и полупустынь аридной зоны и теми же процессами в ландшафтах тропических лесов гумидной зоны. Таежно-подзолистые ландшафты умеренно теплой зоны занимают промежуточное положение. За одинаковое геологическое время процессы выветривания в ландшафтах арктической тундры будут оставаться на первой, обломочной стадии, а в ландшафтах тропических лесов они способны достигнуть четвертой, аллитной стадии.

1.26. ТИПЫ ПОЧВЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

При наземных литохимических поисках по вторичным ореолам рассеяния в большинстве случаев опробуются почвы. Знание почв района дает возможность выявить особенности распределения элементов с глубиной, определить рациональную глубину пробоотбора, отбраковать безрудные аномалии, связанные с почвенными процессами. Для почвы характерна высокая активность геохимических процессов, в результате которых почва расчленяется на генетические горизонты. Согласно В. В. Докучаеву, принято выделять гумусовый А, иллювиальный В и почвообразующий С горизонты, совокупность которых образует почвенный профиль. Для развития полного почвенного профиля в условиях замедленной денудации и нормального увлажнения необходимо около 1000 лет.

Степень дифференциации почв на горизонты различна. В солонце и в подзолистых почвах, например, сложность и многообразие процессов обусловили четкое расчленение их на несколько горизонтов. Каштановые почвы и солончаки, напротив, расчленены слабо.

Наземные литохимические поиски твердых полезных ископаемых в горно-складчатых районах по весьма контрастным вторичным остаточным ореолам рассеяния ведутся, как правило, на «неудобных землях», в которых из-за активной современной денудации развиты только грубоскелетные и фрагментарные почвы. В этих условиях пробоотбор ведется с глубины 15—20 см. В умеренноденудированных горно-таежных и тундровых ландшафтах горизонты А и В практически совмещены. В условиях замедленной денудации на склонах северной экспозиции при наличии устойчивой («вечной») мерзлоты, а также в районах развития моренно-ледниковых отложений Европейского Севера (без мерзлоты) нередко развивается мощный горизонт мхов, растительных остатков и торфов (до 0,6 м и более), затрудняющий пробоотбор. Проблема опробования горизонта А при геохимических поисках окончательно не решена.

Максимальное внимание к характеру почвообразовательных процессов необходимо в условиях сглаженного рельефа, в основных сельскохозяйственных районах, в горно-луговых, степных и пустынных ландшафтах, при геохимических поисках месторождений нефти и газа путем наземных автомобильных и воздушных съемок и, особенно, при поисках погребенных рудных месторождений по их наложенным ореолам рассеяния. Выявляемые при этих съемках слабые геохимические аномалии соизмеримы по амплитуде с колебаниями содержаний микроэлементов вследствие изменения типа почв или непостоянства глубины пробоотбора.

Важнейшая геохимическая особенность почвообразования заключается в процессах разложения органических веществ микроорганизмами. С геохимических позиций разложение органического вещества — процесс окислительно-восстановительный. Важное значение имеют также щелочно-кислотные условия почв. В целом, это наиболее универсальные и интегральные показатели, характеризующие условия миграции химических элементов. Они легко диагностируются химически и морфологически.

По окислительно-восстановительному режиму все почвы делятся на три основные группы.

1. Почвы с преобладанием окислительной среды. Это разнообразные горные почвы и автоморфные почвы хорошо дренируемых равнин.

2. Почвы с восстановительной глеевой обстановкой, формирующиеся при избыточном увлажнении и недостатке свободного кислорода. Нередко такие почвы имеют окислительную среду в верхней части профиля и восстановительную — в нижней, или наоборот. В глеевых почвах образуются подвижные органические соединения, в комплексе с которыми мигрируют многие металлы. Некоторые элементы с переменной валентностью, подвижные в окислительной среде, в глеевых почвах мигрируют слабо и могут здесь концентрироваться (Mo, V, Cr, Se и др.).

3. Почвы с восстановительной сероводородной обстановкой. Для них характерна низкая подвижность большинства металлов в результате образования нерастворимых сульфидов. Это почвы многих солончаков и соленых болот степей и пустынь.

По щелочно-кислотным условиям почвы можно сгруппировать в 5 основных классов: с сильнокислой реакцией среды ($pH < 4,5$), с кислой и слабокислой ($pH = 4,5 \dots 6,5$), с нейтральной ($pH = 6,5 \dots 7,5$), щелочной ($pH = 7,5 \dots 8,5$) и сильнощелочной ($pH > 8,5$). Щелочно-кислотные условия часто сильно изменяются в пределах почвенного профиля.

Таблица 33

Геохимические барьеры в некоторых типах почв

Типы почв	Почвенный горизонт	Тип геохимического барьера
Подзолисто-элювиально-глееватые	A	Кислородный
	B	Глеевый
Подзолы иллювиально-железистые	B	Сорбционный
Подзолы иллювиально-гумусовые	B	Сорбционный
Дерново-среднеподзолистые глубинно-глееватые	B	Сорбционный, глеевый
Луговые	B	Сорбционный
Черноземы обыкновенные	B	Щелочной
Темно-каштановые и каштановые	B	Щелочной
Солонцы автоморфные	B	Сорбционный
Солончаки луговые	A	Кислородный; испарительный
Солоди	A	Кислый
	B	Сорбционный, щелочной
	C	Глеевый

На поведение химических элементов в почве большое влияние оказывают геохимические барьеры, часто представляющие собой границы между горизонтами. Концентрация элементов на геохимических барьерах зависит от класса барьера и состава вод, поступающих к нему (табл. 33).

1.27. КОЭФФИЦИЕНТ БИОЛОГИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Коэффициент биологического поглощения элементов A_x характеризует интенсивности поглощения растениями элементов из почвы: $A_x = C_x/P_x$, где C_x — содержание элементов в золе растений; P_x — содержание его в почве или породе (табл. 34). Ранжированные значения A_x образуют ряды биологического поглощения, характерные для данного ландшафта, и позволяют установить возможность формирования безрудных аномалий в горизонте А почв биогенного накопления элементов. Такое накопление возможно только для элементов, у которых $A_x > 1,0$.

Таблица 34

Состав золы наземных растений и коэффициенты биологического поглощения. По А. И. Перельману

Элемент	Кларк литосферы	Средний состав золы наземных растений C_x	Коэффициент биологического поглощения A_x
Кремний	27,6	n	$0, n$
Алюминий	8,96	$0, n$	$0, 0n$
Железо	5,2	$0, n - n(n < 2)$	$0, n$
Кальций	3,60	$n \cdot 10(n < 2)$	n
Натрий	2,64	n	n
Калий	2,60	$n \cdot 10(n < 3)$	n
Магний	2,10	$n(n < 5)$	n
Титан	$9 \cdot 10^{-2}$	$0, 0n$	$0, 0n$
Марганец	$8 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-2}$	$0, n$
Фосфор	$5 \cdot 10^{-2}$	$n(n < 5)$	$n \cdot 10$
Сера	$5 \cdot 10^{-2}$	$n(n < 5)$	$n \cdot 10$
Барий	$5 \cdot 10^{-2}$	$0, 0n$	$0, n$
Хлор	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$n(n < 5)$	$n \cdot 10$
Стронций	$4 \cdot 10^{-2}$	$0, 0n$	n
Рубидий	$2 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-3}$	$0, n$
Фтор	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$0, 0n$	$0, n$
Хром	$2 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-4}$	$0, 0n$
Цирконий	$2 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-4}$	$0, 00n$
Ванадий	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$n \cdot 10^{-3}$	$0, n$
Медь	$7 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-3}$	$0, n - n$
Никель	$8 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-3}(n < 5)$	$0, n - n$
Литий	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}$	$0, 0n$
Цинк	$5 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-3}(n < 5)$	n
Олово	$4 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}$	$0, 0n$
Кобальт	$3 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}$	$0, n - n$
Иод	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}$	$0, n - n$
Лантан	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-2}$	$0, 0n$
Свинец	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-4}(n < 5)$	$0, 0n$
Ниобий	$1 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-5}$	$0, 00n$
Германий	$7 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-3}$	$0, 0n$
Цезий	$7 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-4}$	$0, n$

Элемент	Кларк литосферы	Средний состав золы наземных растений C_x	Коэффициент биологического поглощения A_x
Скандий	$6 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-6}$	$0,00n$
Мышьяк	$5 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-4}$	$n - 0, n$
Гафний	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-7}$	$0,00n$
Бор	$3 \cdot 10^{-4}$	$0,0n - 0,00n$	n
Молибден	$3 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-4} (n < 5)$	$n - 0, n$
Уран	$3 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-5}$	$0,0n$
Тантал	$2 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-7}$	$0,00n$
Вольфрам	$1 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-7}$	$0,00n$
Селен	$6 \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-5}$	n
Ртуть	$7 \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-6}$	$0, n$
Осмий	$5 \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-8}$	$0,00n$
Палладий	$1 \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-8}$	$0,00n$
Платина	$5 \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-10}$	$0,00n$
Рутений	$5 \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-9}$	$0,00n$
Родий	$1 \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-9}$	$0,00n$
Рений	$1 \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-10}$	$0,00n$
Радий	$1 \cdot 10^{-10}$	$n \cdot 10^{-11}$	$0, n$
Иридий	$1 \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-10}$	$0,00n$

1.28. КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ НОМЕНКЛАТУРА

Основой для производства геохимических съемок служат топографические карты и планы. Региональные, поисковые и детальные геохимические съемки ведутся на основе топографических карт ближайшего более крупного или того же масштаба с использованием контактной печати аэрофотосъемки. При отсутствии топографической основы в масштабе детальных геохимических съемок она подготавливается путем фотомеханического увеличения из более мелкого масштаба или заменяется составлением полуинструментальных топографических схем в процессе геохимических работ. Крупномасштабные съемки в рудниках ведутся на основе погоризонтных маркшейдерских планов и разрезов.

Топографические карты и планы составляются в проекции Гаусса применительно к референц-эллипсоиду Ф. Н. Красовского. Абсолютные высоты точек определяются в Балтийской системе от нуля Кронштадского футштока.

Номенклатура (обозначение) листов топографических карт определяется принятой разграфкой. За начало разграфки принимаются листы карты масштаба 1:1 000 000, ограниченные параллелями через 4° по широте и меридианами через 6° по долготе. Номенклатура листа карты масштаба 1:1 000 000 состоит из букв латинского алфавита, которыми земная поверхность делится на ряды по широте к северу и к югу от экватора, и номера колонны, которые обозначаются арабскими цифрами на восток от меридиана 180° (от Гринвича). Всего колонн 60; если счет ведется от 0° — колонны называются зонами, номера зон отличаются от колонн на 30 единиц.

Лист карты масштаба 1:1 000 000 разделяется на 4 листа масштаба 1:500 000, которые обозначаются прописными буквами русского алфавита А, Б, В, Г на 36 листов масштаба 1:200 000, которые нуме-

руются римскими цифрами I—XXXVI, и на 144 листа масштаба 1:100 000, которые нумеруются арабскими цифрами. Последующая номенклатура карт более крупных масштабов (до 1:2 000 включительно) строится на развитии обозначений присвоенных листам масштаба 1:100 000. Четыре листа масштаба 1:50 000, на которые разделяется трапеция масштаба 1:100 000, обозначаются прописными буквами русского алфавита А, Б, В, Г. Четыре листа масштаба 1:25 000, на которые делится каждая трапеция масштаба 1:50 000, обозначаются строчными русскими буквами а, б, в, г. Трапеция масштаба 1:25 000 делится на 4 листа масштаба 1:10 000, обозначаемые арабскими цифрами. Трапеция масштаба 1:100 000 содержит 256 листов масштаба 1:5 000, которые нумеруются арабскими цифрами, заключенными в круглые скобки. Трапеция масштаба 1:5 000 разделяется на 9 листов масштаба 1:2 000, которые обозначаются строчными буквами русского алфавита а, б, в, г, д, е, ж, з, и.

Для крупномасштабных топографических и маркшейдерских планов площадью менее 20 км² используется прямоугольная разграфка с размерами рамок листов для масштаба 1:5 000 40×40 см, для масштабов 1:2 000...1:500 — 50×50 см. Этим размерам целесообразно подчинять картографирование результатов детальных геохимических съемок. Для совмещения смежных листов загибаются правые (восточные) и нижние (южные) зарамочные обрамления карт.

Примеры номенклатуры топографических карт различного масштаба и размера листов приведены в табл. 35.

По мере продвижения от экватора к полюсам, площади трапеций уменьшаются вследствие сближения меридианов, что иллюстрируют средние размеры карт масштаба 1:200 000: ряд К — площадь листа 6120 км²; ряд L — 5740 км²; ряд М — 5315 км²; ряд N — 4885 км² и т. д. В полярной области листы топографических карт содержат по две трапеции, смежных по долготе.

Таблица 35

Размеры и номенклатура топографических карт

Масштаб карты	Размер трапеции		Примеры номенклатуры
	по широте	по долготе	
А 1:1 000 000	4°	6°	К—42
Б 1:500 000	2°	3°	К—42—Б
В 1:200 000	40'	1°	К—42—XXIII
Г 1:100 000	20'	30'	L—40—103
а 1:50 000	10'	15'	L—40—103—Г
б 1:25 000	5'	7'30''	L—40—103—Г—а
в 1:10 000	2'30''	3'45''	М—45—129—А—а—2
г 1:5 000	1'15''	1'52,5''	М—45—129—(226)
д 1:2 000	25''	37,5''	М—45—129—(226—ж)

ОСНОВЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

2.1. СТАДИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОГО ПРОЦЕССА

В основу геологоразведочного процесса положен принцип последовательного укрупнения масштаба и углубления содержания исследований по мере перехода от изучения обширных территорий к локальным участкам, определяющий стадийность работ. В СССР применительно к твердым полезным ископаемым установлено восемь стадий геологоразведочного процесса (табл. 36). Каждой стадии соответствует определенный вид и масштаб геохимических съемок, изменяющихся в зависимости от экономического и географического положений территорий. Геохимические поиски нефти и газа ведутся по четырехстадийному циклу.

Региональное геологическое изучение территории СССР в масштабе 1:1 000 000 закончено и поисковые геохимические съемки в этом масштабе

Таблица 36
Стадии геологоразведочного процесса и оценка прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых [17, 21]

Стадии	Виды и масштабы геохимических съемок	Категории ресурсов
Региональное геологическое изучение территории СССР; а) региональные геолого-геофизические исследования масштаба 1:1 000 000 — 1:500 000; б) региональные геофизические, геологосъемочные, гидрогеологические и инженерно-геологические работы масштаба 1:200 000 (1:100 000)	Региональные геохимические съемки: наземные (1:200 000 и мельче), аэрогеохимические (1:100 000 и мельче)	P ₃
Геологические работы масштаба 1:50 000 (1:25 000) с общими поисками Поисковые работы	Поисковые геохимические наземные и воздушные съемки (1:50 000—1:25 000) Глубинные геохимические съемки (1:100 000—1:50 000)	P ₂
Поисково-оценочные работы	Детальные литохимические съемки по вторичным ореолам рассеяния: наземные (1:10 000 и крупнее), глубинные (1:25 000). Поиски по первичным ореолам (1:10 000 крупнее)	P ₁
Предварительная разведка Детальная разведка Доразведка месторождения а) не освоенного промышленностью; б) разрабатываемого Эксплуатационная разведка	Литохимические исследования в масштабах 1:1 000—1:200 путем сплошного опробования рудовмещающих пород и руд по горным выработкам и керну скважин	P ₁ — C ₂

в нашей стране не ведутся. Проведение их возможно в развивающихся странах Азии, Африки и Латинской Америки. Наземные геохимические съемки масштаба 1:200 000 проводятся на больших площадях в горных, расчлененных районах с целью поисков месторождений по их потокам рассеяния в гидросети. Эти работы сочетаются с аэрогаммаспектрометрическими съемками с масштабах 1:100 000 или мельче, хотя обычно аэрогеохимические съемки проводятся в более крупных масштабах, соответствующих следующей стадии работ.

На стадии геологосъемочных работ масштаба 1:50 000 (1:25 000) с общими поисками и стадии поисковых работ геохимические съемки выполняются в масштабах 1:100 000—1:25 000 в воздушном, наземном и глубинном вариантах. Эти съемки ориентируются на выявление месторождений по их лито-, гидро-, атмо- или биогеохимическим ореолам рассеяния.

Поисково-оценочные работы сопровождаются детальными литохимическими съемками масштаба 1:10 000 на рудоперспективных участках, выявленных и оконтуренных съемками масштаба 1:50 000. При необходимости детальность литохимических съемок по вторичным ореолам рассеяния может доводиться до масштабов 1:5 000—1:2 000 в сочетании с поисками по первичным ореолам. Глубинные литохимические съемки в закрытых районах при мощности чехла до 200 м чаще ограничиваются масштабом 1:25 000.

На стадиях предварительной и детальной разведки и доразведки месторождений, а также эксплуатационной разведки геохимические работы ориентированы, главным образом, на поиски слепых рудных тел на флангах и глубоких горизонтах месторождений по их первичным ореолам. Работы ведутся путем сплошного литохимического опробования рудовмещающих пород и руд по горным выработкам и скважинам в масштабах до 1:1000 (1:200).

Результаты геохимических съемок на всех стадиях геологоразведочного процесса представляются в виде геохимических карт с цифрами прогнозных ресурсов по категориям возрастающей достоверности.

2.2. МЕТОДЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В основе геохимических методов поисков лежат издавна существовавшие геологические приемы выявления полезных ископаемых по их прямым признакам на поверхности — метод «кисхаживания», обломочно-речной, шлиховой, валунно-ледниковый, по выходам руд, горючих газов или нефтепроявлений. Современные геохимические методы прогноза, обнаружения и оценки месторождений минерального сырья, основанные на исследовании геохимического поля и его локальных аномалий, являются развитием этих принципов на новой научной базе, созданной успехами теоретической геохимии и прогрессом в аналитической технике. Научный приоритет в создании и широком применении этих методов принадлежит Советскому Союзу.

В 1931—32 гг. Н. И. Сафронов предложил и впервые применил на практике «физико-химический» метод поисков рудных месторождений

путем определения содержаний металлов в почвах и водах новейшими средствами экспресс-анализа [8, 10]. Одновременно и независимо В. А. Соколов предложил «метод газовой съемки» для поисков нефтяных месторождений путем определения содержаний углеводородных газов в почвенном воздухе. Позднее опыты по биогеохимическим поискам рудных месторождений были начаты Н. Брундиным и С. Палмквистом в Швеции (1936—39 гг.).

Уже в довоенные годы новые геохимические методы поисков получили в СССР производственное применение и в рудных районах Забайкалья и Чукотки привели к первым промышленным открытиям (Н. И. Сафронов, А. П. Соловов, А. М. Виноградов и др.). Накопленный к этому времени опыт геохимических поисков был в начале 1941 г. обобщен Е. А. Сергеевым.

С 1947 г. на основе советского опыта была начата разработка геохимических методов поисков рудных месторождений в США (Х. Е. Хоукс) и Великобритании (Дж. С. Уэбб), несколько раньше в нефтеносных районах США получила применение газовая съемка. В последующие годы зарубежные геохимики добились существенных успехов в развитии методики и техники геохимических поисков [48, 49]. В настоящее время геохимические методы поисков широко применяются во всем мире.

Геохимические поиски осуществляются путем геохимических съемок — планомерного определения содержаний химических элементов по системе прямолинейных, ломаных или криволинейных профилей (маршрутов) на поверхности или на глубине, с непрерывными или точечными измерениями, образующими участок геохимической съемки. Соответственно характеру вещества, исследуемому в геолого-поисковых целях, различают литохимический, гидрохимический, атмосферический и биогеохимический методы поисков и одноименные им виды геохимических съемок. При литохимических съемках исследуется химический состав горных пород, продуктов их выветривания и почв, при гидрохимических съемках — состав природных поверхностных и подземных вод. Атмосферические съемки основаны на исследовании газового состава подземной и приземной атмосферы, при биогеохимических съемках исследуется химический состав живого вещества.

Геохимические съемки могут проводиться с пробоотбором или без пробоотбора, путем контактного или дистанционного определения содержаний химических элементов или их соединений с помощью специальных датчиков. Измерения содержаний химических элементов без пробоотбора часто называют «геофизическим опробованием», что не изменяет его сущности как средства изучения геохимического поля. В настоящее время еще нет дистанционных методов и приборов для одновременного определения содержаний необходимого числа химических элементов с чувствительностью, удовлетворяющей требованиям геохимических поисков. Поэтому поисковые геохимические съемки в основном выполняются с пробоотбором.

Геохимические поиски проводятся в форме наземных (пешеходных или автомобильных), воздушных (самолетных или вертолетных) и подземных съемок. В составе последних выделяются собственно подземные геохимические съемки в рудниках с опробованием стенок горных

выработок, геохимический каротаж, исследования керна, шлама и бурового раствора скважин и глубинные геохимические съемки с пробоотбором или без пробоотбора на постоянной глубине от поверхности более 3 м или на уровне постоянного геологического горизонта. Геохимические съемки на глубине менее 3 м считаются наземными. Возможны наводные (речные, озерные и морские) и подводные (на глубине, с измерениями и пробоотбором в толще воды, или из дна водоемов, в частности, на шельфе) геохимические съемки. В поисковых целях возможно геохимическое опробование снега, атмосферной пыли или легколетучих металлоорганических соединений.

При поисках твердых полезных ископаемых, в первую очередь рудных месторождений, важнейшее значение имеют различные литохимические методы. В ближайшие годы, по мере перехода к работам в закрытых рудных районах, следует предвидеть увеличение роли атмосферических съемок. При геохимических поисках месторождений нефти и газа основная роль принадлежит атмосферическому методу. Весьма эффективны различные виды гамма-спектральных съемок, особенно аэрогеохимические, а также съемки с приборами, определяющими на месте содержания одного химического элемента, в частности, ртути, бериллия, бора, фосфора, конкретных соединений (например, CH_4 , CO_2) или суммы нескольких рудных элементов (РПК—103, «Поиск» и др.).

Поисковые геохимические съемки любых видов ведутся в последовательно укрупняющихся масштабах — от рекогносцировочных (на обширных территориях) до весьма детальных поисково-оценочных (на локальных участках). Плотность пробоотбора при этом изменяется от одной пробы на 100—250 км² до 500 и более проб на 1 км². Для отнесения съемок к определенному масштабу плотность наблюдений должна соответствовать существующим требованиям (см. 2.15). Съемки масштаба 1:50 000 и мельче ведутся в рамках трапеций международной разграфки.

При мелкомасштабных геохимических съемках одновременно определяются содержания 36—40 химических элементов, иногда до 55 элементов. При атмосферических поисках газонефтяных месторождений в пробах определяются содержания метана, тяжелых углеводородов и некоторых других газов. По мере укрупнения масштаба съемок число определяемых элементов сокращается.

Данные геохимических съемок изображаются в форме графиков содержаний элементов-индикаторов по профилям, карт изоконцентрат, погоризонтных планов и геохимических разрезов, а также подвергаются различным видам математической обработки, в том числе с применением ЭВМ. С учетом статистических параметров местного геохимического фона выделяются геохимические аномалии (см. 2.5, 2.6), которые рассматриваются как возможные признаки наличия полезных ископаемых. Общее число аномалий, выявляемых при геохимических поисках, заведомо и многократно превышает число возможных промышленных месторождений минерального сырья. Поэтому важнейшей проблемой геохимических поисков является оценка обнаруженных аномалий, которая в благоприятных случаях заканчивается подсчетом прогнозных ресурсов полезного ископаемого. Окончательное выражение

результаты геохимических поисков получают после проведения разведочных горных и буровых работ и подсчета выявленных запасов минерального сырья промышленных категорий.

В СССР за последние 50 лет по геохимическим данным выявлены многие промышленные месторождения цветных, редких металлов и золота, в том числе оловорудные Валькумей на Чукотке (1938) и Арсеньевское в Приморье (1957), золоторудное Мурунтау в Узбекистане (1955), полиметаллические Узунжал (1956), Шалкия (1960), Чекмарь, группа месторождений Атасуйского района, медные Актогай (1974) и Айдарлы (1977), редкометальное Южный Коктенколь (1957) в Казахстане и ряд других. Расширяется применение геохимических методов поисков нефти и газа. В зарубежных странах за последние годы по геохимическим данным открыты месторождения цветных металлов и золота во Франции, свинцово-цинковые в Ирландии, медное месторождение Казино в Канаде, крупное золоторудное месторождение в Китае, очень крупное медное месторождение Салобо в Бразилии и ряд других [49].

Поисковая геохимическая изученность СССР недостаточна: в масштабе 1:50 000 по вторичным ореолам рассеяния в контуре видимых выходов палеозоя и докембрия опоискованы рудные районы Казахстана; значительные площади Магаданской области опоискованы по потокам рассеяния в масштабе 1:200 000. Геохимическая опоискованность ряда рудных районов остается неравномерной, часть ранее проведенных съемок не соответствует современным техническим требованиям. По межгосударственной программе «Северный Каллот» ведется сплошная геохимическая съемка Швеции, Норвегии и Финляндии, успешно и с высокой эффективностью выполняется геохимическая съемка всей территории Китая, государственные программы поисковых геохимических съемок приняты в ряде других стран. В СССР такая программа пока отсутствует, хотя необходимость ее очевидна.

2.3. ПЕРВИЧНЫЕ ОРЕОЛЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Первичные ореолы месторождений — геохимические зоны, окаймляющие рудные тела (месторождения), обогащенные или обедненные химическим элементом в результате его привноса, выноса или перераспределения в процессе рудообразования. Вокруг рудных тел существуют аномальные по сравнению с фоном концентрации многих элементов, применительно к которым целесообразно использовать термин «первичные ореолы», обозначающий совокупность ореолов всех элементов, участвовавших в процессе.

Определение «первичный» отражает одновременность формирования ореолов и рудных тел. Другие генетические особенности первичных ореолов могут быть определениями «эндогенный» (ореол), «экзогенный», «метаморфогенный». Сложный по генезису и составу первичный ореол, образованный в результате совмещения в пространстве оруденения различных формаций, обозначается термином «полиформационный».

Рудное тело и его первичный ореол, слагающие совместно рудную зону, представляют собой единое образование. Граница между ними

условна и определяется существующими (и со временем меняющимися) бортовыми содержаниями металла и кондициями руд. Термин «первичные ореолы» не следует дополнять словом «рассеяния», поскольку они формируются в процессе рудоотложения, т. е. концентрации химических элементов, а не их рассеяния.

Наиболее детально изучены ореолы привноса химических элементов. Большое практическое значение ореолов привноса определяется тем, что они образуются элементами, типоморфными для рудных тел, и являются прямыми индикаторами последних, тогда как вынос элементов мог произойти как в собственно рудную стадию, так и в процессе дорудной или послерудной проработки вмещающих пород. Для изучения ореолов выноса необходима повышенная чувствительность анализа, которая для многих элементов остается недостаточной.

В качестве примера на рис. 9 в разрезе изображены первичные геохимические ореолы, развитые вокруг слепого полиметаллического месторождения Восточный Канимансур (Средняя Азия).

В строении ореолов проявлена вертикальная геохимическая зональность, которая выражается в отчетливом сдвиге по вертикали ореолов отдельных элементов друг относительно друга: ореолы Ba и As наиболее широки и контрастны в верхних частях описываемого разреза (надрудные ореолы). В противоположность этому ореолы Mo, Co, Cu и Bi характерны только для нижних частей разреза (подрудные ореолы). Ореолы Pb и Zn наиболее интенсивны и широки на уровне рудных тел (околорудные ореолы). Для первичных геохимических ореолов характерно согласное с рудными телами развитие (см рис. 9).

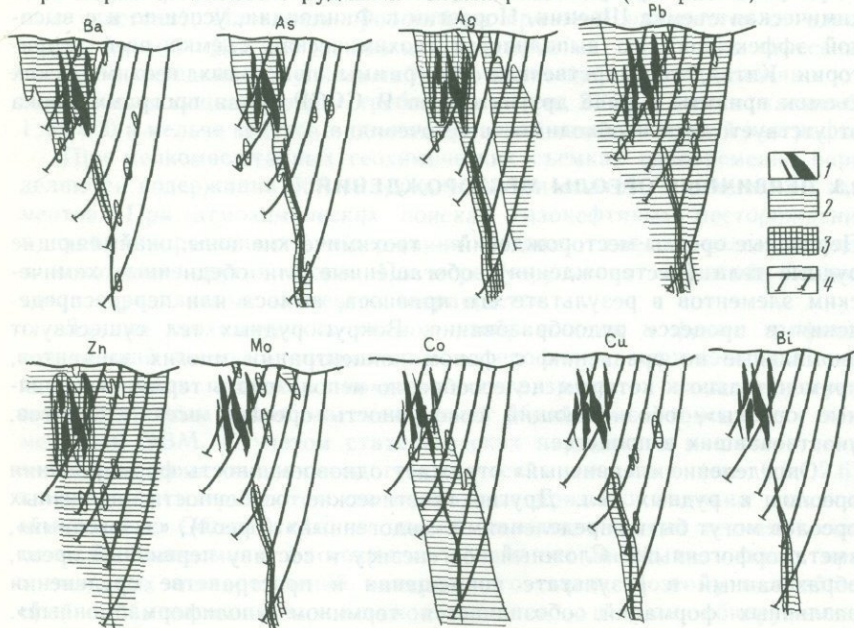


Рис. 9. Первичные геохимические ореолы месторождения Канимансур:
1 — рудные тела; 2 — первичные ореолы; 3 — поля повышенных концентраций; 4 — скважины

Согласное развитие ореолов устанавливается и на месторождениях, где рудные тела имеют пологое (субгоризонтальное) залегание. Типичным примером этого служат первичные ореолы скарново-полиметаллического месторождения Тутлы-1 (Курусайское рудное поле, ТаджССР). Характерная особенность выявленных на месторождении ореолов — их резкая вытянутость в горизонтальной плоскости вдоль рудных тел, по размерам эти ореолы существенно превосходят рудные тела (рис. 10).

Согласное с рудными телами развитие первичных ореолов наиболее распространено, но не единственно возможное: иногда вокруг рудных тел пологого залегания развиваются первичные ореолы крутого падения. Подобные ореолы, в частности, установлены на скарново-полиметаллическом месторождении Николаевское в Приморье (рис. 11). Ореолы этого месторождения имеют значительную вертикальную протяженность (более 850 м). По особенностям развития первичных ореолов Николаевское месторождение несмотря на пологое залегание является аналогом месторождений с крутопадающими телами. Причина подобного несогласного развития первичных ореолов заключается в геологоструктурных условиях локализации оруденения. Месторождение фор-

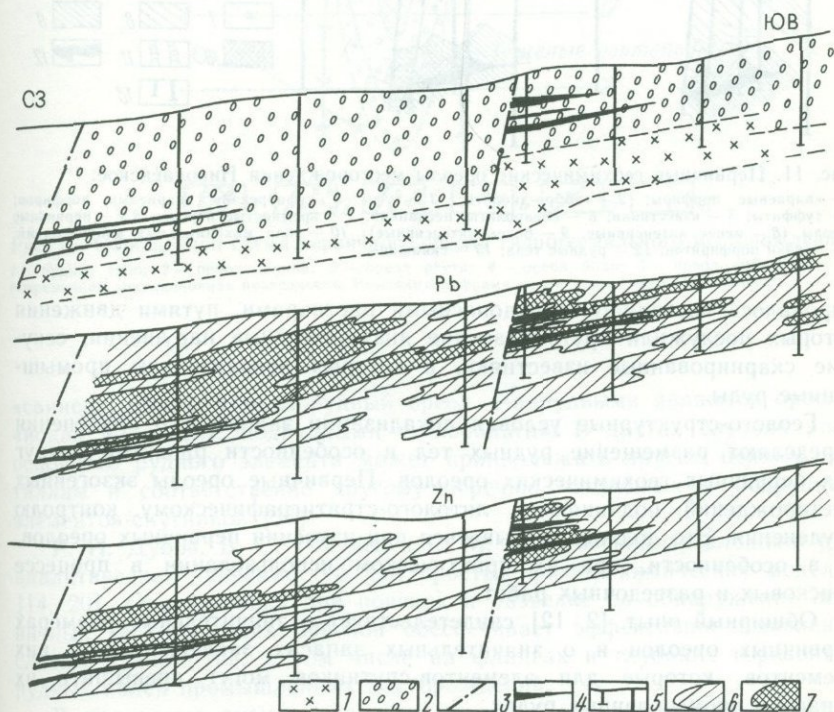


Рис. 10. Первичные геохимические ореолы месторождения Тутлы-1:

1 — андезит-дацитовые порфиры; 2 — известково-аркозовые конгломераты; 3 — дизъюнктивные нарушения; 4 — рудные тела; 5 — скважины; 6 — первичные ореолы; 7 — поля повышенных концентраций

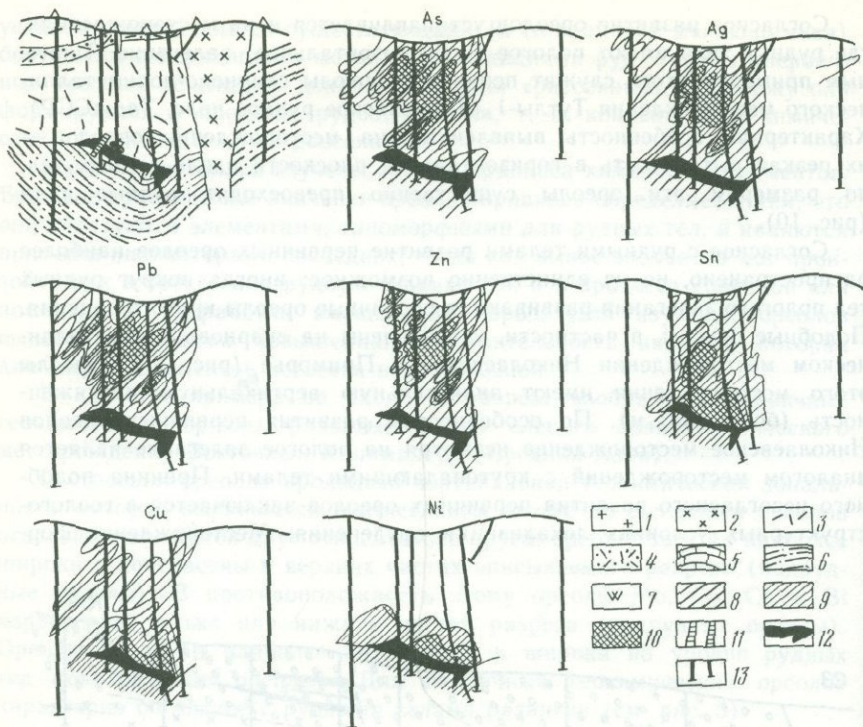


Рис. 11. Первичные геохимические ореолы месторождения Николаевское:

1 — кварцевые порфиры; 2 — габбро-диориты; 3 — туфы и туфобрекчи кварцевых порфиров; 4 — туффиты; 5 — известняки; 6 — алевролиты, песчаники; 7 — кремнистые породы; 8, 9 — первичные ореолы (8 — менее интенсивные, 9 — более интенсивные); 10 — поля максимальных концентраций; 11 — дайки порфиров; 12 — рудные тела; 13 — скважины

мировалось восходящими рудоносными растворами, путями движения которых послужили крутопадающие дизъюнктивные нарушения, секущие скарированные известняки, в которых локализованы промышленные руды.

Геолого-структурные условия локализации эндогенного оруденения определяют размещение рудных тел и особенности развития вокруг них первичных геохимических ореолов. Первичные ореолы экзогенных месторождений подчиняются литолого-стратиграфическому контролю оруденения. Это должно учитываться при изучении первичных ореолов, и, в особенности, при их практическом использовании в процессе поисковых и разведочных работ.

Обширный опыт [2, 12] свидетельствует о значительных размерах первичных ореолов и о значительных запасах заключенных в них элементов, которые для элементов-спутников могут превышать их запасы в промышленных рудах.

А. П. Соловов предложил обобщенную модель первичных ореолов эндогенных месторождений (рис. 12). Вокруг рудных тел крутого падения основной промышленно ценный элемент, условно названный

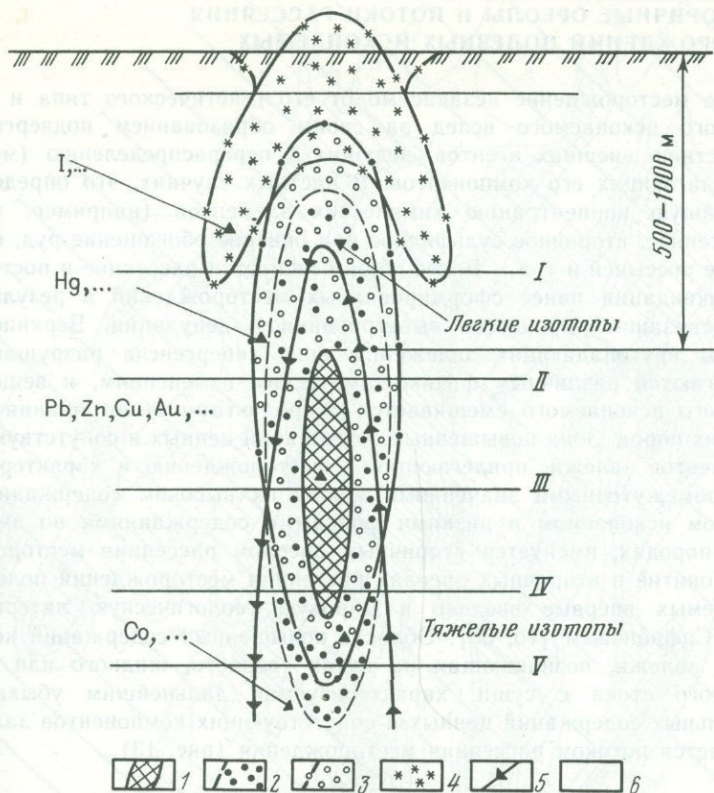


Рис. 12. Обобщенная схема первичного ореола гидротермального месторождения: 1 — рудное тело; 2 — ореол свинца; 3 — ореол ртути; 4 — ореол йода; 5 — ореол кобальта; 6 — современная денудационная поверхность. Римскими цифрами обозначены номера горизонтов

«свинец», образует околорудный ореол. Надрудными являются ореолы «йода» и «ртути», подрудными — «кобальта». В других случаях роль основного рудного элемента может принадлежать другим ценным металлам и соответственно другому перечню надрудных и подрудных элементов-спутников [36].

Р. И. Дубов, В. С. Голубев и Е. М. Квятковский предложили ряд аналитических зависимостей для простых физико-химических моделей [14, 20]. Ориентировка при поисках и разведке на обнаружение первичных геохимических ореолов обеспечивает эффективное выявление слепых рудных тел, в том числе на флангах и глубоких горизонтах рудных полей промышленных месторождений.

В настоящее время первичные геохимические ореолы нефтяных и газовых месторождений слабо изучены. Результаты специализированных геохимических работ позволяют считать, что исследования в этом направлении являются весьма перспективными.

2.4. ВТОРИЧНЫЕ ОРЕОЛЫ И ПОТОКИ РАССЕЙНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Каждое месторождение независимо от его генетического типа и вида полезного ископаемого вслед за своим образованием подвергается воздействию внешних агентов, ведущих к перераспределению (миграции) слагающих его компонентов. В частных случаях, это определяет дальнейшую концентрацию химических элементов (например, метаморфогенное, вторичное сульфидное или окисное обогащение руд, образование россыпей и т. д.). Более общим являются рассеяние и постепенная ликвидация ранее сформированных месторождений в результате взаимосвязанных процессов выветривания и денудации. Верхние горизонты крутопадающих залежей в зоне гипергенеза разрушаются, подвергаются различным физико-химическим изменениям, и вещество полезного ископаемого смешивается с продуктами выветривания вмещающих пород. Зона повышенных содержаний ценных и сопутствующих компонентов залежи, прилегающая к месторождению и характеризующая промежуточными значениями между их высоким содержанием в полезном ископаемом и низкими фоновыми содержаниями во вмещающих породах, именуется вторичным ореолом рассеяния месторождения. Понятие о вторичных ореолах рассеяния месторождений полезных ископаемых впервые введено в мировую геологическую литературу Н. И. Сафроновым [10, 33]. Область повышенных содержаний компонентов залежи, возникающая на путях твердого, жидкого или газообразного стока, характеризующая дальнейшим убыванием аномальных содержаний ценных и сопутствующих компонентов залежи, называется потоком рассеяния месторождения (рис. 13).

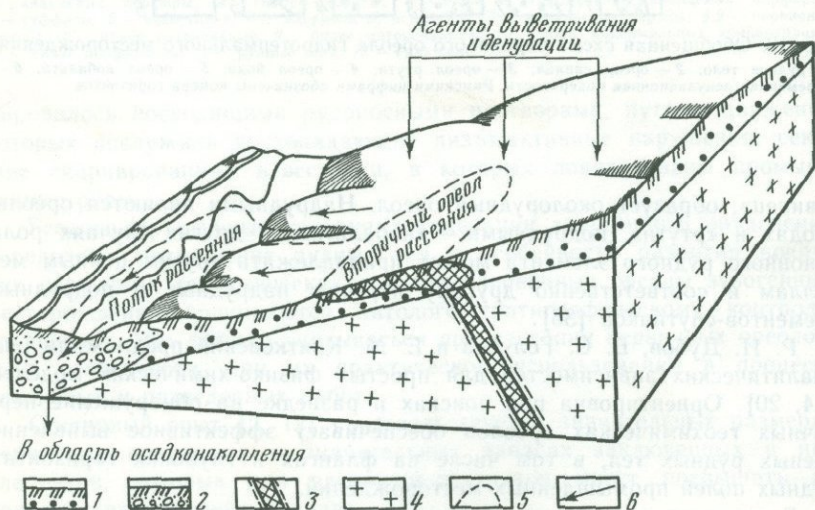


Рис. 13. Блок-диаграмма гипергенного поля рассеяния:

1 — элювиальные; 2 — аллювий; 3 — рудное тело и его первичный ореол; 4 — рудовмещающие породы; 5 — контур аномальных содержаний рудных элементов в продуктах выветривания, в речной воде и в растительности; 6 — направление стока

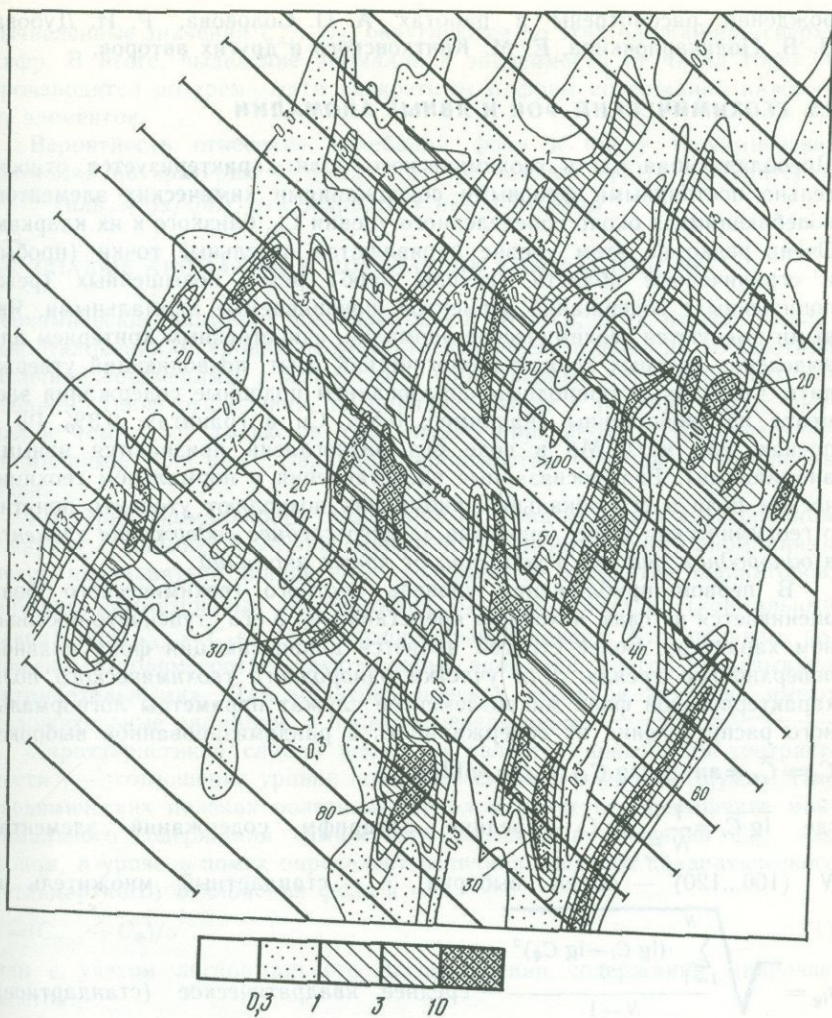


Рис. 14. Вторичные ореолы рассеяния серебра (в усл. ед.). Сеть 50×50 м

Вторичные ореолы рассеяния газовых и нефтяных месторождений образуются в результате диффузии и эффузии газообразных компонентов залежей в перекрывающие породы.

Вторичные ореолы и потоки рассеяния месторождений приближены к дневной поверхности по сравнению с залегающими на глубине полезными ископаемыми и превышают в плане размеры залежей (рис. 14). Поэтому геохимические поиски месторождений полезных ископаемых эффективно ведутся путем выявления их потоков и ореолов рассеяния. Основные закономерности формирования и принципы количественной интерпретации вторичных ореолов и потоков рассеяния рудных место-

рождений рассмотрены в работах А. П. Соловова, Р. И. Дубова, В. В. Поликарпочкина, Е. М. Квятковского и других авторов.

2.5. ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ФОН И ЯВНЫЕ АНОМАЛИИ

Преобладающая часть геохимического поля характеризуется относительно постоянными фоновыми содержаниями химических элементов, колеблющимися около определенного уровня C_{ϕ} , близкого к их кларкам. Очень редко на этом уровне проявляются отдельные точки (пробы) и ограниченные области (группы проб) резко повышенных (реже пониженных) содержаний элементов, признаваемые аномальными. Явными именуется геохимические аномалии, единственным критерием для выделения которых служит геологический опыт, позволяющий утверждать, что данным природным образованием подобные содержания элемента не свойственны (например, 0,5% Си в гранитах, 0,3% Рb в почвах, 250 мг/л Мо в воде без разногласий признаются явными аномалиями). Взаимосвязанные представления о нормальном геохимическом поле и его локальных аномалиях позволяют уточнить понятие о геохимическом фоне, принимая за него *среднее содержание элемента в однородном участке в удалении от явных аномалий*.

В первом приближении уровень местного геохимического фона оценивается на глаз, исходя из представлений о его ступенчато-постоянном характере. Более строгой является аппроксимация фона плавной поверхностью тренда. Для участка однородного геохимического поля характеристикой фона микроэлементов служат параметры логнормального распределения их содержаний C_i в рандомизированной выборке:

$$C_{\phi} = \bar{C}_x = \text{ant lg} (\overline{\lg C_x}) \text{ и } \varepsilon = \text{ant lg } s_{\lg},$$

где $\overline{\lg C_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg C_i$ — средний логарифм содержаний элемента,

N (100...120) — объем выборки, ε — стандартный множитель и

$$s_{\lg} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lg C_i - \overline{\lg C_x})^2}{N-1}} \text{ — среднее квадратическое (стандартное)}$$

отклонение логарифмов содержаний элемента. Геохимический фон макроэлементов аппроксимируется нормальным законом. Вычисление параметров фона производится по программам на микрокалькуляторах и ЭВМ или графически на бланках вероятностной бумаги [14, 37].

За нижний уровень аномальных содержаний элемента для одной точки, согласно Инструкции Мингео СССР, принимается $C_{A,1} = C_{\phi} \varepsilon^3$. Для группы точек с повышенными содержаниями элемента-индикатора, объединяемых общим контуром, но не достигающими нижнего аномального уровня, критерий аномальности понижается согласно зависимости $C_{A,m} = C_{\phi} \varepsilon^{3/\sqrt{m}}$, где $m = 2, 3, 4 \dots 9$ — число точек в контуре (при любом их числе m принимается не более 9, что соответствует $C_{A,\min} = C_{\phi} \varepsilon$).

Поскольку результаты экспресс-анализа (в частности, эмиссионного спектрального) геохимических проб выражаются дискретными цифрами,

вычисленные значения $C_{A1} \dots C_{A9}$ округляются до этих ближайших сверху цифр. В итоге, выделение аномалий в зависимости от числа точек m производится по трем—пяти конкретным цифрам содержаний каждого из элементов.

Вероятность отнесения колебаний фона к числу геохимических аномалий по критерию ϵ^3 (или $+3s$) составляет 0,0014, по критерию $\epsilon^{3/\sqrt{m}}$ (или $+3s/\sqrt{m}$) она возрастает незначительно.

2.6. СЛАБЫЕ АНОМАЛИИ И ПОКАЗАТЕЛЬ КонтРАСТНОСТИ

Геохимические аномалии называются слабыми, если их максимальные отклонения от уровня местного геохимического фона по абсолютной величине соизмеримы с амплитудой свойственных ему природных колебаний. Такие отклонения, не принадлежащие к разряду явных аномалий (см. 2.5), только в том случае признаются геохимическими аномалиями, если они с заданной вероятностью отличаются от уровня фона.

Критерий аномальности отклонений от фона является двусторонним и наряду с повышенными значениями поля геохимическими аномалиями могут признаваться пониженные содержания элементов-индикаторов, согласно симметричных зависимостей $C_{Am} = C_{\phi} \pm 3s/\sqrt{m}$ (нормальный закон) или $C_{Am} = C_{\phi} e^{\pm 3/\sqrt{m}}$ (логнормальный закон). Как правило, пониженным полям соответствуют слабые аномалии, иногда их называют «отрицательными». Для практики поисков основное значение имеют положительные аномалии, в первую очередь явные.

Характеристикой слабой аномалии является показатель контрастности γ — «отношение уровня полезного сигнала к уровню шума». При геохимических поисках полезным сигналом является превышение максимального содержания химического элемента в аномалии C_{\max} над фоном, а уровень помех определяет величина среднего квадратического (стандартного) отклонения фона s или

$$\gamma = (C_{\max} - C_{\phi})/s \quad (1)$$

или с учетом логнормального распределения содержаний микроэлементов:

$$\gamma = \frac{\lg C_{\max} - \lg C_{\phi}}{s_{\lg}} = \frac{1}{\lg e} \lg \left(\frac{C_{\max}}{C_{\phi}} \right) \quad (2)$$

На рис. 15 приведен пример сравнения контрастности двух слабых аномалий, имеющих одинаковое превышение над уровнем фона ($C_{\max} - C_{\phi} = 20$) при разных параметрах геохимического фона.

Выражение (2) является основным для оценки контрастности слабых геохимических аномалий при сравнении эффективности различных геохимических методов их выявления. При значениях $\gamma \geq 3$ аномалия надежно выявляется уже одной точкой наблюдения; при $1 \leq \gamma \leq 3$ для ее выявления необходимо попадание в контур аномалии C_{Am} соответственно $m = 2, 3, 4 \dots 9$ коррелирующих точек ($m \neq 9$); при значениях $\gamma < 1$ аномалия не обнаруживается. Это не значит, что она отсутствует, в этом случае обнаружение аномалии возможно с применением спе-

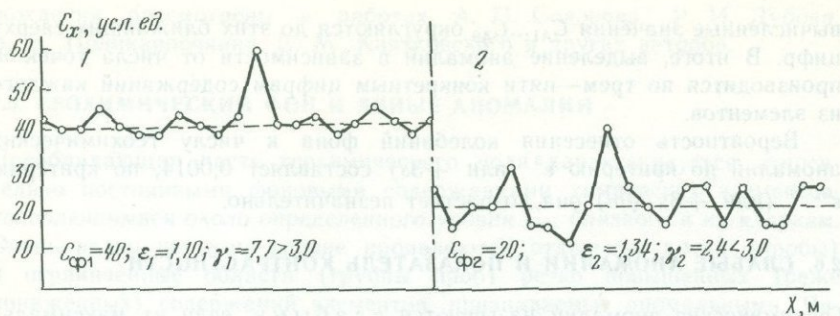


Рис. 15. Сравнение контрастности двух аномалий при разных параметрах геохимического фона

циальных (например, селективных) методов анализа проб или математической обработки первичных данных, обеспечивающих увеличение показателя γ . Вычисление показателя контрастности уместно только для слабых аномалий, амплитуду явных аномалий характеризует абсолютное значение C_{\max} (в %, г/т, мг/л и т. п.).

2.7. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Объективные количественные характеристики геохимического поля и состава природных образований, численные величины которых уточняются одновременно с увеличением точности исследований, называются геохимическими параметрами. Оценки средних величин геохимического параметра с увеличением числа определений сходятся по вероятности к своему истинному значению, имеющему смысл математического ожидания. Примерами геохимических параметров являются кларки геосфер, средние содержания химических элементов в конкретных типах горных пород (уточняются с увеличением числа данных и точности анализа), надфоновые количества («геохимические запасы») элемента, площадные и линейные продуктивности и отношения между средними содержаниями элементов в аномалиях, показатели миграционной способности (подвижности) элементов в процессах эндогенного или экзогенного рудообразования, коэффициенты гипергенного рассеяния и остаточной продуктивности и т. п. Для средних значений геохимических параметров во всех случаях необходимо указывать доверительные интервалы оценок $\pm s/\sqrt{n}$ (или $\varepsilon^{\pm 1/\sqrt{n}}$) и число данных n .

2.8. НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Непараметрические геохимические показатели — количественные характеристики, не поддающиеся объективному определению, численные значения которых с увеличением точности исследований произвольно изменяются, зависят от договоренности или заранее известны. Такими показателями являются размеры геохимических аномалий в контуре нижнего аномального содержания (результат договоренности), средние

содержания химических элементов в аномалиях (зависят от субъективного интервала осреднения), промышленные запасы металла в месторождениях (зависят от выбора бортового содержания), величина «размаха» наблюдаемых значений (например, $R = C_{\max} : C_{\min}$; зависит от числа данных, от размера проб), «встречаемость» элементов в пробах (заранее известна и, согласно закону Вернадского, всегда 100,0%) и т. д. Вычисляемые иногда «встречаемости» $< 100,0\%$ не имеют научного смысла и характеризуют только неудовлетворительную чувствительность анализа. Некоторые непараметрические показатели имеют важный технический смысл (эффективные размеры аномалий, средние содержания металлов в промышленных рудах, промышленные запасы в месторождениях и др.). Однако для обоснования устойчивых научно-методических выводов или сравнения с объективными характеристиками вещества они непригодны.

От непараметрических показателей иногда легко перейти к параметрическим величинам. Например, параметрический смысл имеют безразмерные отношения между средними надфоновыми содержаниями химических элементов в аномалиях или произведения непараметрических эффективных размеров аномалий ($2a, m; S, m^2; V, m^3$) на среднее надфоновое содержание элемента в их контуре ($\bar{C}_x - C_f$), определяющие величины важнейших геохимических параметров — линейную и площадную продуктивность аномалий ($M, m\%; P, m^2\%$) или их геохимические запасы (Q_H, τ). Для теоретических построений предпочтение следует отдавать анализу параметрических величин.

2.9. ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Множество результатов геохимических наблюдений можно представить в виде небольшого числа характеристик, которые должны быть достаточны, чтобы потеря информации была минимальной.

К числу выборочных статистических характеристик, рассчитываемых по исходной геохимической информации, относятся оценки средних значений переменных величин, их стандартных отклонений и дисперсий, форм распределения, ковариаций и корреляций, эмпирических плотностей и функций распределения. В практике геохимических поисков статистические характеристики обычно рассматриваются без разделения на природные и технические факторы, определяющие изменчивость величин. Для характеристики природного геохимического поля численные значения рассматриваемых статистик должны быть очищены от влияния технических факторов — погрешностей пробоотбора, обработки и анализа геохимических проб. Широкое применение при геохимических исследованиях получила аппроксимация эмпирических распределений нормальным законом (см. 2.10).

Геохимический фон для каждого элемента рассчитывается по его среднему содержанию, установленному по результатам опробования или дистанционного измерения в удалении от явных аномалий (см. 1.13). Если на исследуемой площади широко развиты аномальные зоны и не представляется возможным объективно исключить их влияние, расчет

геохимического фона производится методами непараметрического и робастного оценивания.

Природная дисперсия рассчитывается с учетом аналитической дисперсии. Если природная дисперсия оценивается на участках с существенно изменчивыми содержаниями компонента, необходимо учитывать зависимость аналитической дисперсии от определяемой величины. Параметры этой зависимости должны быть известны геохимикам. Коэффициент природной корреляции между исследуемыми компонентами рассчитывается с исключением аналитической корреляции.

Асимметрия и эксцесс — важные характеристики распределения величин геохимического поля, хотя прямого применения при геохимических исследованиях они не получили. При обработке геохимических данных они могут быть эффективно использованы как показатели отклонения фактического распределения от нормального.

Резкая асимметрия кривой распределения исследуемых величин указывает на необходимость выяснения ее геохимических причин, использования симметрических преобразований (например, логорифмирования величин). Если асимметрия обусловлена тяжелым правым «хвостом» распределения в связи с наличием аномальных зон, расчет геохимического фона должен вестись с использованием робастных оценок, а природной дисперсии — по разности медианы и нижнего квартиля.

В приложении к геохимическим данным эксцесс является высокочувствительным индикатором наличия в выборке аномальных результатов.

Ошибочные выводы при обработке данных геохимических исследований могут быть получены из-за их несоответствия предпосылкам статистических методов. В частности, низкая эффективность расчетов может быть обусловлена следующими причинами: в корреляционном анализе — узким диапазоном изменения независимых переменных (например, при обработке данных из области нормального геохимического поля);

в факторном анализе — отклонением наблюдаемых переменных от многомерного нормального закона; наличием прямых причинно-следственных (детерминированных) связей между наблюдаемыми переменными; различием законов распределения у наблюдаемых переменных.

2.10. НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Нормальное распределение (НР) открывалось трижды: в 1733 г. А. Муавром, в 1809 г. К. Гауссом и в 1812 г. — П. Лапласом*.

Если значения непрерывной случайной величины (СВ) формируются под аддитивным воздействием большого числа взаимно независимых и соизмеримых по величине случайных факторов, то согласно центральной предельной теореме А. М. Ляпунова (1900 г.), следует ожидать

* Название «нормальное распределение» дано Пирсоном. Оно удачно снимает международный вопрос о приоритете, но якобы предполагает «ненормальность» других распределений, что неправильно.

и НР. Именно в этом режиме (одновременной зависимости от множества соизмеримых факторов) формируются фоновые содержания химических элементов в однородном геохимическом поле в литосфере, гидросфере и атмосфере, о котором мы судим по результатам опробования. Конкретное содержание любого химического элемента или минерала в данной пробе или ее физико-химические свойства являются единичной реализацией СВ. Близость к НР содержаний элементов обнаруживается в каждом отдельном типе горных пород и продуктах их выветривания, но существенно нарушается в области воздействия пространственно-направленных контактовых, метаморфических, рудообразующих или биоклиматических процессов и при смешении в одной совокупности двух или нескольких типов пород, а также при объединении данных по разнородным участкам геохимического поля.

Все возможное, в принципе бесконечно большое число данных, характеризующих СВ, именуется генеральной совокупностью. В практике для анализа распределения СВ мы пользуемся выборочными данными ограниченной численности. Такая выборка должна быть представительной (репрезентативной), т. е. не предвзятой, объективно-случайной («рандомизированной»), что обеспечивает правильную оценку параметров ее распределения. Анализ распределения СВ основан на подсчете относительной частоты появления ее численных величин в равновеликих интервалах между крайними значениями в выборке и сравнения выявленных зависимостей с известными математическими законами. Теоретическая частота появления СВ в единичном интервале называется плотностью вероятности ее распределения.

Плотность вероятности НР имеет вид:

$$\varphi(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2s^2}},$$

где μ — математическое ожидание (МО), к которому стремится среднее арифметическое СВ; s^2 — дисперсия. Параметры $\mu = \bar{x}$ и s исчерпывающе полно характеризуют НР. Значение \bar{x} , соответствующее максимальной плотности вероятности, называется модой распределения. В НР математическое ожидание и мода совпадают.

Дифференциальная кривая НР — симметричная функция колоколообразной формы с максимумом в точке $\bar{x} = \mu$, равным

$$\varphi(0) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} = \frac{0,4}{s}.$$

Кривая НР имеет две точки перегиба при $x = \mu \pm s$; с увеличением x она асимптотически приближается к оси абсцисс. Чем больше s , тем более пологой становится кривая плотности вероятности (рис. 16).

Если случайную величину центрировать относительно μ и нормировать к s , т. е., если ввести переменную

$$U = \frac{x - \mu}{s},$$

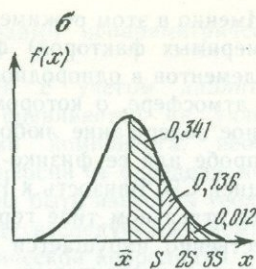
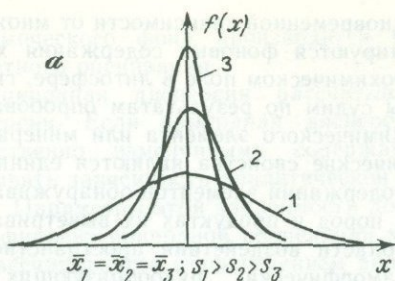


Рис. 16. Кривые нормального распределения (а — с различными значениями s ; б — с вероятностями попадания в интервалы $\bar{x} + s$, $\bar{x} + 2s$ и $\bar{x} + 3s$)

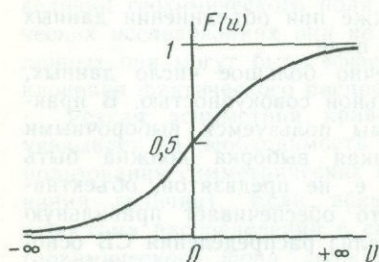


Рис. 17. Интегральная функция нормального распределения

то при НР математическое ожидание U равно нулю, а ее дисперсия — единице. В этом случае плотность распределения равна:

$$\varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2}}$$

Нормированная интегральная функция НР имеет вид:

$$F(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{U^2}{2}} dU.$$

Интегральная функция распределения монотонно возрастает от 0 до 1 с точкой перегиба при $U=0$, в этом случае $F(U)=0,5$ (рис. 17). Такую кривую распределения называют куммулятивной или куммулятой. При построении куммулятивных распределений требование к равенству интервалов подсчета частостей отпадает.

Во многих случаях необходим учет так называемого интеграла вероятности — симметричного относительно начала координат интегрального НР, обозначаемого греческой буквой Φ :

$$\Phi(U) = \int_{-U}^{+U} \varphi(U) dU = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{U^2}{2}} dU.$$

В зарубежной литературе эта интегральная функция НР часто обозначается символом «erf» (error function). Численные значения дифференциальной и интегральных функций НР приведены в таблице 37.

Абсцисса интегральной кривой, соответствующая заданной ординате, называется квантилью. Если P — вероятность того, что значение СВ

Таблица 37

Значения дифференциальной и интегральных функций нормального распределения

U	$\varphi(U)$	$\varphi(U)/\varphi(0)$	$F(U)$	$\Phi(U)$	$\frac{1}{\Phi(U)}$	$-U$	$F(U)$
0,0	0,3989	1,000	0,5000	0,0000	∞	$-\infty$	0,000
0,1	0,3970	0,995	0,5398	0,0797	12,54	-5	0,000
0,2	0,3910	0,980	0,5793	0,1585	6,31	-4	0,000
0,3	0,3814	0,959	0,6179	0,2358	4,24	-3,5	0,000
0,4	0,3683	0,923	0,6557	0,3108	3,22	-3,0	0,002
0,5	0,3521	0,883	0,6915	0,3829	2,61	-2,8	0,003
0,6	0,3332	0,835	0,7257	0,4515	2,21	-2,6	0,005
0,7	0,3123	0,783	0,7580	0,5161	1,93	-2,5	0,006
0,8	0,2897	0,726	0,7881	0,5763	1,74	-2,4	0,008
0,9	0,2661	0,667	0,8159	0,6319	1,58	-2,2	0,014
1,0	0,2420	0,607	0,8413	0,6827	1,46	-2,0	0,023
1,1	0,2179	0,546	0,8643	0,7287	1,37	-1,9	0,029
1,2	0,1942	0,487	0,8849	0,7699	1,30	-1,8	0,036
1,3	0,1714	0,430	0,9032	0,8064	1,24	-1,7	0,045
1,4	0,1497	0,375	0,9192	0,8385	1,19	-1,6	0,055
1,5	0,1295	0,325	0,9332	0,8664	1,15	-1,5	0,067
1,6	0,1109	0,278	0,9452	0,8904	1,12	-1,4	0,081
1,7	0,0940	0,236	0,9554	0,9109	1,10	-1,3	0,097
1,8	0,0790	0,198	0,9641	0,9282	1,08	-1,2	0,115
1,9	0,0656	0,164	0,9713	0,9426	1,06	-1,1	0,135
2,0	0,0540	0,135	0,9772	0,9545	1,05	-1,0	0,159
2,2	0,0355	0,089	0,9861	0,9722	1,03	-0,9	0,184
2,4	0,0224	0,0561	0,9918	0,9836	1,02	-0,8	0,212
2,5	0,0175	0,0433	0,9938	0,9876	1,01	-0,7	0,242
2,6	0,0136	0,0349	0,9953	0,9907	1,01	-0,6	0,274
2,8	0,0079	0,0197	0,9974	0,9949	1,005	-0,5	0,308
3,0	0,00443	0,0111	0,99865	0,99730	1,003	-0,4	0,344
3,5	0,00087	0,0022	0,99976	0,99953	$\approx 1,0$	-0,3	0,382
4,0	0,0001378	0,000335	0,99997	0,99994	$\approx 1,0$	-0,2	0,421
5,0	0,0000015	0,00000376	$\approx 1,0$	$\approx 1,0$	$\approx 1,0$	-0,1	0,460
∞	0,0	0,0	1,00	1,0	1,0	0,0	0,500

Примечания. В графе 3 даны значения $\varphi(U) : \varphi(0) = C_x : C_{\max}$ для вторичных ореолов рассеяния тонкого рудного тела; в графе 6 — значения поправочного множителя $1/\Phi(x)$, применяемого при подсчете линейной продуктивности ореолов рассеяния M (м, %) и оценке коэффициента $K = 1/\Phi(P/\sigma)$ при пользовании палетками Дубова. Графа 8 является левой половиной графы 4.

не превзойдет заданное значение, то $F(U_p) = P$ ($0 \leq P \leq 1$). Квантиль возрастает от $-\infty$ до $+\infty$, когда P возрастает от 0 до 1.

Квантиль, соответствующий значению $P=0,5$, называется медианой. Для нормированного НР медиана $U_{0,5}=0$. В НР медиана совпадает с математическим ожиданием и модой. При других распределениях СВ медиана занимает промежуточное положение между математическим ожиданием и модой.

Результаты количественных анализов на макроэлементы следует аппроксимировать нормальным законом, результаты анализа на микроэлементы — логнормальным. В последнем случае за параметры распределения принимаются антилогарифм среднего логарифма СВ (т. е. ее среднее геометрическое значение) и стандартный множитель $\varepsilon = \text{ant lg } s_{\text{lg}}$.

Проверка экспериментальных данных на непротиворечивость нормального закону может быть выполнена различными способами: по

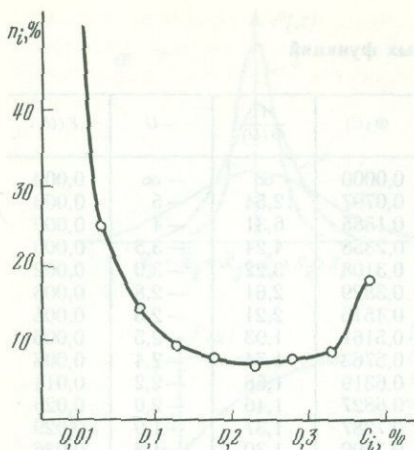


Рис. 18. График дифференциального распределения частот π_i различных содержаний металла C_i во вторичном остаточном ореоле рассеяния

асимметрии, эксцессу, отношению среднего арифметического отклонения к средне квадратическому, по критерию Колмогорова и др. Обычно эта операция выполняется на ЭВМ попутно с оценкой параметров распределения. Непротиворечивость экспериментальных данных какому-либо теоретическому закону распределения, в том числе и нормальному, не является доказательством того, что исходное распределение следует данному теоретическому распределению, оно так же хорошо может быть согласовано и с другими законами распределения. Более того, всегда следует помнить, что нормальное распределение допускает с вероятностью $P > 0$ появление проб с отрицательным содержанием химических элементов, что является геологическим абсурдом. Логнормальный закон свободен от этого недостатка, но подобно нормальному закону допускает с вероятностью $P > 0$ появление содержаний $> 100,0\%$. Поэтому близость наблюдаемых распределений к нормальному или логнормальному законам не более чем удобная аппроксимация.

В практике геохимических поисков применение получил графический метод оценки параметров геохимического фона и проверки согласия наблюдаемого распределения с нормальным (или логнормальным) законом. Для этого точки накопленной (кумулятивной) частоты появления различных содержаний химического элемента в однородной выборке наносят на бланк вероятностной бумаги*. Соединяя их осредняющей прямой, по ординате 0,5 (т. е. 50%) оценивают C_ϕ и по уровню $+3\sigma$ определяют s (или ϵ), а по величине отхода эмпирических точек от прямой — согласие с нормальным законом [37].

Нормальному закону распределения подчиняется теоретический график содержаний металла C_x в остаточном ореоле рассеяния тонкого рудного тела $C_x = f(x)$, где x — расстояние по профилю от центральной точки ореола. Эту пространственно-упорядоченную (детерминированную) зависимость не следует смешивать с нормальным законом стати-

* Предложена Ф. Гамьтоном в 1889 г., иногда ошибочно называется «трафаретом Разуковского».

стического («случайного») распределения частостей различных содержаний химического элемента в однородной выборке $n_i/N = \varphi(C_i)$, где N — объем выборки. Попытки статистической обработки аномальных геохимических полей лишены смысла и приводят к обнаружению амодальных и полимодальных распределений, весьма далеких от нормального распределения. На рис. 18 в качестве простейшего примера приведен график дифференциального распределения частостей различных содержаний металла в ореоле рассеяния, теоретически подчиняющегося нормальному закону.

2.11. РОБАСТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Робастность (от англ. robust — крепкий, здоровый, дюжий) — свойство статистических процедур, слабочувствительных к небольшим отклонениям опытных данных от предположений. Термин «робастность» предложен Дж. Е. П. Боксом в 1953 г., но только с середины 60-х гг. методы робастного оценивания стали рассматриваться как предмет специального исследования [44].

Непараметрические методы оценивания — процедуры обработки экспериментальных данных, не обусловленные требованием знания закона распределения исследуемых случайных величин.

Различают понятия «робастность по распределению» и «робастность по эффективности»; к первым относятся статистические процедуры, слабо чувствительные к небольшим изменениям эмпирического распределения от принятого в качестве модельного; ко вторым — процедуры, позволяющие получить эффективность, несущественно отличающуюся от оптимальной в случаях небольших отклонений эмпирического распределения от модельного. Для геохимических исследований более важной является робастность по распределению, так как она обеспечивает получение несмещенных оценок параметров даже в присутствии небольшого числа аномальных наблюдений. Робастность оценок по эффективности свойство экономическое, оно позволяет получить оптимальные результаты при меньшем числе наблюдений, чем при неробастных оценках. Близким по смыслу понятию «робастность по распределению» является «защищенность от выдающихся наблюдений»; часто эти понятия выступают как синонимы.

Среднее арифметическое в геохимии имеет большое практическое значение, так как имеет смысл содержания исследуемого компонента, которое получилось бы при равномерном его распределении в заданном объеме (блоке, массиве и т. д.). В указанном смысле среднее арифметическое должно использоваться для оценки запасов, кларков, геохимических балансов.

2.12. УРОВЕНЬ ЗНАЧИМОСТИ

Уровень значимости — достаточно малое значение вероятности, которое для данной задачи можно считать характеризующим невозможное событие. Чем меньше уровень значимости, тем меньше вероятность

отбросить проверяемую гипотезу (ошибка первого рода), при этом, однако, увеличивается вероятность принятия неверной гипотезы (ошибка второго рода). Уровень значимости контролирует ошибки первого рода.

Выбор величины уровня значимости определяется тяжестью последствий отклонения правильной гипотезы. Чем весомее потери от ошибочного отвержения проверяемой гипотезы, тем меньше должен быть уровень значимости.

В геологической практике принято для проверки гипотез о равенстве средних по t -критерию Стьюдента, о значимости коэффициентов корреляции между переменными и во многих других случаях использовать 5%-й уровень значимости. Гипотеза о равенстве дисперсий по F -критерию Фишера может приниматься на 10%-м уровне и т. п.

Необходимо учитывать, что уровень значимости назначается самим исследователем и является вероятностным, поэтому не следует принимать различные решения, если фактический уровень значимости будет немного отличаться от 5%. В этом случае решение принимается с учетом профессиональной информации.

2.13. ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ОЦЕНОК

Оценка параметра по эмпирическим данным является его приближенным значением, даже если она состоятельная (т. е. с ростом числа данных N стремится к своему математическому ожиданию MO), несмещенная (совпадает в среднем с MO) и эффективная (обладает наименьшей степенью случайных отклонений от MO).

Для решения вопроса о том, как сильно может отклоняться полученная оценка от генерального значения, указывается доверительный интервал $(\bar{x} - \Delta_n; \bar{x} + \Delta_n)$, который охватывал бы неизвестное μ с близкой к единице заданной вероятностью, называемой доверительной вероятностью.

Доверительный интервал — интервал возможных значений параметра распределения случайной величины, заключенный между границами, вычисленными по выборочным данным и доверительной вероятности. Доверительная вероятность характеризует достоверность оценки*, а доверительный интервал — ее точность; чем больше доверительная вероятность, тем шире доверительный интервал, тем ниже точность.

Доверительный интервал является случайным как по положению, так и по длине. Ширина интервала зависит от объема выборки, величины принятой доверительной вероятности и закона распределения. В случае симметричного распределения случайной величины $\Delta_n = \Delta_n$. Доверительный интервал конструируется вокруг точечной оценки параметра.

Оценивание доверительных интервалов для математического ожи-

* Достоверность оценки результатов эксперимента — устойчивое соответствие его результатов действительному значению оцениваемых величин при произвольном числе повторений эксперимента, выполняемых в одинаковых условиях (ГОСТ 15895—77).

дания при нормальном распределении производится с помощью распределения Стьюдента:

$$\bar{x} - t_{(1-q/2)} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{(1-q/2)} \frac{s}{\sqrt{n}},$$

где $t_{(1-q/2)}$ — коэффициент вероятности Стьюдента для доверительной вероятности $P=1-q$, степеней свободы $f=n-1$ и уровня значимости q . Экспериментально установлено, что критерий Стьюдента умеренно робастен.

Для генеральной дисперсии $\hat{\sigma}^2$ доверительный интервал для заданной доверительной вероятности P_d оценивается с помощью критерия χ^2 (Пирсона):

$$P \left[\frac{(n-1)s^2}{\chi_{P_2}^2} < \hat{\sigma}^2 < \frac{(n-1)s^2}{\chi_{P_1}^2} \right] = P_1 - P_2 = P_d,$$

где P_1 принимается близким к единице, а P_2 — к нулю. Например, для доверительной вероятности $P_d=0,90$, $P_1=0,95$ и $P_2=0,05$. Возможны и другие комбинации из данных, имеющих в таблице χ^2 . При расчетах доверительных интервалов оценки среднего неизвестная генеральная дисперсия заменяется ее выборочной оценкой.

Для других законов распределения случайной величины доверительный критерий рассчитывается аналогично с использованием других критериев.

2.14. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ СССР ПО ЗАДАЧАМ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

Для решения вопросов геолого-структурного, тектонического или металлогенического районирования территорий следует обращаться к специальным руководствам и монографиям. Районирование СССР по условиям ведения поисковых работ впервые выполнено в 1959 г. В. И. Красниковым. В настоящем Справочнике районирование СССР рассматривается только в свете геологических задач, стоящих перед геохимическими поисками и определяющими их методику. Одновременно и относительно независимо методика и техника геохимических поисков определяется местными ландшафтно-геохимическими условиями (см. 1.16).

Из общей территории СССР (22,4 млн км²) около 30% составляют горно-рудные районы с расчлененным рельефом, претерпевшие неоднократную тектоно-магматическую активизацию и подвергающиеся современной активной денудации (рис. 19). Это районы, в которых сосредоточены основные рудные ресурсы страны: Кавказ и Рудный Алтай, Центральный и Южный Казахстан, Урал и Саяны, Восточное Забайкалье, Дальний Восток, Приморье, Магаданская область, значительная часть Якутии. В этих районах (за вычетом площади межгорных впадин и долин крупных рек) на поверхности рудовмещающих пород развит только волнистый покров их собственных продуктов элювиоделювиального выветривания ограниченной мощности. Месторождения твердых полезных ископаемых в этих условиях сопровождаются отчетливо про-

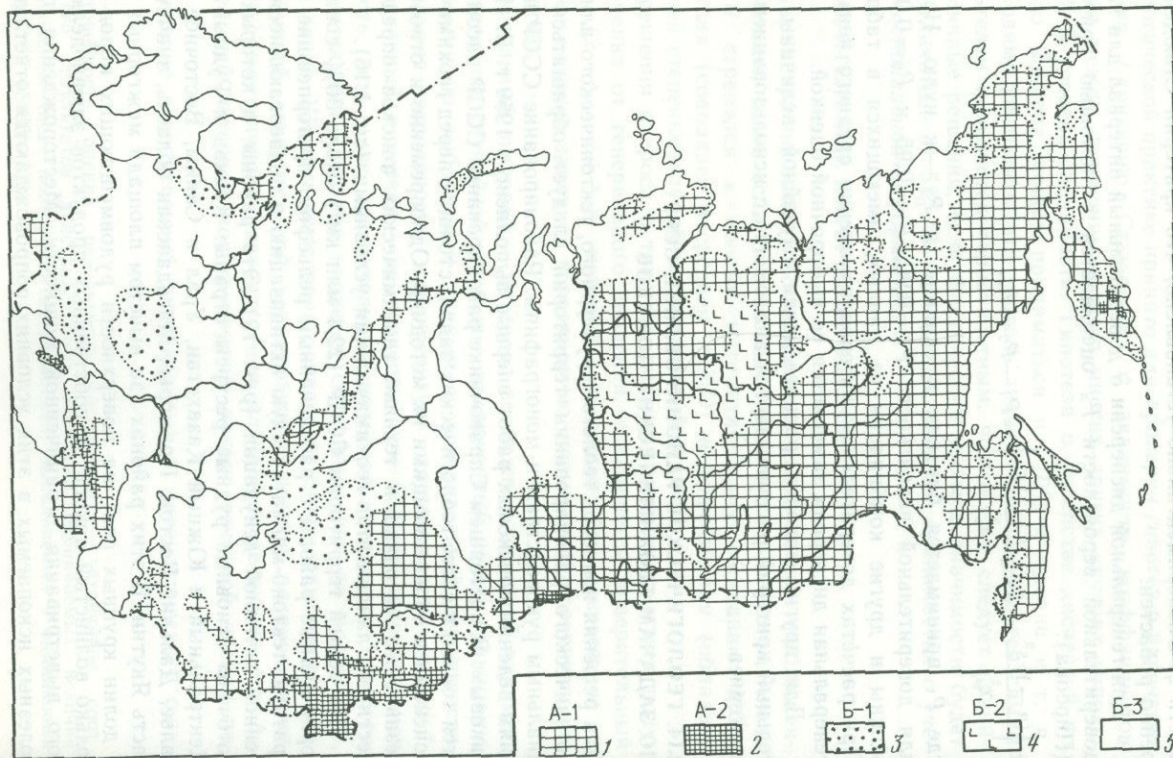


Рис. 19. Районирование территории СССР по геологическим задачам геохимических поисков

1—2 — «открытые» территории (1 — горно-складчатые районы и приподнятые щиты, 2 — то же с абсолютными высотами более 3000 м); 3—5 — «закрытые» территории (3 — с мощностью осадочного чехла менее 500 м, 4 — с развитием траппового магматизма, 5 — с развитием мощных осадочных толщ)

явленными на современной поверхности вторичными (остаточными) ореолами рассеяния в элювиоделювии, за счет которых формируются потоки рассеяния в аллювиальных отложениях и речных водах. Такие районы принято называть «открытыми», хотя в частных случаях естественные обнажения горных пород могут полностью отсутствовать. Геохимические поиски месторождений твердых полезных ископаемых любых генетических типов в этих условиях возможны всеми наземными и аэрогеохимическими методами. Важнейшую роль играют литохимические методы поисков, включая поиски слепых месторождений (по их надрудным первичным ореолам) и современных россыпей (табл. 38, индекс А-1). В СССР в настоящее время поиски полезных ископаемых в высокогорных районах (выше 3000 м) не актуальны. В некоторых

Таблица 38

Районирование СССР по задачам геохимических поисков

Индекс	Описание	Размеры территории		Объекты геохимических поисков
		в %	в млн км ²	
А-1	Открытые горноскладчатые районы, приподнятые щиты преимущественно в условиях расчлененного рельефа	30	6,7	Эндогенные, экзогенные и метаморфические месторождения твердых полезных ископаемых, в первую очередь рудные месторождения преимущественно субвертикального залегания, в том числе слепые месторождения. Современные речные и прибрежно-морские россыпи
А-2	В том числе с абсол. высотами более 3000 м	~2,5	~0,6	Освоение месторождений затруднено
Б-1	Закрытые районы двухъярусной структуры с чехлом молодых осадков менее 500 м преимущественно в условиях сглаженного рельефа	13	2,9	А. В чехле — экзогенные рудные месторождения твердых полезных ископаемых, в том числе гидрогенные в условиях субгоризонтального залегания. Прибрежно-морские россыпи. Б. В складчатом фундаменте — объекты, аналогичные А-1
Б-2	В том числе районы развития траппов	~4,5	~1,0	В условиях погребенного залегания (не слепые), в том числе кимберлиты
	А-1 + Б-1	43	9,6	
Б-3	Районы развития мощных толщ осадочных отложений (более 500 м) в условиях равнин и внутренних акваторий	57	12,8	Только в осадочной толще. Месторождения нефти и углеводородных газов, гелия, серы, боратов, калийных солей, иодбромных вод. Осадочные месторождения Fe, Al, Mn, P, U, древние морские россыпи Au, Pt, касситерита, рутила, ильменита, циркона, тантало-ниобатов, монацита

зарубежных странах рудные месторождения активно разрабатываются на высотах более 4000 м (например, Потоси, в Боливии).

Существенно иные полезные ископаемые являются объектами геохимических поисков в районах развития мощных толщ осадочных отложений в результате длительного и устойчивого прогибания этих участков земной коры. В пределах СССР эти районы занимают 57% территории (индекс Б-3) и включают нефтегазоносные, угленосные и соледородные бассейны: нефтедобывающие районы Прикаспия, Предуральского прогиба, Русской и Западно-Сибирской платформ, Донецкий, Кузнецкий, Южно-Якутский и Дальневосточные угольные бассейны, районы калийных месторождений Соликамска, Солегорска, Иркутского амфитеатра и др. Помимо нефти и газа промышленное значение имеют экзогенные месторождения фосфоритов, серы, бокситов, осадочных урановых, марганцевых и железных руд, рутил-ильменитовые и циркониевые россыпи, месторождения торфа, стройматериалов и др.

Для этих геологических условий характерно субгоризонтальное залегание полезных ископаемых, слабо расчлененный рельеф местности, горно-техническая недоступность месторождений в кристаллическом фундаменте и большая глубина, до которой ведется промышленная разработка залежей в осадочном чехле.

При геохимических поисках нефти и газа основная роль принадлежит атмосферическим (газовым) методам с глубиной пробоотбора от 20—25 м до 200—600 м. Отбор проб часто ведется непосредственно в процессе бурения поисковых скважин. Подчиненное значение имеют гидрохимические и литохимические методы поисков; в пустынных районах аридной зоны возможны биогеохимические поиски до глубины развития корневой системы растений. На стадии региональных исследований целесообразны аэрогеохимические съемки, мелкомасштабные гидро- и литохимические съемки по потокам рассеяния, в степных районах — автомобильные геохимические съемки.

Промежуточное положение занимают районы с ограниченной мощностью осадочного чехла, которая по современным требованиям не должна превышать 500 м (индекс Б-1). При этом условия промышленное значение имеют месторождения, залегающие как в осадочном чехле, так и в складчатом фундаменте. Возрастные соотношения между ними могут быть самыми различными: на Русской платформе чехол докембрийского фундамента образуют отложения всего фанерозоя, в Казахстане — складчатый рудоносный фундамент слагают породы палеозоя и докембрия, а чехол — отложения мезозоя и кайнозоя, в Тихоокеанском поясе эти соотношения сдвигаются до палеозоя и неогена и т. п. Суммарная площадь закрытых районов составляет 13% территории СССР: районы Воронежской антеклизы, Северного Казахстана, Тургайского прогиба, Южного Прибалхашья, часть Восточного Забайкалья, Ханкайская впадина и др.

Комплекс полезных ископаемых, ожидаемых в складчатом фундаменте, соответствует районам, обозначенным индексом А-1. По характеру эти месторождения часто повторяют геологические особенности открытого обрамления закрытых территорий. Объектами геохимических поисков здесь являются погребенные месторождения, вскрытые древним

эрозионным срезом на уровне промышленных интервалов (не слепые). В благоприятных геологических условиях крупные погребенные месторождения способны формировать на поверхности чехла наложенные газовые и солевые ореолы рассеяния. Эти, как правило, слабые геохимические аномалии, доступны для обнаружения наземными атмосферическими и литохимическими съемками, включая методы ЧИМ, МПФ, ТМФ, с применением различных вытяжек и математической обработкой данных на ЭВМ. Выявленные наложенные ореолы рассеяния проверяются глубинными литохимическими съемками и оцениваются по параметрам погребенных остаточных ореолов рассеяния или полезного ископаемого в коренном залегании. Комплекс полезных ископаемых в осадочном чехле близок к их перечню для районов с индексом Б-3 с теми ограничениями, которые определяются его малой мощностью. Одновременно в этих условиях увеличивается роль прибрежно-морских россыпей, в том числе Au, Pt, касситерита, монацита и возможность нахождения водородных месторождений типа зон пластового окисления (U, Mo, Se), поиски которых успешно ведутся гидрохимическим методом путем опробования подземных вод.

В районах развития сибирских траппов (индекс Б-2) важнейшими объектами наземных геохимических поисков по наложенным ореолам рассеяния являются алмазоносные кимберлиты Якутии.

2.15. ВИДЫ И МАСШТАБЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Геохимические съемки проводятся любым из существующих методов в масштабах, обеспечивающих решение поставленной геологической задачи с наименьшими затратами труда и денежных средств.

Отнесение геохимических съемок к определенному масштабу определяется плотностью наблюдений (не менее 1 точки на см² отчетной карты). Поскольку квадратные сети не рекомендуются и расстояние между наблюдениями всегда меньше расстояния между профилями (маршрутами) и при непрерывных измерениях, то масштаб съемки определяется расстоянием между профилями — 1 см в масштабе отчетной карты. Геохимические карты с меньшей плотностью наблюдений считаются схематическими.

Принято выделять региональные, собственно поисковые и детальные геохимические съемки, которые ведутся последовательно в укрупняющихся масштабах. Основные масштабы геохимических съемок и практикуемые плотности наблюдений приведены в табл. 39.

Укрупнение масштаба геохимических съемок не означает их простого повторения с более высокой плотностью наблюдений, при этом изменяются виды и методика работ. В СССР основную последовательность образуют съемки в следующих масштабах: 1:1 000 000—1:200 000—1:50 000—1:10 000; реже реализуется последовательность: 1:500 000—1:100 000—1:25 000. Съемки в смежных масштабах не практикуются. Все съемки, до масштаба 1:25 000 включительно, и составление отчетных геохимических карт подчиняются рамкам картографических трапеций соответствующего масштаба при минимальных размерах площади съемки 1/4 трапеции. Детальные геохимические съемки в мас-

Таблица 39

Основные масштабы геохимических съемок (обобщенные данные)

Масштаб съемки	Характер съемок	Практикуемые сети	Плотность наблюдений на 1 км ²	
			Формальные требования	Фактическая
1:1 000 000	Р	10 км × 1... (2) км	0,01	0,1—0,05
1:500 000	Р	5 км × 0,5... (1) км	0,04	0,4—0,2
1:200 000	Р, П	2 км × 0,5 км	0,25	1
1:100 000	П	1 км × 0,1... (0,5) км	1,0	10—2
1:50 000	П	500 м × 50... (250) м	4	20—8
1:25 000	П, Д	250 м × 40... (100) м	16	100—40
1:10 000	Д	100 м × 20... (50) м	100	500—200
1:5000	Д	50 м × 10... (25) м	400	2000—800
1:2000	Д	25 м × 10 м	2500	4000
1:1000		Рудничные съемки — сплошное объемное опробование в зависимости от наличия горных выработок и скважин		
1:500		интервалами (по 2—5—20 м)		
1:200				
1:100				

Примечания: Характер съемок: Р — региональные, П — собственно поисковые, Д — детальные. В масштабах 1:1000 и крупнее проводят только литохимические съемки по первичным ореолам. При съемках в масштабе 1:2000 расстояние между профилями традиционно принимается 1,25 см в масштабе отчетной карты.

штабах 1:10 000 и крупнее могут проводиться на участках произвольной формы, подчинение их рамкам трапеций желательное.

При геохимических поисках твердых полезных ископаемых основная роль принадлежит литохимическим съемкам различных масштабов. Геологические съемки территории нашей страны в масштабе 1:1 000 000 закончены, геохимические съемки в этом масштабе в горно-рудных районах СССР не ведутся. Такие съемки могут быть целесообразны на обширных территориях рудных районов развивающихся стран. Вслед за региональными литохимическими съемками слабо изученных территорий в масштабе 1:200 000 (преимущественно по потокам рассеяния) или в экономически освоенных районах проводятся поисковые литохимические съемки масштаба 1:50 000 по вторичным ореолам рассеяния. По результатам этих работ выборочно ведутся детальные литохимические съемки масштаба 1:10 000 по вторичным ореолам рассеяния. С учетом геологических, геофизических и геохимических данных полезные ископаемые вскрываются в коренном залегании горными выработками и скважинами. На разведочных стадиях крупномасштабные литохимические съемки ведутся преимущественно по первичным ореолам.

Региональные, а затем поисковые, гидрохимические съемки проводятся до масштаба 1:25 000 включительно, в том числе с целью поисков гидрогенных месторождений зон пластового окисления, а также месторождений боратов, калийных солей и бромных вод. Атмохимические съемки в масштабах 1:100 000—1:50 000 целесообразны в закрытых рудных районах с чехлом молодых осадков мощностью до 200 м (и более), а биогеохимические съемки — в тех же масштабах в районах аридной зоны при мощности чехла менее 30 м. Цель этих атмо-

Таблица 40

Виды и масштабы геохимических съемок

Виды геохимических съемок	Масштабы (ориентированные размеры площади съемок в км ²)							
	1:1 000 000 и мельче ($n \cdot 10^6 - n \cdot 10^5$)	1:500 000 ($n \cdot 10^4$)	1:200 000 ($n \cdot 10^5$)	1:100 000 ($n \cdot 10^4$)	1:50 000 ($n \cdot 10^4$)	1:25 000 ($n \cdot 10^3$)	1:10 000 ($n \cdot 10^2 - n$)	1:5000 и крупнее ($n \cdot 10 - n$)
А. Твердые полезные ископаемые								
Аэрогеохимические	+	+	+	+	+	+	-	-
Литохимические:								
по потокам рассеяния	+	+	++	+	(+)	-	-	-
по вторичным ореолам рассеяния	(+)	(+)	+	+	++	+	++	(+)
по первичным ореолам	-	-	-	-	-	(+)	+	++
Гидрохимические	(+)	(+)	+	(+)	+	(+)	-	-
Атмохимические	-	-	(+)	++	+	(+)	-	-
Биогеохимические	-	-	(+)	(+)	(+)	-	-	-
Б. Месторождения нефти и газа								
Аэрогеохимические	+	+	+	+	+	-	-	-
Атмохимические	++	+	++	+	++	++	-	-
Гидрохимические	(+)	(+)	+	+	+	(+)	-	-
Литохимические	-	-	+	+	+	(+)	-	-
Биогеохимические	-	-	(+)	(+)	(+)	-	-	-

Примечания. 1. Виды работ «++» — основные; «+» — вспомогательные; «(+» — ограниченного значения; «-» — работы не проводятся. 2. При поисках твердых полезных ископаемых атмо- и биогеохимические съемки проводятся только в закрытых районах.

биогеохимических съемок — поиски погребенных месторождений по наложенным газовым и биогенным ореолам рассеяния.

Геохимические съемки каждого из масштабов целесообразны на адекватных им площадях и потому на территориях малых стран съемки масштаба 1:1 000 000 и мельче планировать не следует. Дополнительные данные о сочетаниях различных видов и масштабов геохимических съемок приведены в табл. 40.

При поисках месторождений нефти и газа (см. табл. 40) основным видом геохимических съемок, начиная с масштабов 1:1 000 000—1:500 000, являются атмосферические, аэрогеохимические и автомобильные лазерные съемки. На площадях с аномальными характеристиками показателей нефтегазоносности при съемках масштабов 1:200 000—1:50 000 выборочно проводятся гидро- и литохимические исследования. Детальные геохимические съемки в масштабе 1:25 000 сопровождаются газокаротажными работами на выявленных газонефтяных структурах.

В качестве самостоятельных видов геохимических работ проводятся водно-гелиевые и другие виды съемок (см. 3.14).

2.16. ФОРМУЛИРОВКА ПОИСКОВОЙ ЗАДАЧИ

Основная цель геохимических поисков, как и всех других видов геологических работ, — обеспечение промышленности запасами минерального сырья. Важнейшими народнохозяйственными задачами является обнаружение крупных месторождений с богатыми и легко обогатимыми рудами в экономически развитых районах, выявление крупных залежей углеводородного сырья на умеренных глубинах и других экономически привлекательных месторождений полезных ископаемых в благоприятных географических условиях и доступных для быстрейшего освоения. Наряду с этой общей постановкой задач в каждом конкретном районе геологические цели поисковых геохимических работ подлежат уточнению на основе следующих принципов.

1. В геологически слабо изученных и экономически менее освоенных рудных районах задачу геохимических поисков составляет обнаружение только крупных месторождений с богатыми и рядовыми рудами и легко доказуемыми запасами. Последнее подразумевает выход месторождений на современный эрозионный срез на уровне промышленных интервалов оруденения. В условиях горного рельефа такие месторождения образуют протяженные потоки рассеяния в аллювиальных отложениях гидросети и обширные остаточные ореолы рассеяния в элювиоделювии, надежно обнаруживаемые поисковыми литохимическими съемками начиная с масштаба 1:200 000. С учетом современных возможностей геохимических и геофизических методов поисков тезис «об исчерпании фонда легко открываемых месторождений» к этим районам не применим.

2. В промышленно развитых районах задачи геохимических работ расширяются в сторону выявления месторождений среднего размера с рядовыми рудами и крупных («большеобъемных») месторождений с относительно бедными рудами, а также скрытых месторождений: слепых — по их надрудным первичным ореолам в рудовмещающих породах; погребенных месторождений — по их вторичным наложенным орео-

лам рассеяния на поверхности чехла. К решению этих задач привлекаются различные методы, в том числе лито- и геохимические, детальность поисковых съемок увеличивается до масштаба 1:50 000 и крупнее.

3. В непосредственной близости к действующим горнодобывающим предприятиям, особенно с дефицитом разведанных запасов руд, объектами геохимических поисков вынужденно становятся также мелкие месторождения и отдельные рудные тела, в том числе в слепом залегании на флангах и глубоких горизонтах рудных полей. Работы ведутся преимущественно литохимическими методами, масштаб съемок 1:10 000 и крупнее.

Эти принципы, определяющие формулировку рудно-поисковых задач, распространяются на другие виды полезных ископаемых, включая месторождения нефти и газа. При этом в геологических заданиях на производство геохимических работ должны быть указаны минимальные размеры объектов, подлежащих обнаружению, для каждого вида минерального сырья в цифрах промышленных запасов, соответствующих крупным, средним или мелким месторождениям (см. табл. 18).

2.17. ВЗАИМОСВЯЗАННОСТЬ АНОМАЛИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОСФЕРАХ

Рудные тела и их первичные ореолы в толще горных пород формируют литохимические аномалии в рыхлых продуктах выветривания и, в соответствующих условиях, способны образовать гидрохимические, биогеохимические и геохимические (газовые) ореолы и потоки рассеяния. Все эти геохимические аномалии вследствие всеобщей миграции химических элементов и непрерывного обмена между геосферами тесно взаимосвязаны. Вторичные остаточные ореолы рассеяния в современном элювиоделювии и древних корах выветривания и наложенные ореолы рассеяния в перекрывающих рыхлых отложениях, а также потоки рассеяния в аллювиальных отложениях гидросети, являются соответственно первым и вторым удалениями от объектов поисков (рудных месторождений в литосфере), и характеризуются наиболее тесными и простыми связями с коренным оруденением. В процессе окисления гипогенных руд за счет эффузии и диффузии газовых компонентов из глубины формируются газовые ореолы и потоки рассеяния в подземной и приземной атмосферах. С учетом участия в этих процессах рудных минералов литохимических ореолов и потоков рассеяния газовые аномалии являются соответственно вторым и третьим удалениями от объекта поисков. Активная обратная связь геохимического и литохимического ореолов рассеяния заключается в участии газообразных компонентов в химических реакциях зоны окисления, их сорбции и окклюзии с переходом в твердую фазу.

В результате растворения рудных минералов при взаимодействии подземных вод с коренным оруденением, атмосферных осадков с вторичными литохимическими ореолами и речных вод с литохимическими потоками рассеяния возникают геохимические аномалии в гидросфере, которые также являются вторым и третьим удалением от рудных месторож-

дений и их первичных ореолов (рис. 20). Эти гидрохимические ореолы и потоки рассеяния оказывают активное воздействие на первичное оруденение (например, путем образования зон вторичного сульфидного обогащения) и на литохимические ореолы и потоки рассеяния (путем обменных химических реакций, сосаждения, сорбции или испарения). С другой стороны, гидрохимические аномалии определяют появление местных биогеохимических аномалий. В зоне оруденения растительность в основном аккумулирует повышенные содержания рудных элементов из водных ореолов и потоков рассеяния. Поглощение рудных элементов растительными организмами не является односторонним процессом; в результате естественного растительного опада и отмирания корневой системы растений с последующей их минерализацией элементы возвращаются в гидросферу в форме растворимых соединений или в литосферу в виде твердых минеральных остатков. Способность растительности в процессе транспирации влаги испарять в атмосферу легколетучие металлоорганические соединения образует биогеохимические аномалии над рудными месторождениями. С атмосферными осадками эти газовые компоненты возвращаются в литосферу и гидросферу. Цепь этих последовательных связей прослеживается и в сторону животных организмов.

Анализ взаимосвязанности и взаимообусловленности геохимических аномалий в различных геосферах позволяет сделать важный вывод: в отличие от гидрохимических и биогеохимических аномалий, первичные ореолы, вторичные литохимические ореолы и потоки рассеяния связаны с объектами поисков (рудными месторождениями) наиболее отчетливыми и прямыми связями. Поэтому литохимические съемки являются важнейшим методом поисков месторождений твердых полезных ископаемых. Выявленные литохимические аномалии допускают оценку масштаба ожидаемого коренного оруденения в цифрах прогнозных ресурсов и, с учетом геологических, геофизических и других данных, служат непосредственным основанием для размещения поисково-разведочных

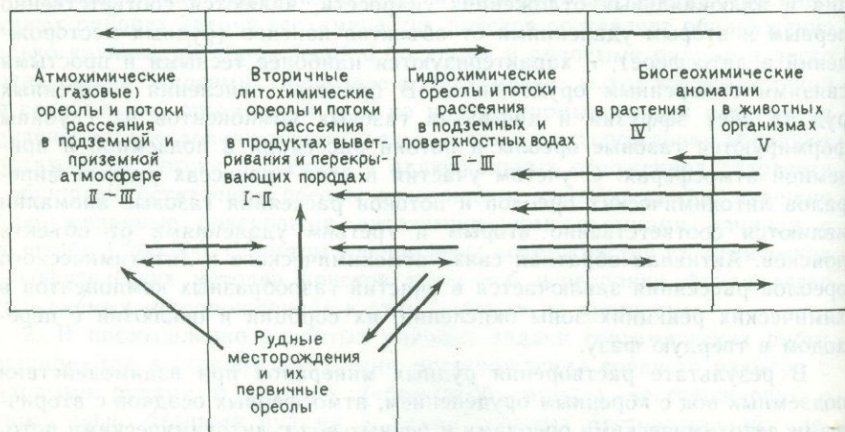


Рис. 20. Взаимосвязанность и взаимообусловленность геохимических аномалий в геосферах

выработок и скважин. При переходе от литохимических съемок к гидрохимическим и далее к биогеохимическим связи между рудными месторождениями и выявляемыми аномалиями все более усложняются, и результаты съемок становятся все более трудно интерпретируемыми. Уже при «флорометрических» съемках различия между биогеохимическими ореолами и потоками рассеяния в значительной степени стираются, а обнаруженные аномальные содержания рудных элементов в животных организмах вообще не поддаются такой привязке к местности, которая позволяла бы приступить к их разведке горными работами и бурением.

Попытки ведения «зоометрических» поисков путем исследования содержаний рудных элементов в печени птиц и жаб (С. С. Шварц для Южного Урала) или в печени форели (Х. В. Уоррен для Канады) следует отнести к разряду научных курьезов. Для поступления в биоферру рудные минералы должны пройти стадию растворения и «зоометрические» аномалии являются пятым удалением от объекта поисков.

Рудные месторождения одновременно сопровождаются лито-, гидро-, атмо- и биогеохимическими аномалиями, однако геохимические поиски, как правило, проводятся только одним, в редких случаях двумя методами. В горных активно денудированных районах наилучшие результаты дают литохимические поиски, в других случаях предпочтение должно быть отдано тому из геохимических методов или их сочетанию, применение которого дает наибольшую геолого-экономическую эффективность.

2.18. ЭФФЕКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ АНОМАЛИЙ

Геометрические размеры геохимических аномалий (их линейная ширина $2a$ по профилю наблюдения, протяженность $2b$, площадь сечения S , объем V) характеризуют интервал геохимического поля (Γ . п.), в котором оно во всех точках C_x с заданной вероятностью отличается от местного геохимического фона C_ϕ . Выделяются аномалии повышенных значений Γ . п. (положительные), в которых $C_x > C_\phi + ts$ (или $> C_\phi \times \chi \epsilon'$), и пониженных значений Γ . п. (отрицательные), в которых $C_x < C_\phi - ts$ (или $< C_\phi \cdot \epsilon^{-1}$), где s — стандартное отклонение фона (ϵ — стандартный множитель) и $t > 0$. Значения Γ . п. в аномалиях, за исключением их тектонического, эрозийного или иного ограничения, постепенно (асимптотически) приближаются к уровню C_ϕ ; с изменением s (или ϵ) и t размеры аномалий изменяются непредсказуемо. Значения s (и ϵ) зависят от технической точности геохимической съемки, а выбор t является результатом договоренности. Поэтому следует говорить об эффективных (выявленных, наблюдаемых) размерах аномалий, являющихся непараметрическими (субъективными) величинами. Согласно директивным указаниям Мингео СССР эффективные размеры геохимических аномалий определяются на уровне $C_\phi + 3s$ (или $C_\phi \cdot \epsilon^3$). Представления об «истинных» размерах аномалий лишены геохимического смысла.

2.19. ВЕРОЯТНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПОИСКОВ

Вероятность случайного события (обнаружения объекта поисков), которое в процессе поисковых работ может произойти (или не произойти), определяется соотношением между плотностью наблюдений и размерами объекта поисков.

Геохимические поиски месторождений ведутся путем обнаружения геохимических аномалий, в данном случае являющихся «объектами поисков». Каждая геохимическая аномалия характеризуется своими эффективными размерами в контуре нижних аномальных содержаний элементов-индикаторов $C_A = C_{\phi} \cdot \epsilon^3$ (или значений их многомерных функций). Обнаружение аномалий при непрерывных наблюдениях достигается их пересечением хотя бы одним поисковым профилем, при дискретных наблюдениях — попаданием в их контур хотя бы одной точки съемочной сети.

Снижение затрат на поиски диктует максимальное разрежение съемочных сетей. Для успешного решения геологической задачи необходимо обеспечить высокую вероятность обнаружения объекта поисков, что достигается сгущением сети наблюдений. Удовлетворить этим противоречивым требованиям удастся путем применения регулярных (правильных) съемочных сетей, плотность которых поддается математическому расчету. Задача сводится к выбору съемочной сети, при которой геохимические аномалии заданного размера выявляются с заранее выбранной вероятностью. При рекогносцировочных и региональных геохимических съемках эту вероятность можно принимать $P \ll 1,0$, на основе которой общий сырьевой потенциал обширной территории рассчитывается с учетом пропущенных объектов. Фрагментарные геохимические съемки без определенной, хотя бы приближенно-регулярной сети, не позволяют судить о перспективах территорий и, как правило, не эффективны и не должны проводиться. Для расчета сети собственно поисковых геохимических съемок вероятность обнаружения крупных месторождений целесообразно принимать 0,99—0,999 (при дискретных наблюдениях — двумя точками).

При лито- и гидрохимических съемках по потокам рассеяния пробоотбор подчиняется гидросети и потому заведомо ведется вдоль длинной стороны объекта. В этом случае попадание не менее двух точек наблюдения в интервал аномальных содержаний рудного элемента обеспечивается при условии $\Delta x \leq 0,5L$, где Δx — шаг пробоотбора и L — средняя эффективная протяженность ожидаемых потоков рассеяния. В связи с большой протяженностью потоков рассеяния крупных месторождений это позволяет вести съемки с расстоянием между точками пробоотбора 500—1000 м. При всех других видах поисковых геохимических съемок направление профилей выбирается вкрест господствующему простиранию ожидаемых геохимических аномалий. Это позволяет увеличивать расстояния между профилями, но при дискретных наблюдениях требует относительно частого шага по профилю (обычно не более 100—200 м). В простейшем случае вероятность пересечения вытянутого объекта длиной $2b$ сетью перпендикулярных к нему профилей непрерывных наблюдений с расстоянием между ними $2l \geq 2b$ составит $P = b/l$ (см. 2.20, 2.21).

В зависимости от геологической перспективности, экономической освоенности и доступности территорий, а также задач геохимических поисков съёмочные сети и, следовательно, значения P могут изменяться в широких пределах. Наряду с этим, в геологических и ландшафтно-геохимических условиях, допускающих эффективное ведение поисковых геохимических съёмок, они должны выполняться по многолетним планам без каких-либо пропусков и произвольных изъятий. Исключение из контура геохимических съёмок части территории по причине субъективных мнений о ее «бесперспективности» совершенно недопустимо.

2.20. ЗАДАЧА БЮФФОНА

Математическая постановка этой задачи принадлежит французскому естествоиспытателю XVIII в. Ж. Бюффону. Согласно сформулированной им «задаче об игле» (1777 г.) вероятность P для случайно брошенной на пол иглы длиной $2b$ пересечь одну из параллельных линий между половицами при расстоянии между ними $2l \geq 2b$ определяется зависимостью $P = 2b/\pi l$. С геологической стороны аналогом «иглы» в этой задаче являются залежи полезных ископаемых вытянутой формы (крутопадающие жилы, пласты, линзы) и сопровождающие их гипергенные геохимические аномалии длиной $2b$, начиная с соотношений $b:a \geq 10$, где $2a$ — ширина (мощность) объекта. Аналогом параллельных линий являются профили поисковой сети, занимающие случайное положение относительно объекта поисков. Непрерывные наблюдения при геохимических поисках — пешеходные, автомобильные и воздушные съёмки с гамма-спектрометрами, с бериллометрами и другими инструментами непрерывного действия, а также любые другие съёмки с шагом наблюдений $\Delta x \ll 2a$.

Если направление профилей образует угол $\pm \omega$ с возможным простираем объекта поисков, формула Бюффона приобретает вид:

$$P = \frac{b}{l} \frac{\sin \omega}{\omega}, \text{ где } \omega \text{ выражен в радианах.}$$

Поскольку для углов $\pm 30^\circ$ множитель $\frac{\sin \omega}{\omega} = 0,955$, т. е. мало отличается от единицы, для достижения максимальной вероятности $P = b/l$ достаточно приближенного значения азимутов простираемых объектов. При $\omega = \pm \frac{\pi}{2}$, т. е. произвольной ориентировке объектов относительно направления профилей, вероятность их пересечения снижается на величину $\frac{\sin \omega}{\omega} = \frac{2}{\pi} = 0,637$, что отвечает основной формуле.

Для случая $b \geq l$ формула Бюффона приобретает вид:

$$P = \frac{2}{\pi} \left(r + \arccos \frac{1}{r} - \sqrt{r^2 - 1} \right), \text{ где } r = \frac{b}{l} \geq 1,0.$$

Промышленные месторождения обычно состоят из нескольких рудных тел и сопровождаются рудопроявлениями, создающими многочисленные ореолы рассеяния различного размера. При поисках для обнаружения такого месторождения достаточно первоначально выявить

только одну из геохимических аномалий. Вероятность этого сложного события определяется зависимостью: $P = 1 - (1 - P_1)^{m_1} \cdot (1 - P_2)^{m_2} \cdot (1 - P_3)^{m_3} \dots (1 - P_i)^{m_i}$. Здесь $P_1, P_2, P_3 \dots P_i$ — различные вероятности выявления одной аномалии каждого из классов (размеров) при данной съемочной сети, i — число классов и $m_1, m_2, m_3 \dots m_i$ — число аномалий в классе. Задаваясь величиной $P = 0,99 \dots 0,999$, можно методом последовательного приближения выбрать поисковую сеть. Известны крупные месторождения, состоящие из нескольких газонефтяных залежей, до десятков рудных тел и до 300 жил.

2.21. ФОРМУЛА ШУРЫГИНА

Поисковые геохимические съемки в большинстве случаев ведутся путем измерений в дискретных точках, в частности путем отбора лито-, гидро-, атмо- или биогеохимических проб по относительно редкой сети, при которых условие $\Delta x \leq 2a$ не ставится. Многие залежи полезных ископаемых и сопровождающие их геохимические аномалии имеют неправильную или близкую к изометрической форму. Вероятность обнаружения объекта произвольной формы прямоугольной сетью наблюдений (попадание в его контур хотя бы одной точки съемочной сети) вычисляется по эмпирической формуле А. М. Шурыгина (1972):

$$P^{(1)} = 1 - e^{-s/\Delta s}$$

Здесь s — эффективная площадь объекта поисков в плане и $\Delta s = \Delta x \cdot 2l$ — площадь ячейки съемочной сети, где Δx — шаг по профилю и $2l$ — расстояние между профилями. Соответственно, вероятность попадания в контур объекта не менее двух точек наблюдения определяется зависимостью: $P^{(2)} = 1 - e^{-s/\Delta s} (1 + s/\Delta s)$.

Для вычисления вероятности обнаружения объекта эффективные размеры аномалий S должны приниматься из опыта в контуре $C_A = C_\phi \cdot \varepsilon^3$ при параметрах местного геохимического фона C_ϕ и ε , отвечающих методике и технике предстоящих поисковых съемок. С ухудшением качества съемок растут ε и C_A , что ведет к уменьшению эффективных размеров геохимических аномалий s и понижает вероятность их обнаружения P , без каких-либо поправочных множителей.

Вероятность обнаружения только одной из группы аномалий сетью дискретных наблюдений рассчитывается по формуле, приведенной в разделе 2.20.

Расчеты поисковых сетей для заданных значений $P^{(1)}$ ведутся по формуле $s/\Delta s = \ln \left(\frac{1}{1 - P^{(1)}} \right)$, для значений $P^{(2)}$ по формуле $\frac{e^x}{1+x} = \frac{1}{1 - P^{(2)}}$ методом последовательного приближения, где $x = s/\Delta s$. Для обнаружения объекта поисков с заданной вероятностью $P^{(1)} = 0,99$ плотность съемочной сети должна отвечать условию $s/\Delta s = 4,60$, а для того же значения $P^{(2)}$ необходимо условие $s/\Delta s = 6,64$.

2.22. ПОЛУЗАКРЫТЫЕ ТЕРРИТОРИИ

В районах с переменной мощностью дальнеприносных отложений нередко наблюдается чередование участков выхода на поверхность пород

рудоносного фундамента с участками закрытыми чехлом молодых осадков. Такие территории именуются «полузакрытыми», и результаты обычных наземных литохимических, радиометрических (тем более, визуальных поисков) считаются на них недостаточно надежными. Резервы рудоносности этих территорий принято оценивать по степени их закрытости в процентах — величине отношения суммарной площади дальнеприносных отложений к общей площади района. Пропорционально этому показателю ресурсы еще не выявленных месторождений для территорий закрытых на 50% оценивались как равные уже учтенным, при закрытости 75% — как превышающие в 3 раза уже известные. Для полузакрытых территорий с частым чередованием «открытых» и «закрытых» участков такие оценки ошибочны, так как не учитывают более высокую выявляемость крупных объектов по сравнению с мелкими. На рис. 21 изображены модели двух типов полузакрытых территорий с одинаковым показателем закрытости — 75%. Случай А является аналогом решетки, для которой, согласно обобщенному решению задачи Бюффона (см. 2.20), вероятность случайного пересечения сторон квадратов произвольно бросаемой на нее иглой определяется выражением

$$P = \frac{b}{\pi l^2} (4l + b),$$

где $2b$ длина объекта, $2l$ — сторона решетки и $b \leq l$. В половине случаев пересечение границ решетки отвечает хотя бы частичному выходу объекта поисков на открытую территорию.

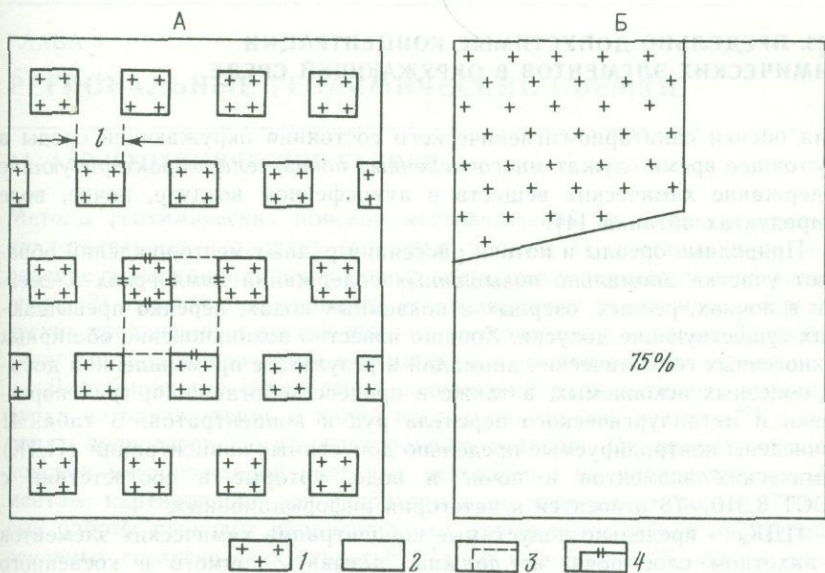


Рис. 21. Два типа полузакрытых районов:

А — частое чередование открытых и закрытых участков; Б — сплошная «закрытость» части района
 1 — открытые участки, 25%; 2 — закрытые площади 75%; 3 — усл. границы равновеликих квадратов; 4 — границы, пересечение которых объектом поисков соответствует его частичному выходу на поверхность.

Вероятность этого определяется зависимостью между их линейными размерами $b_{\text{круп}} : b_{\text{сред}} : b_{\text{мелк}} = 1 : \frac{1}{2,15} : \frac{1}{4,64}$, согласно десятичной классификации месторождений по крупности. Упрощенные расчеты для заданных условий показывают, что на закрытой территории не выявленные ресурсы погребенных месторождений не в 3 раза, а только в 1,4 раза превышают уже обнаруженные наземными съемками (в 2,14 раз меньше ожидавшихся). При закрытости 50% за счет погребенных объектов следует ожидать прироста ресурсов руд не равного уже выявленному, а в 5 раз меньше. В районах с частой перемежаемостью открытых и закрытых участков все крупные месторождения и большинство средних с высокой вероятностью выявляются уже наземными геохимическими съемками по их остаточным ореолам рассеяния. В этих условиях опосредованное обнаружение закрытых участков специальными методами способно привести к обнаружению преимущественно мелких объектов. Возможность нахождения слепых месторождений в данном случае не рассматривается. На рис. 21 (Б) показана территория, для которой резервы оруденения близки к пропорциональной зависимости от степени ее закрытости.

Невнимание к этим закономерностям привело, например, к ошибочным предложениям о дополнительном опосредованном обнаружении в Восточном Забайкалье горных склонов северной экспозиции, без учета того, что рудные поля крупных промышленных месторождений включают многочисленные горные склоны с частым чередованием их экспозиции.

2.23. ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Для оценки санитарно-гигиенического состояния окружающей среды в настоящее время служат многочисленные показатели, характеризующие содержание химических веществ в атмосферном воздухе, почве, воде и продуктах питания [4].

Природные ореолы и потоки рассеяния рудных месторождений образуют участки аномально повышенных содержаний химических элементов в почвах, речных, озерных и подземных водах, нередко превышающих существующие допуски. Хорошо известно возникновение обширных техногенных геохимических аномалий в результате промышленной добычи полезных ископаемых, а также в процессе обогащения, транспортировки и металлургического передела руд и концентратов. В табл. 41 приведены контролируемые предельно допустимые концентрации (ПДК) химических элементов в почве и воде, которые в соответствии с ГОСТ 8.310—78 относятся к категории информационных.

ПДК_n — предельно допустимые концентрации химических элементов в пахотном слое почв, не должны вызывать прямого и косвенного отрицательного влияния на соприкасающиеся с почвой среды и здоровье человека, а также на самоочищающую способность почв. Для санитарной оценки водоемов служит показатель ПДК_в — предельно допустимая концентрация химического элемента в воде, которая не должна

Таблица 41

**Контролируемые предельно допустимые концентрации (ПДК)
химических элементов в почве (п) и в воде (в)**

Элемент	ПДК _п %	ПДК _п		Элемент	ПДК _п %	ПДК _в	
		в %	в мг/л			в %	в мг/л
Be	—	$2 \cdot 10^{-8}$	0,0002	As	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,03
B	—	$5 \cdot 10^{-5}$	0,5	Ni	—	$1 \cdot 10^{-5}$	0,1
Bг	—	$2 \cdot 10^{-5}$	0,2	Nb	—	$1 \cdot 10^{-6}$	0,01
V	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0,1	Hg	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-8}$	0,0005
Bi	—	$5 \cdot 10^{-5}$	0,5	Pb	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,03
W	—	$5 \cdot 10^{-6}$	0,05	Ag	—	$5 \cdot 10^{-6}$	0,05
Cd	—	$1 \cdot 10^{-7}$	0,001	Sb	—	$5 \cdot 10^{-6}$	0,05
Co	—	$1 \cdot 10^{-5}$	0,1	Ti	—	$1 \cdot 10^{-5}$	0,1
Mп	1,5 · 10	$1 \cdot 10^{-3}$	10	P	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-8}$	0,0001
Cu	—	$1 \cdot 10^{-4}$	1	Cr	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0,5
Mo	—	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,25	Zn	—	$5 \cdot 10^{-4}$	5

Примечания: 1. «—» — содержание элемента в почве не контролируется. 2. ПДК_п для Р и Сг существенно ниже их кларков для земной коры и представляются нереальными.

оказывать прямого или косвенного влияния на организм человека в течение всей его жизни и на здоровье последующих поколений и не должна ухудшать гигиенические условия водопользования.

ГЛАВА 3

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

3.1. АЭРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Методы геохимических поисков месторождений полезных ископаемых на летательных аппаратах включают в себя: 1) дистанционное определение содержаний радиоактивных элементов в породах земной поверхности; 2) прямой анализ паров, углеводородных газов, металлоорганических соединений и других летучих компонентов в воздухе; 3) определение состава микроцита в атмосфере и на поверхности Земли.

Дистанционные определения содержаний радиоактивных элементов (уран по радию, торий и калий по радиоактивному изотопу ^{40}K) в породах проводятся гамма-спектральным методом. Он применяется для поисков месторождений полезных ископаемых по радиоактивным элементам, картирования зон гидротермально измененных пород. Поисковые работы проводят параллельными маршрутами вкострости основных геологических структур. Длина маршрутов 25—30 км, минимальная высота полетов для равнин — 25 м, для холмистых территорий — 50 м, для гористой местности — 75 м и более. В горных районах профили съемки ориентируют параллельно горизонталям рельефа. Аэрогамма-спектральные съемки проводятся широко и повсеместно, в том

числе над акваториями, в масштабах от 1:1 000 000 до 1:25 000 включительно, обычно они совмещаются с аэромагнитными съемками.

Газообразные вещества в атмосферном воздухе определяют атомно-абсорбционными (см. 7.10, 7.12) и лазерными анализаторами непрерывного действия, размещенными на самолетах и вертолетах.

Селективные атомно-абсорбционные анализаторы ртути с чувствительностью $1 \cdot 10^{-8}$ г/см³ применялись Б. П. Абрамовским, В. З. Фурсовым (1977), Г. Б. Свешниковым и другими (1988) для прослеживания рудоконтролирующих структур по ореолам паров ртути на высотах 50—300 м от поверхности Земли.

Лазерные анализаторы (лидары) позволяют с докларковой чувствительностью определять содержания летучих компонентов (СО₂, СН₄, О₂, J₂, Нg и др.) в приземном слое воздуха. Анализ состоит в измерении разностей мощностей лазерных импульсов, обратнорассеянных от передней (общее рассеяние) и задней (комбинационное рассеяние) границ зондируемого слоя атмосферы.

Атмосферные микровзвеси улавливаются проботборниками, прокачивающими в полете воздух со скоростью 100—400 м³/мин сквозь стекловолоконные и полистирольные фильтры субмикронного диаметра, а также электростатическими и аэродинамическими ловушками. Скоцентрированные частицы переносятся на клейкую ленту и анализируются спектральным методом с испарением лазерным импульсом.

Среднее содержание взвешенных микрочастиц в приповерхностном слое атмосферы в удалении от промышленных центров составляет $C = 17$ мкг·м⁻³, $\varepsilon = 1,4 \pm 1$. Характеристика аэрозолей приведена в табл. 42.

Основная масса аэрозолей над континентами привносится в атмосферу с земной поверхности. Фоновые содержания химических элементов в них близки к кларкам литосферы. Над месторождениями полезных ископаемых формируются аэрозольные ореолы и потоки рассеяния химических элементов.

Микрочастицы с поверхности почвы отбирают в полете землечувствительными зондами с вакуумным всасыванием. Захваченные частицы пород сортируются по размерам на центрифуге и переносятся на клейкую ленту, синхронизированную с фотопленкой, фиксирующей места касания зонда земли. Лазерное испарение пробы и ее спектральный анализ выполняются в полете. Рабочая скорость полетов при съемке по микровзвесям составляет 40—80 км/час. Аэрозольные съемки целесообразны в масштабах 1:1 000 000—1:50 000 в открытых слабоизучен-

Таблица 42

Характеристика атмосферных аэрозолей вблизи поверхности Земли

Размер частиц, 10 ⁻⁷ м	Концентрация в воздухе, л · 10 ³ м ⁻³	Время пребывания в атмосфере, сут	Коэффициент конвективной диффузии, м ² /с	Коэффициент элек- троподвижности, 10 ⁻⁸ м ² /св
1	10 ⁵	1	$n \cdot 10^{-1}$	100—2,5
1—10	10 ³	2—15	$n \cdot 10^{-2}$	2,5
10—200	1	2	$n \cdot 10^{-3}$	Электроней- тральны

ных районах аридной зоны. Практический советский и зарубежный опыт этих съемок недостаточен.

Аэрогеохимические съемки наиболее эффективны для опознания обширных территорий с целью выделения перспективных площадей для первоочередного проведения поисковых геохимических съемок наземными методами. Для привязки маршрутов применяются аэрофотографические и радиолокационные методы.

3.2. НАЗЕМНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Лито-, гидро-, атмо- и биогеохимические съемки, включая различные радиометрические, ядерно-физические, электрохимические и другие инструментальные методы измерений геохимического поля, проводятся в пешеходном и автомобильном вариантах, различают съемки с пробоотбором или без пробоотбора с непрерывными или точечными измерениями. Автомобильные геохимические съемки преимущественно ведутся с непрерывной автоматической регистрацией.

Геохимические съемки с глубиной пробоотбора до 3 м принято относить к наземным, включая шпуровые съемки с погружением на глубину датчиков гамма-излучения с отбором газовых, литохимических и водных проб или с экспозицией сорбентов и фотопленок.

3.3. ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Литохимические съемки состоят в изучении геохимического поля литосферы с целью поисков полезных ископаемых и геологического картирования. Выполняются путем анализа химического состава горных пород, продуктов их выветривания и почв с наземным или глубинным пробоотбором или без пробоотбора, с контактными или дистанционными, точечными или непрерывными измерениями. Общая схема проведения литохимических съемок с целью поисков твердых полезных ископаемых подчиняется последовательным стадиям:

1. Обзорные и рекогносцировочные литохимические съемки в масштабах 1:1 000 000 и мельче с опробованием отложений конечных водоемов стока, прибрежно-морских и озерных осадков или аллювия больших рек (эффективны только при условии высокой точности анализа проб).

2. Региональные литохимические съемки в масштабе 1:200 000 преимущественно по потокам рассеяния с опробованием аллювиальных отложений современной гидросети.

3. Собственно поисковые литохимические съемки в масштабе 1:50 000 и смежных масштабах по вторичным остаточным и наложенным ореолам рассеяния.

4. Детальные и разведочные литохимические съемки в масштабах 1:10 000 и крупнее для оценки месторождений по их вторичным остаточным ореолам рассеяния и поисков по первичным ореолам.

В зависимости от геологической изученности и экономической освоенности территорий от этой схемы допускаются отступления.

Литохимические исследования с применением специальной аппаратуры получили собственные названия: гамма-спектральная съемка, гамма-гаммакаротаж, метод частичного извлечения металлов (ЧИМ), метод подвижных форм (МПФ), фото-нейтронные съемки на бериллий, лазерные съемки и т. п. Литохимические съемки, важнейший из геохимических методов поисков твердых полезных ископаемых, в первую очередь рудных месторождений, широко применяются во всем мире на всех стадиях геологоразведочного процесса.

3.4. ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ ПО ПОТОКАМ РАССЕЙНИЯ

Это один из основных методов геохимических поисков месторождений твердых полезных ископаемых в активно денудированных горно-складчатых районах. Съемки проводятся на стадии региональных работ в комплексе с геологическими и геофизическими съемками. Практически нет горных районов, где нельзя было бы применить этот метод, поскольку твердый сток в виде взвешенных и влекомых наносов постоянных и временных водотоков происходит повсеместно. Съемки по потокам рассеяния лучше всего отвечают задаче ускоренного опознания обширных геологически слабо изученных горных районов, так как проводятся с малой плотностью пробоотбора, позволяя в короткие сроки и с минимальными затратами исследовать территории в десятки и сотни тысяч квадратных километров.

Результаты литохимических съемок по потокам рассеяния дают возможность:

- получить общую геохимическую и металлогеническую характеристику исследуемого района;

- выделить перспективные в отношении рудоносности участки площадью от нескольких квадратных километров до тысяч квадратных километров с оценкой прогнозных ресурсов металлов категории P_3 , как основания для постановки более детальных исследований;

- выявить рудные месторождения, имеющие выход на современный уровень эрозионного среза, а также сравнивать их друг с другом и с изученными промышленными объектами на количественной основе;

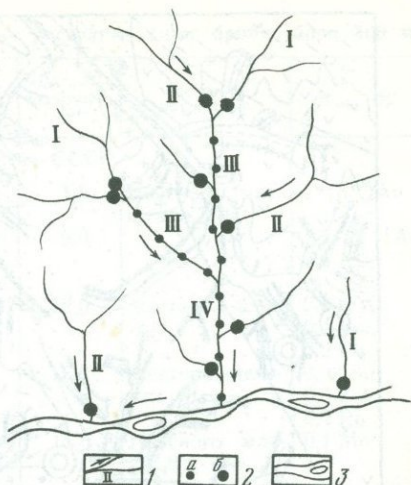
- фиксировать аномалии, отвечающие известным месторождениям, что необходимо для подтверждения эффективности применяемого метода съемки;

- устанавливать общие закономерности размещения рудных месторождений через связанные с ними литохимические аномалии.

Съемки проводятся путем систематического отбора литохимических проб с заданной плотностью из аллювиальных отложений современной гидросети в пределах сухой пойменной части водотоков, реже из-под воды, в связи с чем их иногда называют «методом донных осадков». В пробы отбирается песчано-глинистая фракция аллювия или тот материал, в форме которого в местных условиях происходит твердый сток. Основным условием является равномерное распределение точек опробования на изучаемой площади; плотность пробоотбора зависит от степени эрозионного расчленения местности и выбранного масштаба съемки. Маршруты начинаются в 50—100 м выше устьев опробуемых

Рис. 22. Схема отбора проб при литохимических съемках масштаба 1 : 200 000

1 — реки и их порядок; 2 — точки отбора проб (а — рядовых, б — двойных); 3 — магистральная река



водотоков старших порядков и заканчиваются в устьях рек II—I порядка с отбором в конечных точках двух проб на расстоянии 20—30 м одна от другой (рис. 22).

Съемки могут проводиться в масштабах 1 : 500 000—1 : 1 000 000 и мельче, но наиболее эффективны региональные литохимические съемки масштаба 1 : 200 000 с плотностью 1 проба на км² (сеть 2,0×0,5 км). При съемках масштаба 1 : 50 000 сеть пробоотбора принимается 500××250—200 м с доведением опробования до вершин русел I порядка.

Пробы подвергаются эмиссионному спектральному анализу на 36—40 элементов, атомно-абсорбционному анализу на Hg, специальным методом определяются содержания Au. На рис. 23 показан пример результатов литохимической съемки в горно-таежном районе.

Содержания химических элементов в потоках рассеяния зависят от продуктивности и положения вторичных ореолов рассеяния внутри водосборного бассейна. При одинаковой продуктивности ореолов рассеяния (в м² %, т/м) более высоким уровнем и большей протяженностью аномальных содержаний элементов в русле будут характеризоваться потоки рассеяния объектов, расположенных в верховьях ручьев первых порядков. В аридной зоне химические элементы (активные водные мигранты — Sr, B, F) могут накапливаться на испарительном барьере. В гумидной зоне на восстановительном барьере возможны безрудные гипергенные аккумуляции U и Mo. Потоки рассеяния тяжелых устойчивых минералов (Au, Pt, SnO₂ и др.), способных к образованию россыпей, характеризуются значительным обогащением на гравитационном барьере и высокими содержаниями рудных элементов. В табл. 43 приведены максимальные содержания некоторых элементов в потоках рассеяния, сформированных в различных условиях за счет рудных объектов различного масштаба.

Выявленные литохимические аномалии подлежат геологическому осмотру на местности с повторно контрольным и детализационным пробоотбором. В результате этого с учетом оценки прогнозных ресурсов

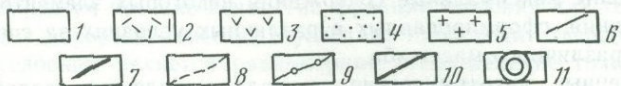
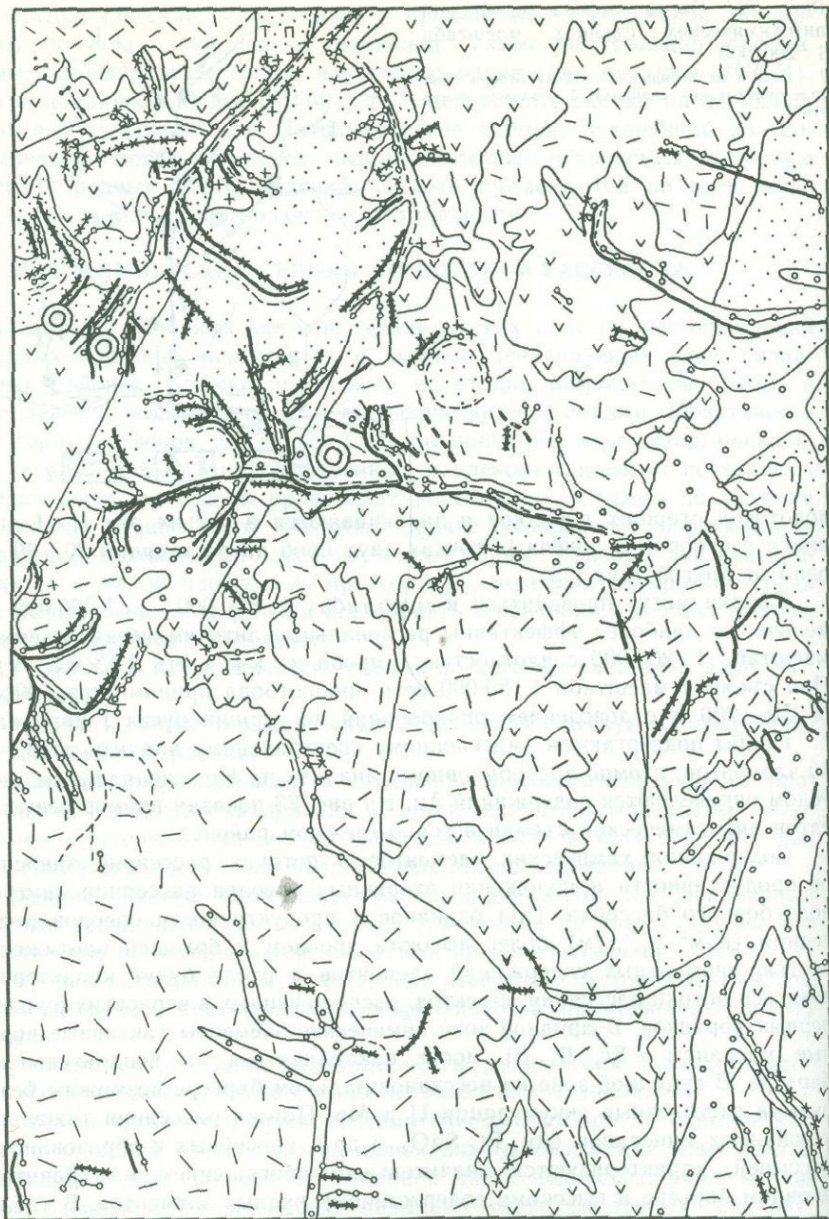


Рис. 23. Литохимическая съемка. По Г. И. Хорину, И. Ф. Бровчуку
 1 — галечники; 2 — ридолиты; 3 — андезиты; 4 — песчаники; 5 — граниты; 6 — разломы; 7—10
 потоки рассеяния (7 — Ag, 8 — Sn, 9 — Pb, 10 — Zn); 11 — известные месторождения Sn

Таблица 43

Содержание рудных элементов в потоках рассеяния (шаг пробоотбора 500 м)

Геохимический ландшафт	Положение в гидросети	Площадь водосбора, км ²	Коренное оруденение	C _{max} , %
Северо-Восток СССР				
Среднегорный, горно-тундровый с многолетней мерзлотой	Устье ручья II порядка	4,5	Неясного масштаба, Au	2·10 ⁻⁴ Au
	Среднее течение ручья I порядка	2,0		1,5·10 ⁻⁴ Au 0,5 As
Средне-низкогорный, лесотундровый с многолетней мерзлотой	Среднее течение ручья III порядка	12,0	Месторождение Ag	0,006 Ag 0,4 Zn 0,2 Pb
		15,0	Месторождение Sn	0,03 Sn 0,3 Zn 0,2 Pb
Низкогорный, горно-тундровый, слаборасчлененный с многолетней мерзлотой	Среднее течение ручья III порядка	16,0	Неясного масштаба, Mo	0,1 Mo
Средняя Азия				
Высокогорный сильнорасчлененный семиаридной зоны	Верхнее течение ручья II порядка	3,8	Месторождение Pb	1,0 Pb 0,1 Cu 0,03 Mo
Южный Казахстан				
Высокогорный крутых склонов семигумидной зоны	Верховье ручья I порядка	0,3	Рудопроявление Cu	0,3 Cu
Большой Кавказ				
Высокогорный крутых склонов семигумидной зоны	Верхнее течение ручья III порядка	10	Месторождение Ba	3,0 Sr 3,0 Ba
		0,6		Рудопроявление W
	Верхнее течение ручья II порядка	1,2	Рудопроявление Sb	0,15 Sb
Малый Кавказ				
Среднегорный выровненных водоразделов семиаридной зоны	Верхнее течение ручья II порядка	2,4	Неясного масштаба, Hg	0,003 Hg
Судан				
Сухая саванна	Устье ручья I порядка	1,7	Рудопроявление Zr	0,5 Y 0,4 Zr
Гвинея				
Горная саванна	Среднее течение реки V порядка		Месторождение Au	0,003 Au 0,0002 Ag
	Верхнее течение реки II порядка			0,0008 Au 0,0003 Ag

категории P_3 решается вопрос о целесообразности и очередности дальнейшего геохимического изучения выявленных объектов.

Литохимические съемки по потокам рассеяния часто проводятся одновременно с геологосъемочными работами, но они более эффективны, если выполняются в опережающем варианте (за 1-2 года до ГСР-50).

3.5. УРАВНЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ПОТОКА РАССЕЯНИЯ

Формирование потока рассеяния в русле реки обязано плоскостной денудации склонов, медленному непрерывному сползанию рыхлых образований к подножью склонов, постепенному врезанию русла, растворяющей и транспортирующей роли воды. В горных районах эти процессы протекают преимущественно в твердой фазе, образуя литохимические потоки рассеяния месторождений [29, 36]. Содержания рудного элемента в аллювии C'_x ниже точки R , в которой заканчивается поступление его аномальных содержаний из ореола рассеяния в русло (рис. 24), определяются зависимостью:

$$C'_x = \frac{P}{S_x} + C'_\phi, \quad (1) *$$

где P — продуктивность в $m^2\%$ одного или нескольких вторичных ореолов рассеяния в бассейне данного водосбора и S_x — его площадь в m^2 , отвечающая точке опробования. Выражение (1) является уравнением гиперболы, поэтому C'_x , падая с увеличением S_x вниз по течению реки, асимптотически приближается к уровню местного фона C'_ϕ .

Решая выражение (1) относительно P , имеем $P = S_x(C'_x - C'_\phi)$, согласно которого ниже точки R произведение площадей водосбора и надфоновых содержаний рудного элемента остается постоянным и равным продуктивности ореолов рассеяния P . Эта зависимость получена исходя из допущений о постоянстве ежегодного слоя денудации Δh на всей площади водосбора и о пренебрежительно малой роли растворимого стока. В более общем случае равенство заменяется пропорциональной зависимостью (правая часть уравнения получила наименование «продуктивности потока рассеяния»), обозначаемой P'_x :

$$P'_x = S_x(C'_x - C'_\phi) = \text{const} = k' \cdot P, \quad \text{где } k' \text{ — местный коэффициент пропорциональности } (k' \geq 1,0).$$

Выше начала поступления аномальных содержаний рудного элемента в русло (см. рис. 24, точка R_0), его содержания в аллювии остаются фоновыми:

$$C'_x = C'_\phi. \quad (2)$$

В интервале русла, непосредственно прилегающем к горному склону, на котором расположены вторичные ореолы рассеяния (от R_0 до R), содержания рудного элемента аномальные. В зависимости от соотно-

* Основные буквенные обозначения, относящиеся к потокам рассеяния, принято снабжать знаком «штрих».

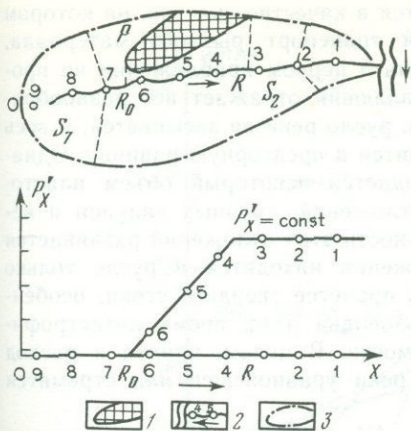


Рис. 24. К выводу уравнений идеального потока рассеяния

1 — вторичный ороел; 2 — точки пробоотбора; 3 — граница водосбора

шений между S_x и продуктивностью соответствующей части ороелов P_x , согласно условиям $P_x=0$ при $S_x=S_{R_0}$ и $P_x=P$ при $S_x=S_R$, величина C'_x будет возрастать, а затем падать (рис. 25). Семейство этих кривых рассчитано с учетом равномерного распределения продуктивности ороелов рассеяния на всем интервале $R-R_0$, т. е. с учетом пропорциональной зависимости $P_x: P=(x-R_0):(R-R_0)$, где x — расстояние по руслу от вершины водораздела до точки опробования. Подставляя это значение P_x в уравнение (1), имеем

$$C'_x = \frac{P(x-R_0)}{S_x(R-R_0)} + C'_{\Phi}. \quad (3)$$

Зависимости (1) — (3) получили название «уравнений идеального литохимического потока рассеяния» (А. П. Соловов) и достаточно хорошо соблюдаются в руслах I—II порядков. Эти три уравнения алгебраически несовместимы и каждое имеет свой интервал действия: (1) справедливо для нижнего, убывающего интервала потока рассеяния $x \geq R$; (2), имеющее характер тождества, — для интервала $0 \leq x \leq R_0$; (3) распространяется только на интервал $R_0 \leq x \leq R$. Парно уравнения имеют общие точки: (1) и (3) — точку $x=R$; (2) и (3) — точку $x=R_0$. По графику $C'_x=f(x)$ надежно определяется только точка R_0 . Положение точки R определяется по графику $P'_x=f(x)$ по признаку прекращения роста P'_x — установления его постоянных значений $P'_x = \text{const}$, или по переходу через максимум. Различные семейства графиков $C'_x=f(x)$, рассчитанные согласно этим уравнениям для других условий, можно найти в [36, 37].

3.6. КАЖУЩАЯСЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОТОКА РАССЕЯНИЯ

Модель идеального потока рассеяния основана на представлениях о формировании в русле реки «средней пробы» всего бассейна дену-

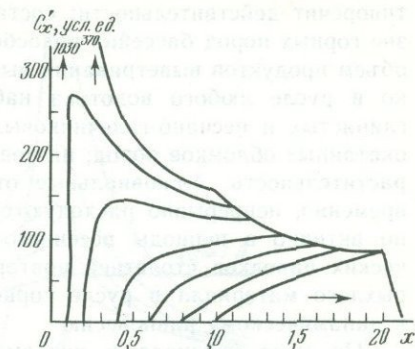


Рис. 25. Семейство кривых $C'_x=f(x)$ при различных положениях точек начала R_0 и конца R поступления рудного элемента в русло

дации. При этом русло рассматривается в качестве участка, на котором протекают только перемешивание и транспорт рыхлого материала, поступающего со склонов. Эта картина в первом приближении не противоречит действительности: состав аллювия отражает все разнообразие горных пород бассейна водосбора, русло реки не засыпается, и весь объем продуктов выветривания выносится в предгорную равнину. Однако в русле любого водотока наблюдается некоторый объем илистого-глинистых и песчано-галечниковых отложений, крупных валунов и неокатанных обломков пород; на поверхности этих отложений развивается растительность. Аллювиальные отложения находятся в русле только временно, непрерывно расходуется в процессе твердого стока, особенно активно в периоды весеннего половодья и во время катастрофических паводков столетней повторяемости. В целом, приход и расход рыхлого материала в русле горной реки уравновешен или стремится к динамическому равновесию.

По мере перехода к руслам II—III и более старших порядков характер аллювия начинает все больше отклоняться от состава средней пробы данного бассейна денудации. Преобладающую роль в его составе начинает играть материал ближайших склонов. Поступая в русло со стекающими атмосферными осадками, обезвоживаясь и задерживаясь у подножья склонов, именно материал ближайших склонов становится основным компонентом местных аллювиальных отложений, которые опробуются в поисковых целях при литохимических съемках. В результате химический состав аллювия приобретает смысл средней взвешенной пробы, в которой материалу ближайших склонов принадлежит в α' раз большая роль, нежели это отвечало бы составу средней пробы. Множитель $\alpha' \geq 1,0$ получил название «склонового коэффициента аллювия», его величина отражает всю совокупность местных условий формирования аллювиальных отложений [36].

В области фоновых содержаний химических элементов отступление от идеальной модели не обнаруживается в силу равенства химического состава местного и приносимого рекой материала. Напротив, это отступление резко проявляется при формировании потоков рассеяния рудных месторождений в средних и нижних течениях рек.

В таких руслах, начиная с точки R_0 (см. рис. 24), содержания рудного элемента выше, нежели это следует из простейшей модели, и вычисленные значения продуктивности потока рассеяния P'_x преувеличены. Ниже точки R аллювий в α' раз быстрее разубоживается, продуктивность потока P'_x падает и зависимость $P'_x = \text{const}$ нарушается. В итоге графики $P'_x = f(x)$ приобретают вид, показанный на рис. 26. По таким графикам без учета величины α' невозможно судить об истинной продуктивности потока рассеяния. Подобные значения P'_x получили название «кажущейся продуктивности» потока рассеяния.

Оценка местного значения склонового коэффициента аллювия α' производится по убывающей ветви графика $P'_x = f(x)$ по формуле

$$\alpha' = \frac{\lg \left(\frac{C'_R - C'_\Phi}{C'_x - C'_\Phi} \right)}{\lg (S_x / S_R)},$$

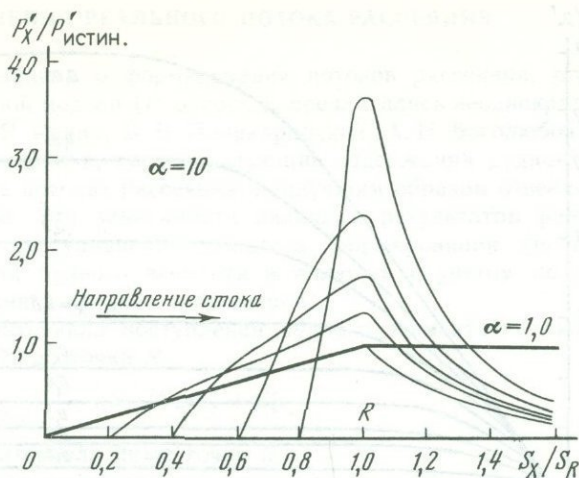


Рис. 26. Графики кажущейся продуктивности $P'_x = f(s_x)$ при $\alpha' = 10,0$ и различных значениях $S_{R_0} : S_R$

являющейся результатом решения дифференциального уравнения процесса формирования реального потока рассеяния. В этом выражении C'_R, S_R соответствуют содержанию рудного элемента и площади водосбора в точке, отвечающей максимуму кажущейся продуктивности ($P'_R = P'_{\max}$). Вычисления α' ведутся для 2—3 точек ниже точки R по течению, из найденных значений $\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \dots$ вычисляется среднее геометрическое $\tilde{\alpha}'$ и по размаху $\lg(\alpha'_{\max}/\alpha'_{\min})$ величина стандартного множителя $\epsilon^{\pm 1}$. Если первое определение α'_1 много меньше остальных $\alpha'_2, \alpha'_3, \dots$, его не следует принимать во внимание. Этот признак указывает, что действительное положение точки R ближе к точке $R+1$, хотя из-за дискретности опробования максимум P'_x достигнут в R . С учетом этого практика определений α'_i подтверждает его устойчивость и ϵ обычно близко к $1,1^{\pm 1} - 1,2^{\pm 1}$. По абсолютной величине α' мало зависит от свойств рудного элемента и в большой степени от размеров площади S_R , с увеличением которой α' достигает значений $n \cdot 10^2 - n \cdot 10^3$.

По найденным значениям $\tilde{\alpha}'$ вычисляется величина поправочного множителя

$$\lambda' = \frac{1 - (S_{R_0}/S_R)}{1 - (S_{R_0}/S_R)^{\alpha'}}$$

с помощью которого определяется истинная продуктивность литохимического потока рассеяния: $P'_{\text{ист.}} = \lambda' P'_{\max}$, где $\lambda' \leq 1,0$.

Если поток рассеяния начинается непосредственно с вершины ручья $S_{R_0} = 0$, следовательно $\lambda' = 1,0$ и $P'_{\max} = P'_{\text{ист.}}$. При $\alpha' = 1,0$ имеем $\lambda' = 1,0$ и поток рассеяния формируется в согласии с идеальной моделью.

Для оценки λ' по конкретным значениям α' и S_{R_0}/S_R помимо вычислений по приведенной формуле предложена специальная номограм-

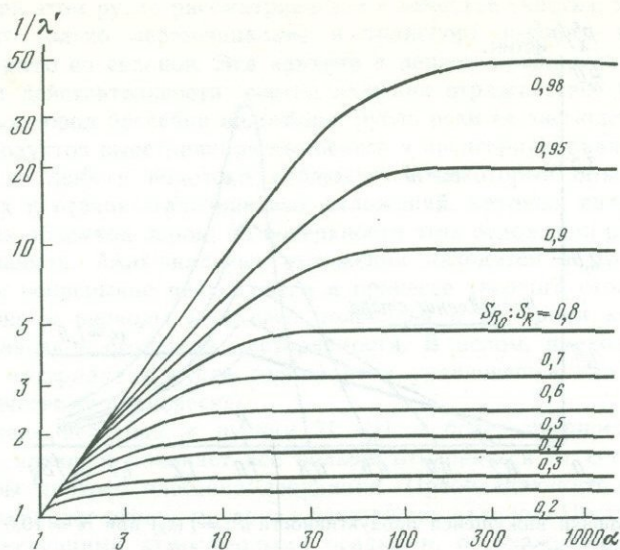


Рис. 27. Номограмма $1/\lambda'$ для различных значений α и S_{R_0}/S_R

ма, которая неоднократно публиковалась [36, 37]. Здесь для практического использования на рис. 27 представлена номограмма $1/\lambda'$, по которой удобно оценить, во сколько раз содержание рудного элемента $C'_R = C'_{\max}$ в реальном потоке рассеяния выше его величины, рассчитанной для идеальной модели. Этот важный признак определяется зависимостью:

$$C'_{\max} = \frac{1}{\lambda'} \cdot \frac{k' P}{S_R} + C'_\phi,$$

где P — продуктивность в $m^2\%$ того ореола рассеяния, для которого рассчитывается содержание рудного элемента в аллювии, и k' — местный коэффициент пропорциональности между продуктивностями ореолов (P, q) и потоков рассеяния (P', q'). Имеющийся опыт позволяет ориентировочно принимать в горных районах гумидной зоны k' равным 1 для Pb, Ag, Zn; k' равным 0,5—0,7 для Cu, Mo; k' равным 0,2—0,5 для F; k' равным 2,0—3,0 для Sn, W, Ba. Численные значения k' для Au, Pt определению не поддаются. В ландшафтах аридной зоны возможны значения k' значительно больше 1,0 для Sg, F, Mo.

Расчеты C'_{\max} показывают, что отклонение от идеальной зависимости, осложняя количественную интерпретацию потоков рассеяния, одновременно существенно увеличивает поисковые возможности литохимических съемок; практика это подтверждает. Таким образом, нет причин отказываться от опробования аллювия в среднем и нижнем течении больших рек — промышленные месторождения и в этих условиях способны создавать надежно выявляемые литохимические аномалии (см. табл. 43).

3.7. УРАВНЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ПОТОКА РАССЕЯНИЯ

Решения задачи о формировании потоков рассеяния, отклоняющихся от идеальной модели ($P'_x \neq \text{const}$), предлагались неоднократно (А. П. Соловов, Н. Я. Кунин, В. В. Поликарпочкин, А. Н. Боголюбов). Ниже приведены уравнения, характеризующие содержания рудного элемента C'_x в реальных потоках рассеяния, наилучшим образом отвечающие практике поисков. Эти зависимости являются результатом решения дифференциального уравнения процесса формирования средневзвешенных содержаний рудного элемента в аллювии с учетом положения точек опробования и местных параметров.

Для интервала поступления рудного элемента со склона в русло, от точки R_0 до точки R

$$C'_x = \frac{P}{S_R - S_{R_0}} [1 - (S_{R_0}/S_R)^{\alpha'}] + C'_\phi.$$

Для интервала ниже точки R

$$C'_x = \frac{(C'_R - C'_\phi)}{(S_x/S_R)^{\alpha'}} + C'_\phi.$$

Здесь P — продуктивность вторичного ореола рассеяния в бассейне данного русла в $\text{м}^2\%$; S_{R_0} , S_R и S_x — площади водосборов в м^2 , отвечающие точкам опробования R_0 , R и x ; C'_R , C'_x — соответственно содержания рудного элемента в $\%$ в тех точках; C'_ϕ — фоновое содержание в аллювии и $\alpha' \geq 1,0$ — склоновый коэффициент аллювия, определяющий меру отклонения конкретного потока рассеяния от идеальной модели, при которой $\alpha' = 1,0$. При выводе этих уравнений оставлено в силе ранее высказанное допущение о равномерном распределении продуктивности ореола рассеяния в интервале $R - R_0$, т. е. о постоянстве показателя $\Delta P = \frac{P}{S_R - S_{R_0}}$. Очевидно, что ниже точки R , где ореолы рассеяния на склоне отсутствуют, $dP/dS = 0$.

Согласно этим уравнениям для интерпретации выявленных потоков рассеяния необходимо определить местные значения α' и поправочного множителя $\lambda' \leq 1,0$ для пересчета кажущейся продуктивности потока $P'_x = S_x(C'_x - C'_\phi)$ к величине истинной продуктивности $P'_{\text{ист.}} = \lambda' P'_{\text{max}}$ (см. 3.6).

Количественная интерпретация потоков рассеяния производится на микрокалькуляторах, в том числе по специальным программам, или на ЭВМ по программе «Поток». Две или несколько аномалий в одном русле, разделенные фоновыми содержаниями рудного элемента, интерпретируются независимо. При сближенном положении аномалий необходимо их разделение согласно приведенных уравнений [36].

3.8. ПРОГРАММА «ПОТОК»

Данная программа позволяет оценить площадную продуктивность ореолов рассеяния на склоне и основана на уравнении реального потока рассеяния (см. 3.7), записанного в следующей форме:

$$\bar{C} = C' + \beta S \frac{dC'}{dS},$$

где S — площадь водосбора точек русла, рассматриваемая как независимая переменная (текущая координата), C' — надфоновые содержания элемента в потоке, \bar{C} — среднее надфоновое содержание элемента на склонах, т. е. на линии, соединяющей данную точку русла с водоразделами по нормальям к склонам, β — коэффициент выноса ($\beta = 1/\alpha'$, где α' — склоновый коэффициент аллювия). Очевидно, что $0 \leq \beta \leq 1$, причем при $\beta = 1$ поток рассеяния идеален. Интегрируя это уравнение вдоль русла в предположении постоянства коэффициента выноса, получим:

$$P = \beta C' S + (1 - \beta) \int_0^S C' dS,$$

где P — продуктивность ореолов рассеяния на склоне. Последнее равенство означает, что продуктивность P есть среднее пропорциональное кажущейся продуктивности потока рассеяния $P' = C' S$ и интеграла от

содержаний в аллювии $P'' = \int_0^S C' dS$, причем коэффициентом пропорциональности служит коэффициент выноса β . Обе величины (P' и P'')

определяются непосредственно по значению содержаний элемента в русловых пробах. С другой стороны, аппроксимируя график средних содержаний на склоне гауссовой кривой $C = \bar{C}_{\max} \exp[-(S - S_0)^2/\sigma^2]$, где S_0 — координата точки с максимальным оруденением, \bar{C}_{\max} — среднее содержание на склоне для этой точки, σ — параметр, по смыслу близкий к коэффициенту гипергенного рассеяния, продуктивность ано-

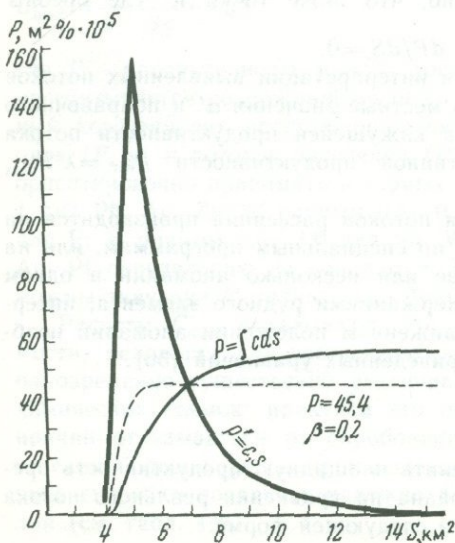


Рис. 28. К интерпретации потоков рассеяния на ЭВМ. Программа «Поток»

малии на склоне $P = \int_0^S \bar{C} dS$ можно выразить через эти 3 параметра.

Приравнявая две независимые оценки продуктивности аномалии, можно найти все 4 неизвестных параметра.

В программе «Поток» реализован нелинейный метод наименьших квадратов, позволяющий вычислить параметры β , S_0 , \bar{C}_{\max} и σ , исходя из условий минимальности суммы квадратов отклонений между оцен-

ками $P = \beta P' + (1 - \beta) P''$ и $P = \int_0^S \bar{C} dS$ по всем точкам опробования,

в которых проявляется оцениваемая аномалия. Исходными данными для программы «Поток» служат содержания исследуемого элемента в точках пробоотбора (в аллювии) и площади водосбора этих точек. На рис. 28 приведен пример, иллюстрирующий результат работы программы.

3.9. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОСМОТР АНОМАЛИЙ НА МЕСТНОСТИ

Геологическая эффективность геохимических съемок зависит от правильной оценки выявляемых аномалий, которая подчиняется ряду обязательных требований [17]. Важнейшими из них являются геологический осмотр аномалий на местности с повторно контрольными и детализационными съемками тем же методом, которым эта аномалия была выявлена. Это распространяется на первичную оценку лито-, гидро-, атмо- или биогеохимических аномалий, реальное существование которых должно быть подтверждено теми же повторными съемками до перехода к другим видам работ. Камеральная обработка имеющихся поисковых данных позволяет установить очередность осмотра аномалий на местности; отбраковка аномалий без геологического осмотра недопустима.

Главная задача геологического осмотра гипергенных геохимических аномалий — решение вопроса, заслуживает ли данная аномалия более детальных работ и какими должны быть объемы, методика и очередность этих исследований. Детализационный пробоотбор, который сопровождает геологический осмотр аномалий, в любом случае не может на перспективных объектах заменить работ следующей стадии. Чем богаче, ярче и перспективнее аномалия, тем меньше времени требуется на ее оценку («заверку») и тем быстрее на ней должны быть начаты работы следующего, более детального масштаба. Минимальными должны быть трудозатраты и на аномалиях, подлежащих отбраковке. В итоге для осмотра одной аномалии достаточно одного, реже двух рабочих дней геолога-геохимика при общем числе всех видов отобранных проб не более 100.

Среди гипергенных геохимических аномалий, выявляемых региональными и поисковыми литохимическими съемками на малоизученных территориях, выделяются следующие основные типы:

А — рудные аномалии, вторичные литохимические потоки и ореолы рассеяния коренного оруденения;

Б — безрудные аномалии (в том числе, «породные»), связанные с повышенными средними содержаниями рудных элементов в определенных петрографических разностях изверженных пород или в конкретных литолого-стратиграфических горизонтах осадочных толщ; к ним же относятся гипергенные аккумуляции рудных элементов на различных геохимических барьерах, не имеющие промышленных аналогов;

В — техногенные аномалии, связанные с деятельностью человека и чаще всего приуроченные к населенным пунктам, к местам современной или древней добычи, транспортировки и переработки руд (в частности, к местам древних плавов).

Многолетний опыт проведения литохимических поисков в различных районах СССР свидетельствует о рудной природе абсолютного большинства выявляемых гипергенных аномалий, подлежащих соответствующей оценке. Безрудные и техногенные аномалии подлежат учету и отбраковке в результате осмотра на местности с указанием их природы в отчетных документах и соответствующих каталогах.

Геологический осмотр потоков рассеяния начинается с посещения русла водотока, где установлены максимальные содержания основного рудного элемента; далее осмотр распространяется на прилегающие горные склоны, водоразделы и смежные русла. При осмотре необходимо иметь топографическую и геологическую карты соответствующих масштабов и контактные отпечатки аэрофотоснимков с вынесенными точками первичного пробоотбора, копии карт-разносок содержаний основных рудных элементов и графики продуктивностей потоков рассеяния.

Коренное оруденение, образовавшее конкретный поток рассеяния, может быть встречено на одном или обоих склонах, прилегающих к интервалу возрастающей продуктивности потока рассеяния до ее перехода к постоянным значениям (см. 3.5) или резкого убывания (см. 3.6). Если в последней пробе вверх по течению содержания рудных элементов аномальны, следует продолжить опробование аллювиально-пролювиальных отложений в сторону верховьев рек и сухих русел с шагом 200—250 м. Если пробы из рек и ручьев I—II порядков имеют фоновые содержания металлов, а интервал аномальных значений падает на нижнее или среднее течение рек III—IV порядков, то детализационному опробованию подлежат сухие русла, ложбины стока и отложения подножий склонов по обоим бортам основного русла.

Высокая продуктивность потока рассеяния в равной степени может быть связана с богатым локальным оруденением и бедной рассеянной минерализацией, развитой на большой площади. Поэтому в задаче геологического осмотра прилегающих горных склонов и водоразделов входит обнаружение рудных свалов и коренных выходов с высокими (промышленными) содержаниями металлов. Для их геохимической и минералогической характеристики необходим отбор сборных штучных, пунктирных, лотковых (шлиховых) проб и образцов. С этой же целью в районе таких выходов следует производить пробоотбор из элювиоделювиальных образований с шагом 25—50 м по серии профилей (3—4),

пересекающим зону ожидаемого (или выявленного) коренного оруденения.

В результате геологического осмотра участка выявленных потоков рассеяния при его благоприятной оценке должны быть охарактеризованы рудно-формационный тип и условия залегания ожидаемого оруденения и оконтурирована площадь, на которой целесообразна постановка литохимической съемки по вторичным ореолам рассеяния с обязательным указанием номенклатуры трапеций масштаба 1 : 50 000 (1 : 25 000). Каждый из этих вопросов, а также отрицательная оценка участка, должны быть подкреплены геологическими наблюдениями с записями в полевом дневнике исполнителя и соответствующим пробоотбором с отражением всех этих данных на схемах масштаба не мельче 1 : 100 000.

Результаты анализа отобранных при геологическом осмотре контрольно-детализационных проб в совокупности с первичными данными и материалы геологических наблюдений определяют оценку выявленного объекта, обоснованную подсчетом прогнозных ресурсов металлов по категории P_3 или мотивированный отказ от их подсчета. Цифры прогнозных ресурсов являются единственным объективным критерием выбора первоочередных участков для постановки более детальных исследований и максимального сокращения числа непромышленных рудопроявлений, вовлекаемых в дальнейшее изучение.

3.10. ОЦЕНКА ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ КАТЕГОРИИ P_3

При региональных геохимических съемках масштаба 1 : 200 000 оценка прогнозных ресурсов P_3 имеет целью выделение рудоносных площадей с ожидаемым нахождением крупных месторождений и служит обоснованием направления дальнейших геолого-съемочных, геохимических и геофизических работ. Эта оценка является обязательной в качестве объективного критерия геологических результатов при опосковании обширных малоизученных территорий площадью в десятки и сотни тысяч квадратных километров.

Оценка в основном выполняется по данным литохимических съемок по параметрам потоков рассеяния с учетом имеющихся геологических и геофизических данных. На стадии региональных съемок в экономически менее развитых районах объектами поисков служат только крупные месторождения с относительно легко доказуемыми запасами сырья (не слепые). Такие месторождения создают в аллювии современной гидросети достаточно яркие литохимические потоки рассеяния рудных элементов, количественная интерпретация которых позволяет выразить их оценку в цифрах прогнозных ресурсов металла категории P_3 .

После осмотра аномалий на местности подсчет прогнозных ресурсов в тоннах металла ведется по формуле

$$Q'_H = \frac{1}{40k'k} H \sum_{i=1}^m P'_i$$

Здесь Q'_H — прогнозные ресурсы, подсчитанные до глубины H м по

параметрам потоков рассеяния, k' и k местные коэффициенты и $\sum P_i$ — сумма устойчивых ($P_i = \text{const}$) и пересчитанных на истинную величину ($P'_{\text{ист}} = \lambda' P'_{\text{max}}$) продуктивностей (в $\text{м}^2 \%$) потоков рассеяния по m смежным руслам, дренирующим рудное поле выявленного месторождения. Деление на 40 соответствует переходу от $\text{м}^2\%$ к т/м металла; $\lambda' < 1,0$ — поправочный множитель (см. 3.7).

При подсчетах значения k' и $k \geq 1,0$ принимаются во внимание на основе опыта работ в данном районе. С учетом непредсказуемых значений местной величины k' для Au (и Pt) оценки прогнозных ресурсов Au (и Pt) по потокам рассеяния не практикуются. В горных районах при недостатке данных значения k' , k для Pb, Ag могут приниматься $\approx 1,0$, для Sn, W — 1,5...2,0, для Cu — 0,7 и т. д. Выбор глубины подсчета H определяется видом полезного ископаемого и на данной стадии может проводиться до фиксированной глубины 100 м (для Ag, Bi, Be и других редких металлов) или 200 м (для Pb, Zn, Cu и других цветных металлов). Как общее правило, при больших значениях $\sum P_i$ глубина подсчета увеличивается, при ожидаемом глубоком эрозионном срезе оруденения глубина подсчета H уменьшается. При недостатке данных средняя глубина эрозионного среза рудного поля в условной метрике принимается $z = 0,5$. Введение поправки на забалансовые руды ($\alpha < 1,0$) обычно не практикуется.

Оценки прогнозных ресурсов по литохимическим потокам рассеяния считаются подтвердившимися, если последующие оценки по категории P_2 (и более высоким категориям) будут отличаться от Q'_H менее чем в 3 раза в любую сторону ($\times 3^{\pm 1}$).

3.11. ШЛИХОВАЯ СЪЕМКА

Шлиховая съемка — минералого-геохимический метод поисков рудных месторождений и геологического картирования. Производится путем промывки 20—30 кг (иногда 50—100 кг) рыхлых продуктов выветривания горных пород или искусственных протолок с целью получения шлиха — концентрата тяжелых минералов ($d > 3,0 \text{ г/см}^3$). Состав шлиха позволяет судить о наличии на исследуемой площади полезных ископаемых, о составе интрузивных пород, об источниках формирования и корреляции осадочных толщ и т. д. Шлиховая съемка известна с давних времен, подробное описание ее имеется уже в трудах М. В. Ломоносова. Шлиховая съемка уступает по геологической эффективности, универсальности и технико-экономическим показателям поисковой литохимической съемке, выполняемой путем прямого спектрального анализа проб (50 г) с целью обнаружения месторождений по их гипергенным потокам и ореолам рассеяния.

Методическую основу шлиховой съемки составляет анализ шлихов, начинающийся с их разделения на фракции — магнитную, электромагнитную и немагнитную, последняя, в свою очередь, разделяется в тяжелых жидкостях на легкую и тяжелую фракции. Минералогический анализ фракций ведется под бинокулярным микроскопом с применением микрохимических реакций, метода растирания порошков, фотометрии пламени, люминесцентного, радиометрического и эмиссионного спек-

Таблица 44

Главнейшие минералы шлихов

Минерал	Плотность d , г/см ³	Фракция
Магнетит $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	4,9 — 5,2	Магнитная
Ильменит FeTiO_3	5,0	Электромагнитная
Лимонит $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	3,6 — 4,0	
Хромит $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$	4,1 — 4,9	
Вольфрамит (Fe, Mn) WO_4	6,7 — 7,5	
Колумбит—Танталит (Fe, Mn) $(\text{Nb, Ta})_2\text{O}_6$	5,15— 8,2	
Гранаты * $\text{R}_3\text{R}_2 (\text{SiO}_4)_3$ *	3,4 — 4,3	
Пироп $\text{Mg}_3\text{Al}_2 (\text{SiO}_4)_3$	3,5 — 3,8	
Моноцит (TR) (PO_4)	4,9 — 5,5	
Рутил TiO_2	4,2	Немагнитная тяжелая
Циркон ZrSiO_4	4,2 — 4,86	
Бадделейт ZrO_2	5,5 — 6,0	
Апатит $\text{Ca}_5\text{F} (\text{PO}_4)_3$	3,13— 3,23	
Корунд Al_2O_3	3,95— 4,1	
Касситерит SnO_2	6,8 — 7,1	
Шеелит CaWO_4	5,8 — 6,0	
Пирит FeS_2	4,95— 5,1	
Золото Au	15,6 — 19,3	
Кварц SiO_2	2,65	
Полевые шпаты (Na, K) $(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	2,5 — 2,76	

* R — Fe, Al, Mn, Ca, Cr, Ti.

трального анализа. В табл. 44 приведен перечень главнейших шлиховых минералов. Состав шлихов чрезвычайно разнообразен и перечисленными минералами не исчерпывается. В зависимости от геологического строения территории и степени «доводки» шлиха, в нем могут преобладать тяжелые темноцветные минералы (в первую очередь магнетит — «черный шлик») либо легкие минералы немагнитной фракции (кварц и полевые шпаты — «серый шлик»). В настоящее время для отмывки шлихов, в дополнение к традиционному лотку, применяются специальные гидравлические классификаторы конструкции ЦНИГРИ. В табл. 45 дана характеристика жидкостей, применяемых при анализе шлихов.

По результатам диагностики минералов составляются шлиховые карты в рабочем масштабе съемки. В частности, при поисках алмазных кимберлитов в «открытых» районах весьма эффективна пиропная съемка; при наличии перекрывающих континентальных отложений и траппов пиропная съемка не применима.

Спектральный анализ шлихов, практиковавшийся уже в 1935 г., за последнее время получил название «шлихо-геохимического метода поисков». Несомненно, спектрографические исследования состава шлихов следует считать обязательными. Важную дополнительную информацию (в том числе, о содержаниях элементов-спутников в минералах) способен принести спектральный анализ сотен тысяч шлихов, храня-

Таблица 45

Характеристика тяжелых жидкостей

Тяжелая жидкость	Плотность d , г/см ³	Примечание
Бромформ СНВг ₃	2,89	Растворим в этиловом спирте
Жидкость Туле HgJ ₂ ·2KJ	3,19	Насыщенный водный раствор
Жидкость Сушина HgJ ₂ ·BaJ ₂	3,45	То же
Жидкость Клеричи CH ₂ (CO ₂) ₂ Tm ₂ +HCO ₂ Tm	4,27—5,0	—>—

щихся в архивах и в свое время не подвергавшихся этим исследованиям. Самостоятельное геолого-поисковое значение шлихо-геохимического метода иногда переоценивается.

Первостепенное значение имеет лотковое (шлиховое) опробование при геологическом осмотре и оценке литохимических потоков и остаточных ореолов рассеяния, предположительно связанных с оруденением, содержащим тяжелые минералы (Au, Pt, SnO₂, HgS, CaWO₄ и др.).

Интерпретация результатов шлиховой съемки до сих пор остается на качественном уровне: массовые («весовые») количества рудного минерала — хорошо, единичные знаки — плохо.

3.12. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Методы поисков полезных ископаемых путем изучения химического состава природных поверхностных и подземных вод выполняются путем опробования рек, ручьев, родников, колодцев и скважин, вскрывающих водоносные горизонты, с последующим анализом микроэлементного состава воды. Принципиальную основу этого метода составляет способность воды к растворению горных пород, ее активное участие в химических превращениях минералов и свойства воды как подвижной среды [11, 17, 25].

Наиболее благоприятными объектами для гидрохимических поисков являются месторождения минеральных солей — различных природных хлоридов и сульфатов. Суммарное содержание этих соединений в природных рассолах может превышать 350 г/л, они способны устойчиво сохраняться в растворах, определяя в конечном итоге состав океанической воды с минерализацией 35,6 г/л. Важное практическое значение сохраняет гидрохимический метод поисков месторождений калийных солей. Эффективно применение гидрохимического метода при поисках минеральных источников, промышленных иод-бромных вод и месторождений боратов.

Среди рудных месторождений наиболее благоприятными объектами для гидрохимических поисков являются сульфидные (в первую очередь, колчеданно-полиметаллические и богатые дисульфидами медно-колчеданные месторождения). Обогащение природных вод рудными элементами происходит главным образом при гипергенном окислении первичных сульфидных руд, в ходе которого труднорастворимые, но неустойчивые

в поверхностных условиях сульфиды до перехода в труднорастворимые вторичные минералы проходят стадию легкорастворимых сульфатов.

В подземных водах, омывающих окисляющиеся сульфидные месторождения, формируются гидрохимические ореолы и потоки рассеяния рудных элементов и сульфат-иона. Количественными методами в них фиксируется более 40 микроэлементов, входящих в состав рудо- и породобразующих минералов. Уровень содержаний и ассоциации этих микроэлементов достаточно разнообразны и зависят от многих факторов. Содержания основных элементов в кислых рудничных водах активно окисляющихся колчеданных залежей могут достигать огромной величины. В табл. 46 приведены сведения о распространенности некоторых микроэлементов в подземных водах рудных месторождений.

Повышенные, аномальные содержания рудных элементов в речных и подземных водах сохраняются на расстояниях до 1000 м (иногда до нескольких километров) от месторождений. Практика гидрохимических исследований подтверждает несомненную реальность обнаружения при поисках водных ореолов и потоков рассеяния рудных месторождений. Так, при проверке гидрохимической аномалии, выявленной Е. Е. Кузьминым в долине р. Хараелах (Красноярский край), первые же скважины вскрыли сульфидные руды, что привело к открытию медно-никелевого месторождения. Однако проведение гидрохимических поисков в открытых горных районах в качестве конкурирующих с литохимическими

Таблица 46

Содержание (в мг/л) микроэлементов в некоторых типах природных вод [25]

Элемент	Среднее содержание в водах зоны гипергенеза C_r	Максимальное содержание в водах рудных месторождений	
		кислых ($pH \leq 6,5$) C_k	щелочных ($pH \geq 7,5$) C_m
Серебро	$2,9 \cdot 10^{-4}$	126	0,06
Мышьяк	$2,07 \cdot 10^{-3}$	1500	0,20
Золото	$2,7 \cdot 10^{-5}$	0,0055	0,0012
Бор	0,0418	1,4	5,0
Бериллий	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,52	0,30
Бром	0,183	125	44,2
Кобальт	$8,3 \cdot 10^{-4}$	3600	0,024
Медь	$2,8 \cdot 10^{-4}$	45633	1,1
Фтор	0,45	8,0	15000
Ртуть	$9,1 \cdot 10^{-4}$	0,07	0,08
Йод	0,0161	2,0	4,3
Литий	0,014	0,21	18,6
Молибден	$2,01 \cdot 10^{-3}$	0,70	0,07
Никель	$3,31 \cdot 10^{-3}$	30000	0,24
Свинец	$2,21 \cdot 10^{-3}$	1377	0,20
Рубидий	$2,22 \cdot 10^{-3}$	0,14	6,6
Сурьма	$1,53 \cdot 10^{-3}$	2,4	0,025
Селен	$9,1 \cdot 10^{-4}$	0,30	0,05
Олово	$4,1 \cdot 10^{-4}$	0,30	—
Стронций	0,185	1,9	—
Цинк	0,034	50300	1,5

Примечания. Средние содержания в водах зоны гипергенеза даны по С. Л. Шварцеву. Сведения о стандартных отклонениях s и числе определений n автор не приводит.

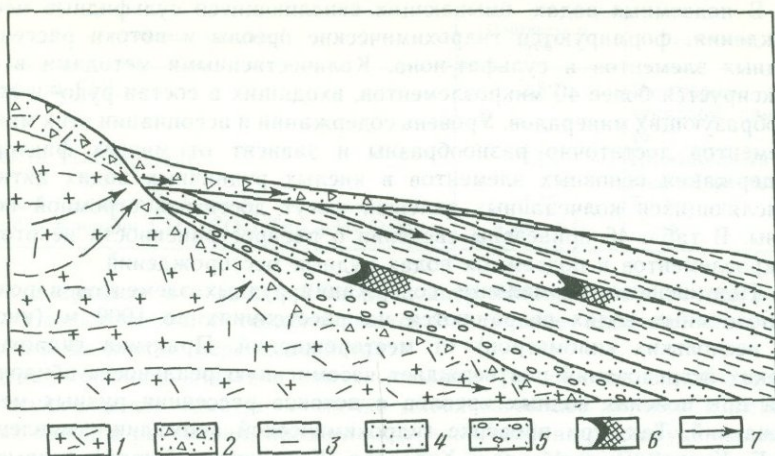


Рис. 29. Схема локализации рудных урановых залежей в свите осадочных пород на приподнятом крыле артезианского бассейна. По А. И. Перельману: 1 — граниты; 2 — делювиально-пролювиальные отложения; 3 — водоупорные породы; 4 — водопроницаемые породы; 5 — конгломераты; 6 — руда; 7 — направление движения вод

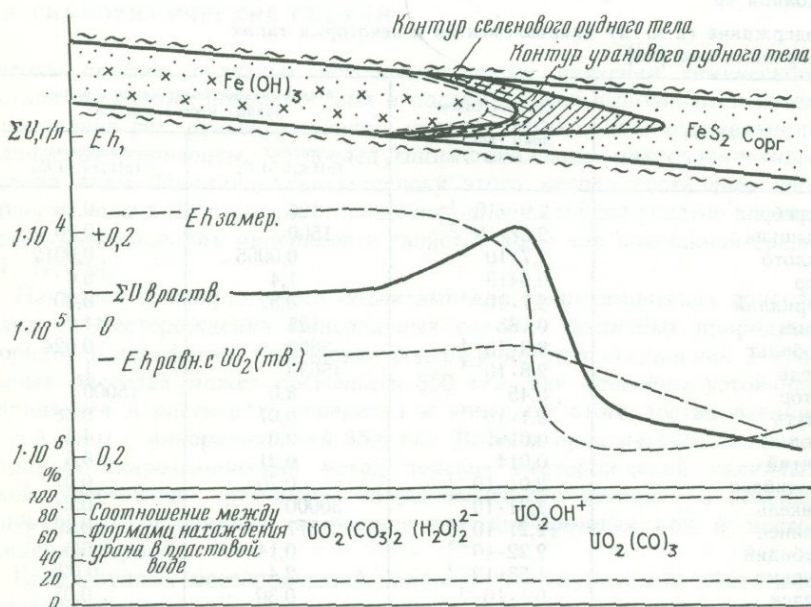


Рис. 30. Положение уранового и селенового оруденения в эпигенетической зональности. По А. И. Перельману (1968)

вряд ли обосновано. Потоки рассеяния рудных месторождений, выходящих на поверхность, формируются в горных районах за счет склоновой денудации и дефлюкции остаточных ореолов рассеяния, образованных устойчивыми минералами окисленных руд. Солевая составляющая этих литохимических потоков рассеяния играет подчиненную роль. Простые расчеты показывают, что доля растворимого стока рудных элементов в горных районах Сибири и Северо-Востока СССР составляет 0,1—0,5% объема их общего стока. Для горных рек аридной зоны доля растворимого стока многократно уменьшается. В этих условиях преимущества опробования в поисковых целях твердой фазы стока очевидны.

Чрезвычайно эффективная область применения гидрохимического метода — поиски месторождений зон пластового окисления. Рудные тела этих месторождений («роллы») формируются из природных вод на восстановительном барьере (рис. 29). Рудные тела приурочены к водоносным горизонтам артезианских бассейнов, содержащих пластовые напорные воды. Они не подчиняются стратиграфическому контролю, но занимают закономерное положение в эпигенетической зональности, которая обусловлена инфильтрацией кислородных вод в сероцветные песчаные породы (рис. 30). Характерная особенность месторождений этого типа — полное соответствие минералого-геохимической зональности в породах и гидрохимической зональности в подземных водах. Богатые кислородом атмосферные осадки, фильтруясь через породы гранитного массива, способны обогащаться шестивалентным ураном, хотя содержание в них этого элемента лишь немного выше фонового ($n \cdot 10^{-5} \% U$). При поступлении в водоносный горизонт осадочных отложений эти воды расходуют свой кислород на окисление органического вещества. На границе между окисленной частью пласта и его исходным состоянием возникает резкая смена геохимических условий и на восстановительном барьере происходит осаждение четырехвалентного урана. В итоге содержание урана в пластовых водах падает на целый порядок (до $n \cdot 10^{-6} \% U$). Поэтому в задачу гидрохимических поисков входит локализация интервала подземных вод, в котором происходит смена окислительных условий на восстановительные.

3.13. НАВОДНЫЕ И ПОДВОДНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Данные виды геохимических съемок проводятся с целью поисков полезных ископаемых, прослеживания рудоконтролирующих и нефтелокализирующих структур и региональных тектонических нарушений земной коры.

Наводные геохимические съемки проводятся по крупным рекам, озерам или (и) прибрежно-морской зоне, при которых моторные лодки и катера служат для базирования полевых геохимических отрядов и переездов между пунктами отбора лито-, гидро- или биогеохимических проб, при расстояниях между ними 0,5—1,0 км и более. В другом варианте на лодках и катерах устанавливается измерительная геохимическая аппаратура для производства атмосферических (особенно, газорудных) съемок или гидрохимических с ионно-селективными электродами, в том числе с непрерывной автоматической регистрацией измерений. В этих вариантах наводные съемки, в принципе, не отличаются от наземных (например, автомобильных) геохимических съемок и выполняются в тех

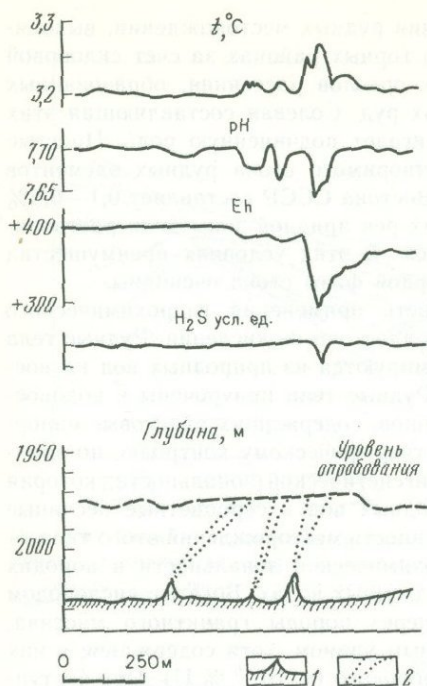


Рис. 31. Изменение физико-химических свойств морской воды и содержаний в ней воднорастворенных компонентов над «смокерами»
 1 — жерла «смокеров»; 2 — зоны подводных ореолов

же масштабах (чаще всего 1:200 000 — 1:500 000 и мельче). Такие съемки целесообразны в малообжитых северных районах таежной зоны, когда возможности водного транспорта позволяют компенсировать непроходимость территорий для колесного автотранспорта.

Подводные съемки проводятся при поисках нефтяных и газовых месторождений в области шельфа. При этом изучается распределение газовых компонентов (He , CH_4 и его гомологов) в водах современных илов и придонного слоя.

В настоящее время подводные съемки начинают проводиться в зонах срединно-океанических хребтов и рифтовых зон для поисков современных гидротерм («черных курильщиков», или «смокеров») и связанных с ними месторождений цветных металлов. Концентрация водно-растворенных компонентов и физико-химические параметры воды (pH, Eh, температура и др.) на горизонте опробования измеряются ионно-селективными электродами и специальными датчиками, буксируемых кораблем обычно со скоростью 6—8 км/ч. Пробы воды отбираются батометрами. Глубина опробования 2—5 км. Поисковыми признаками являются ореолы водно-растворенных газов (He , H_2 и др.), микроэлементов (Mn, Si и др.), положительные температурные аномалии и др. На рис. 31 показано изменение концентраций сероводорода и физико-химических свойств океанической воды над «смокерами». Характерная особенность ореолов подводных гидротерм — повышенная величина содержаний легкого и тяжелого изотопов гелия ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} > 4 \cdot 10^{-6}$.

3.14. АТМОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Атмохимические съемки — метод геохимических поисков полезных ископаемых и геологического картирования, основанный на исследовании состава газообразных компонентов в подпочвенной и приземной атмосфере. Съемки выполняются преимущественно в масштабах 1:1 000 000 — 1:100 000 при поисках месторождений нефти и газа, а также погребенных рудных месторождений в закрытых районах с мощностью чехла молодых осадков более 10 м. Самостоятельными видами атмохимических съемок являются газортутные и гелиевые съемки (см. 3.15 и 3.16).

Атмохимические ореолы рудных месторождений образуют газы трех генераций. Первая — компоненты рудообразующей среды (CO_2 , CH_4 , H_2 и др.), захваченные минералами в процессе рудоотложения. Их высвобождение происходит непрерывно по мере вскрытия газово-жидких включений при выветривании, динамометаморфизме и прочих внешних воздействиях. Вторую генерацию составляют газы глубинного происхождения (CO_2 , He, Ar, CH_4 , H_2 и др.), мигрирующие по рудоконтролирующим тектоническим зонам. Они являются продуктами химических и ядерных реакций, протекающих в земных недрах. К третьей генерации относятся газы (CO_2 , SO_2 и др.), образующиеся в зоне гипергенеза рудных месторождений. Гипергенное преобразование сульфидных минералов протекает с поглощением больших количеств кислорода, что приводит к резкому снижению его содержания в подземной атмосфере над месторождением. Газовые ореолы образуют и рудные элементы, поступающие в вышележащие породы и далее в атмосферу в виде летучих металлоорганических соединений и собственных паров. Сведения о содержаниях газов-индикаторов в атмохимических ореолах погребенных рудных месторождений приведены в табл. 47.

В соответствии с задачами съемок и ландшафтно-геохимическими условиями их проведения при атмохимических поисках изучается состав свободного подпочвенного воздуха, сорбированных и водно-растворенных газов, паров и летучих соединений металлов в приземном слое атмосферы. Определение газов выполняются на точках наблюдения и в физико-химических лабораториях из отобранных в поле проб (см. 7.7, 7.22).

Рациональными масштабами газосъемочных работ в закрытых рудных районах являются 1:100 000 — 1:50 000, сети 1000...500×100 м. Эти

Таблица 47

Характеристика газов-индикаторов атмохимических ореолов погребенных рудных месторождений

Компонент	Свободные газы			Сорбированные газы		
	C_{ϕ}	$\varepsilon^{\pm 1}$	C_{\max}	C_{ϕ}	$\varepsilon^{\pm 1}$	C_{\max}
CO_2 , %	0,25	2,5	3,0	2,7	1,6	8,2
O_2 , %	$20,6 \pm 0,2$	—	15,0	$16,9 \pm 1,1$	—	2,1
H_2 , $n \cdot 10^{-4}\%$	3,2	2,0	250	0,8	1,7	240
He, $n \cdot 10^{-4}\%$	5,4	1,1	8,1	5,6	1,1	8,2
CH_4 , $n \cdot 10^{-4}\%$	1,7	1,5	200	2,3	1,6	100
COS , $n \cdot 10^{-7}\%$	—	—	—	4,0	1,4	17,4

Примечание. Для O_2 дано C_{\min} ; содержания COS по Boom G. v. d. M. Pöppelbaum, 1982.

исследования сопровождаются наземными литохимическими съемками масштаба 1:50 000 по сети 500×50 м, ориентированными на выявление наложенных литохимических ореолов рассеяния рудных элементов. Для оценки устойчивости газовых аномалий во времени проводятся режимные наблюдения (см. 7.8).

Оценка атмосферических аномалий начинается с их осмотра на местности и выполнения контрольно-детализационных работ. При подтверждении ее реальности аномалия оценивается 3—5 профилями глубинной литохимической съемки, пересекающими ее вкrest простираения с пробоотбором из погребенной коры выветривания [17].

3.15. ГАЗОРТУТНЫЕ СЪЕМКИ

Газортутные съемки проводятся с целью поисков погребенных рудных месторождений (в первую очередь, ртутных) (табл. 48).

Наиболее распространены съемки по почвенному воздуху. Опробование выполняется из шпуров глубиной 0,4—0,7 м зондом с золотым сорбентом (рис. 32). Отсос газа в объеме 0,5—1 л проводится со скоростью 1 л/мин. После прокачки поглощенная сорбентом ртуть десорбируется нагреванием и потоком атмосферного воздуха вводится в ртутный фотометр (см. 7.21). При обводненности рыхлых отложений опробуется атмосферный воздух на высоте до 1,5 м.

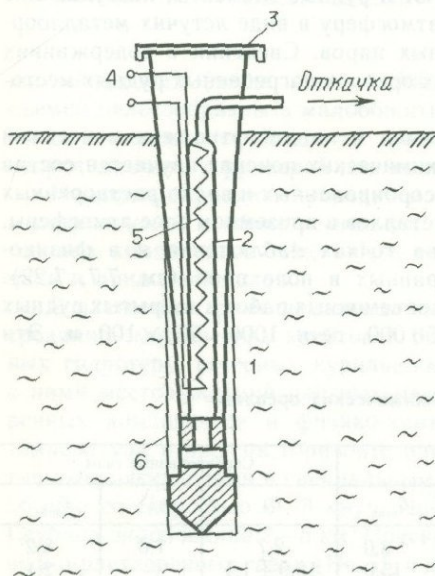


Рис. 32. Схема опробования подпочвенного воздуха при газортутной съемке

1 — рыхлые образования; 2 — стеклянная трубка; 3 — корпус зонда; 4 — электрический разъем; 5 — золотой сорбент; 6 — стенка шпура

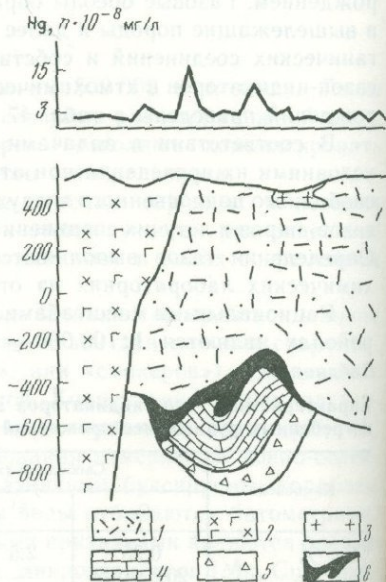


Рис. 33. Содержание паров ртути в почвенном воздухе над месторождением Николаевское

1 — риолитовые туфы; 2 — габбро-диориты; 3 — гранит-порфиры; 4 — известняки; 5 — песчанки, алевролиты; 6 — руды

Таблица 48

Содержания паров ртути (в $\mu\text{г}/\text{л}$) в области фона и в ореолах погребенных рудных месторождений [41]

Параметры	Среда опробования	
	Приземная атмосфера (H от 0,5 до 2 м)	Почвенный воздух
$C_{\text{ф}}$	1,3	5
$\sigma^{\pm 1}$	$1,08^{\pm 1}$	$1,08^{\pm 1}$
C_{max}	8	120

Глубинность газортутного метода при поисках колчеданных и полиметаллических месторождений достигает 300 м, ртутных и сурьмяных месторождений — 400 м. Рациональный масштаб поисковых съемок 1:50 000, плотность сети наблюдений 500×50 м. Газортутные ореолы часто имеют изрезанный вид (рис. 33).

3.16. ГЕЛИЕВЫЕ СЪЕМКИ

Гелиевые съемки — геохимический метод картирования крупных блоков земной коры, имеющий ограниченное поисковое значение, хотя содержание He нередко определяется при атмохимических поисках. В качестве самостоятельного вида работ гелиевые съемки выполняются в масштабах 1:2 500 000 — 1:1 000 000. За последние годы основные исследования в этой области проводились И. Н. Яницким и В. Н. Башориным.

В подземных условиях свободный подвижный. Не равномерно распределен во всех фазах вмещающей среды: минералах и породах, в подземных водах и свободных газах. На практике широко применяется водогелиевая съемка (содержание гелия в воде в исследуемой области соответствует интенсивности его потока). Содержания гелия определяют с помощью магниторазрядных индикаторов типа ИНГЕМ. Результаты анализа выражаются в Па ($1 \text{ мл}/\text{л} \approx 10^5 \text{ Па}$). В параметрах парциального давления оценивается гелиенасыщение исследуемой геологической среды в широких диапазонах изменения температуры, минерализации и газонасыщения.

Приповерхностное поле гелия отражает современный газообмен в верхней части литосферы, происходящий по зонам повышенной проницаемости. При этом на фоне нормального поля He (70—80% территории) выделяются аномалии, связанные с его восходящей фильтрационной нагрузкой. Фоновые концентрации воднорастворенного He возрастают с глубиной, составляя в интервале глубин от 10 до 100 м порядка $(1-100)^{-5} 10 \text{ мл}/\text{л}$ He. Интенсивность гелиевых аномалий может на 3—5 порядков превышать местный геохимический фон.

3.17. БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Данный метод поисков месторождений полезных ископаемых основан на способности организмов отражать в своем химическом составе особенности состава среды обитания. Съемки выполняются преимущест-

венно с целью поисков рудных месторождений путем определения содержания рудных элементов в пробах растительности, чаще всего после их озоления.

Упоминания о возможностях поисков полезных ископаемых путем исследования растительности встречаются уже в средневековой литературе. Геоботанические и микробиологические съемки, при которых в геолого-поисковых целях исследуются видовой состав растительных сообществ и морфологические особенности организмов, к числу геохимических методов не относятся и не рассматриваются.

Современные основы биогеохимического метода поисков заложены в работах С. М. Ткалича, А. П. Виноградова, В. В. Поликарпочкина, А. Л. Ковалевского и других исследователей; за рубежом — С. Палмквиста и Н. Брундина, Г. В. Уоррена, Х. Л. Кэннон, Р. Р. Брукса и др. По данным этих ученых, над месторождениями Cu, Ni, Co, Mo, Pb и Zn, U, Be, Au отмечались аномально высокие содержания этих элементов в химическом составе растений.

Поисковые биогеохимические съемки осуществляются путем площадного или профильного опробования одного или нескольких доминирующих видов растений, озоления проб и спектрального анализа полученной золы. Масштабы съемок 1:50 000 и крупнее, воздушно сухая масса проб 40—50 г. Наиболее благоприятны для проведения биогеохимических съемок виды и органы растений, в золе которых содержания микроэлементов возрастают пропорционально увеличению их содержания в почве, а в области фона — характеризуются устойчиво низкими, но определенными содержаниями элементов-индикаторов. Непригодны для опробования при биогеохимических поисках растения-концентраты и обладающие резко выраженным физиологическим барьером к восприятию высоких содержаний рудных элементов. У таких растений коэффициент биологического поглощения A_x (см. 1.16) падает с увеличением содержаний рудных элементов в почве [13].

Для выделения биогеохимических аномалий необходима надежная оценка параметров местного фона C_ϕ и ϵ в золе выбранных растений-индикаторов. Нижние аномальные содержания рудных элементов принимаются согласно критерия $C_{A, m} = C_\phi \cdot \epsilon^{3/\sqrt{m}}$, где $m = 2, 3, \dots, 9$ — число точек, объединенных на биогеохимической карте в единый аномальный контур. Эффективные размеры биогеохимических аномалий следует определять в контуре $C_\phi \cdot \epsilon^3$.

Применение биогеохимического метода оправдано лишь в тех геологических и ландшафтных условиях, когда выявление вторичных литохимических ореолов и потоков рассеяния затруднено. В горных районах любых климатических зон, для которых характерны выходящие на дневную поверхность вторичные остаточные литохимические ореолы рассеяния, проведение биогеохимической съемки нецелесообразно. На закрытых участках заболоченных равнин в таежных и тундровых ландшафтах в ограниченных объемах возможно применение биогеохимического метода поисков (опробование и анализ водных мхов), предложенного Г. П. Лапаевым. Биогеохимические съемки предпочтительны в закрытых рудных районах аридной зоны. В этих условиях растения с глубокопроникающей корневой системой способны фиксировать по-

гребенные рудные месторождения при чехле дальнеприносных отложений до 30—50 м.

Несмотря на полувековую историю развития, биогеохимические методы поисков полезных ископаемых не нашли широкого практического применения, и их эффективность остается низкой. В СССР первым практическим результатом биогеохимических работ является обнаружение Жарчихинского молибденового месторождения в Бурятии. Однако ряд авторов оспаривают роль биогеохимического метода при выявлении этого месторождения [36].

Попытки разработать «зоометрический метод разведки» в рудных районах, основанный на изучении физиологического состояния органов животных и определении в них содержаний химических элементов, не заслуживают внимания. Поиски с помощью специально обученных рудорозыскных собак малозффективны и не могут конкурировать с литохимическими поисками по вторичным наложенным ореолам рассеяния. Новые перспективы для поисков погребенных месторождений могут открыться при разработке аппаратуры на принципах бионики. В настоящее время созданы полимерные первичные преобразователи, способные количественно определять в воздухе концентрации элементов с порогом обнаружения $1 \cdot 10^{-15} \dots 1 \cdot 10^{-17}$ моль/л.

3.18. ПРОЧИЕ ВИДЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Каппаметрическая съемка — минералого-геохимический метод поисков полезных ископаемых и геологического картирования, основанный на измерении магнитной восприимчивости χ горных пород, продуктов их выветривания и почв. Индикатором геохимического поля и его локальных аномалий — литохимических потоков и ореолов рассеяния месторождений — является количественное содержание ферромагнитных минералов (магнетита, титаномагнетита, маггемита, гематита, пирротина) и темноцветных парамагнитных минералов (биотита, роговой обманки, авгита, ильменита, пирита и др.). Кварц, полевые шпаты, многие светлые породобразующие и некоторые рудные минералы диамагнитны. Метод предложил С. Д. Миллер в 1952 г. В течение ряда лет метод широко применялся в Казахстане в форме измерения магнитной восприимчивости проб поисковой литохимической съемки (до их механического истирания, связанного с привнесом Fe). Измерения производились индукционным каппаметром при норме 1400 проб в день на человека. Каппаметрическая съемка при ничтожных затратах существенно дополняет данные поисковой литохимической съемки, позволяя, например, в сочетании с магниторазведкой различать месторождения, вскрытые современным эрозийным срезом, погребенные и слепые. Примеры результатов каппаметрической съемки показаны на рис. 34 и 35. К середине 60-х годов применение каппаметрической съемки без каких-либо оснований постепенно прекратилось.

С целью расширения геологических возможностей поисковой литохимической съемки Н. А. Ворошилов в 1974 г. предложил взамен валового (прямого) спектрального анализа проводить анализ магнитной фракции проб, извлекаемой из них постоянным магнитом после вос-

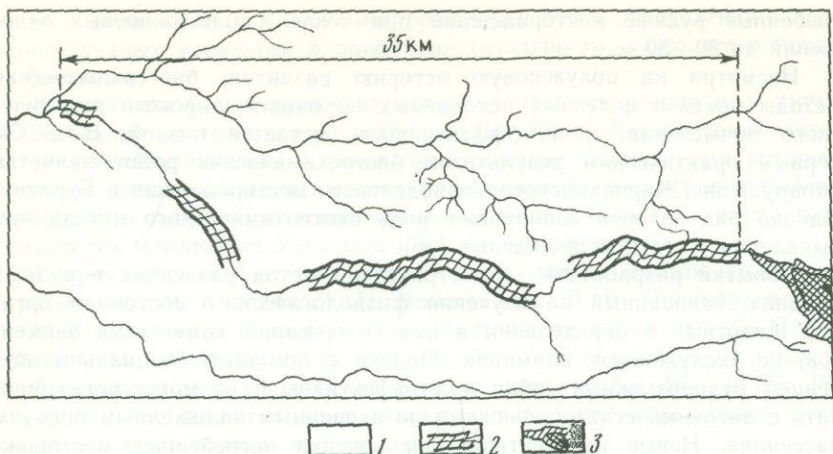


Рис. 34. Карта потока и ореола рассеяния магнетитового месторождения по данным капаметрии

1 — эффузивно-осадочные породы ($\kappa < 200$ ед.); 2 — аллювий ($\kappa \geq 1000$ ед.); 3 — элювиоделювий ($\kappa = 250, 500$ и 1000 ед.)

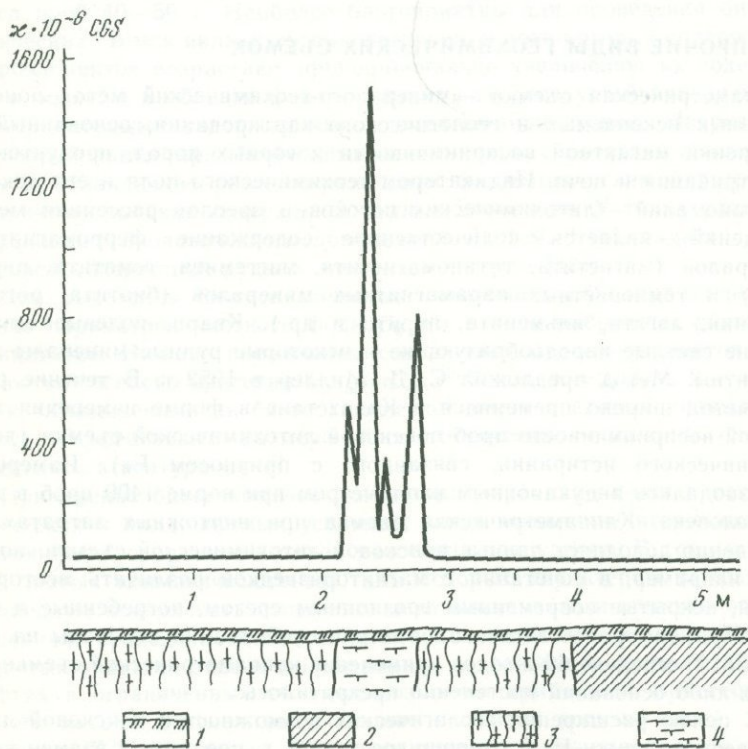


Рис. 35. График капаметрической съемки

1 — элювиоделювий; 2 — сланцы; 3 — гнейсы; 4 — серпентиниты. Длина профиля 5 км

становительного обжига. В гипергенных условиях соединения железа в литохимических пробах находятся преимущественно в форме слабо магнитных гидроксидов — лимонита и гётита ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; HFeO_2). При нагревании без доступа воздуха (800°C) обезвоживаясь они переходят в магнитную разность — γ -гематит или маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). В зоне окисления месторождений, содержащих сульфиды, многие рудные элементы мигрируют совместно с железом в форме легкорастворимых сульфатов, в последующем концентрируясь в гидроксидах Fe. Поэтому анализ магнитной фракции проб повышает контрастность ореолов и потоков рассеяния рудных месторождений.

Способ получил название «метод термомагнитных фракций» (МТФ) и, несомненно, имеет перспективы эффективного применения при поисках погребенных месторождений по их наложенным (весьма слабым!) ореолам рассеяния на поверхности чехла (см. 4.14). Для механизации извлечения магнитной фракции из навесок до 50 г с размером зерен 0,5—0,04 мм завод «Геоприбор» выпускает магнитные сепараторы марки СМД.

В числе других получили применение обзорные литохимические съемки путем опробования озерных отложений с плотностью 1 проба на 150—250 км² с одновременным гидрохимическим опробованием озерной воды. Такого рода геохимические съемки, отвечающие масштабу 1:1 500 000, были проведены в рудных районах Канады на площади более 200 тыс. км². По мнению авторов этих работ были получены положительные результаты. В процессе пробоотбора широко использовались вертолеты, в том числе в режиме зависания.

Обсуждая организацию подобных работ в рудных районах СССР, следует учитывать необходимость анализа геохимических проб с точностью не хуже $\pm 3\%$ (относительных), что значительно превышает обычную точность аналитических определений при геохимических съемках. Это требование не было выполнено при мелкомасштабных литохимических съемках в Южной Карелии (плотность 1 проба на 50 км²), что привело к их практической безрезультатности, поскольку каких-либо новых данных получено не было.

В опытным порядке с целью поисков скрытых рудных месторождений выполнялись геохимические съемки путем опробования снежного покрова. С этой целью В. К. Лукашев разрабатывает методику поисковых геохимических съемок с применением селективных сорбентов. Для выявления слабых наложенных ореолов рассеяния по точкам съемочной сети на глубину 1 м помещаются дозированные количества специального сорбента из класса волокнистых комплексообразующих производных целлюлозы. По истечении установленного срока (до нескольких месяцев) сорбент извлекается для анализа содержаний рудных элементов. Над погребенными месторождениями при мощности перекрывающих отложений до 170 м обнаруживались повышенные содержания катионов металлов. В известной мере аналогом этого метода является эманационный трековый метод (ЭТМ). При поисковых геохимических съемках этим методом по заданной сети на глубину 0,6—1,0 м помещаются измерительные камеры с чувствительной к α -излучению пленкой. После экспозиции в течение 25—30 дней камеры извлекаются, и пленки

после проявления изучаются на наличие треков α -частиц. Зарубежный и советский опыт подтверждают эффективность ЭТМ для поисков месторождений радиоактивных руд.

3.19. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ В РАЙОНАХ МОРЕННО-ЛЕДНИКОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Формирование вторичных литохимических ореолов в моренном покрове разделяется на три стадии.

1. Доледниковая стадия, в которую формируются остаточные ореолы рассеяния в коре выветривания.

2. Ледниковая стадия, в которую остаточные ореолы рассеяния в донной морене претерпевают смещения и разубоживание, а в абляционной морене формируются веерообразные обломочно-валунные потоки рассеяния протяженностью многие километры (рис. 36). С ледниковым веером рудных валунов сочетаются шлейфообразные микровалунные потоки протяженностью до 1 км и более на продолжении остаточных ореолов рассеяния в донной морене.

3. Послеледниковая стадия, в которую происходит современное химическое выветривание ледниковых отложений и развитых в них вторичных ореолов и потоков рассеяния с образованием сорбционно-солевых наложенных литохимических ореолов рассеяния и вторичных аккумуляций на геохимических барьерах. В силу сглаженного рельефа, повсеместного развития покрова ледниковых отложений, широкого развития озер и болот при сравнительно редкой речной сети современные аллювиальные потоки рассеяния поискового значения практически не имеют.

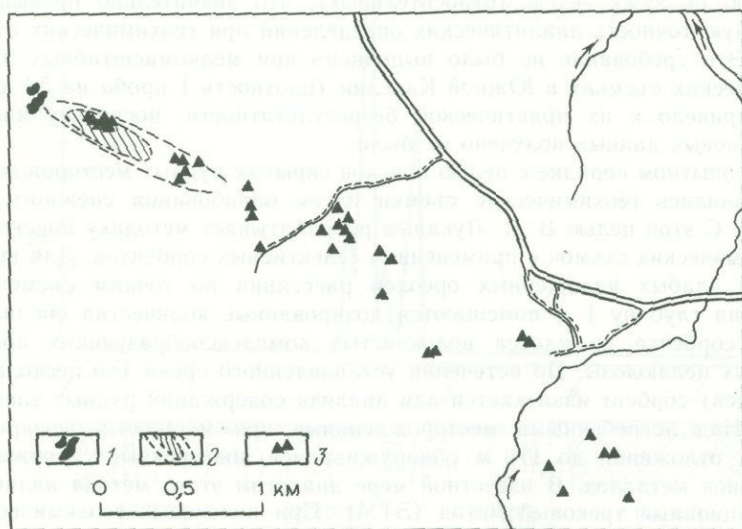


Рис. 36. Ледниковый веер рудных валунов. По Л. К. Кауранне:

1 — выход рудного тела; 2 — контуры литохимической аномалии ($1.5 \cdot 10^{-3}\%$ Ni и $2 \cdot 10^{-3}\%$ Ni); 3 — находки рудных валунов

В ледниковых ландшафтах аллювий современных рек представлен перемытой мореной и понятие «бассейн денудации» рудовмещающих пород к точкам пробоотбора в русле водотока здесь не применимо. Поэтому поисковые литохимические съемки здесь ориентируются либо на выявление валунно-ледниковых потоков рассеяния, либо сорбционно-солевых переотложенных смещенных и оторванных ореолов рассеяния. Наиболее рационально проводить поисковые литохимические съемки масштаба 1:200 000—1:50 000 по сети маршрутов с отбором проб по контурам болот и озер из под торфяного слоя. На этом горизонте происходит аккумуляция рудных элементов, переносимых в процессах твердого и жидкого стока с возвышенностей и формирование вторичных наложенных ореолов рассеяния на кислородном и щелочном геохимических барьерах в зоне высачивания грунтовых вод у подножья склона, либо на восстановительном (сероводородном, глеевом) барьере в подторфяном слое по внешнему контуру болот.

Отбор проб по правильной прямоугольной сети профилей весьма затруднен из-за широкого развития болот и озер, а интерпретация результатов осложняется частой сменой ландшафтных условий вдоль профиля, тогда как вдоль криволинейного маршрута у подножья склонов ландшафтная обстановка достаточно стабильна. Шаг опробования в зависимости от масштаба съемки принимается 50—200 м, средние расстояния между маршрутами 0,5—2 км соответствуют масштабу съемки. Глубина отбора проб 0,4—0,7 м (непосредственно вблизи уровня грунтовых вод). На спектральный анализ выделяется тонкая глинистая фракция ($\approx 0,07$ мм). Литохимическая съемка сопровождается слиховым опробованием моренных отложений по более редкой сети (1:5 или 1:10).

При камеральной обработке результатов съемки учитываются ландшафтные факторы пробоотбора: тип отложений, рельеф, гранулометрический состав проб, их цвет, влажность. С учетом ландшафтных условий проводится оценка фоновых содержаний и выделяются моноэлементные аномалии в различных выборках, для каждой аномальной точки рассчитывается показатель контрастности:
$$\gamma = \frac{\lg C_i - \lg C_{\phi}}{\lg \epsilon}$$

Эти значения выносятся на кальку-разноску. Затем вся площадь разбивается на квадраты, размер которых выбирается с таким расчетом, чтобы число точек опробования, попавших в каждый квадрат, было как правило больше 20. В пределах каждого квадрата определяется средняя контрастность аномалий каждого из информативных элементов:

$$U_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \gamma_{ij}$$

где n — число точек в квадрате, m — число аномальных точек по j элементу. Полученная совокупность значений U_{lj} , где l — порядковый номер квадрата, подвергается факторному анализу методом главных компонент (R — модификация). Интерпретация результатов анализа включает изучение структуры нагрузок U_{lj} на главные факторы и сопостав-

ление их с различными геологическими и ландшафтными характеристиками. Значения факторов $f(x, y)$, отвечающие тем или иным ассоциациям рудных элементов, оконтуриваются. Обработка данных по указанной схеме позволяет учесть влияние местных условий и выделить слабые ландшафтные, породные и рудные аномалии.

При мощности абляционной морены, превышающей 15 м, необходимо использовать более чувствительные методы выявления слабых наложенных ореолов (типа МПФ, анализа термомагнитных фракций, избирательных сорбентов) с последующей обработкой результатов анализа приемом усиления слабых аномалий и подавления помех.

Дальнейшая проверка, детализация аномалий и оценка прогнозных ресурсов выявленных рудопроявлений требует постановки глубинной литохимической съемки с отбором проб из донной морены или древней коры выветривания, а также из коренных пород с целью изучения вторичных остаточных ореолов рассеяния и первичных ореолов, для которых известны способы оценки прогнозных ресурсов.

3.20. ПОВТОРНО-КОНТРОЛЬНЫЕ СЪЕМКИ И ДОПУСТИМЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

Повторно-контрольные наблюдения выполняются на всех стадиях поисковых геохимических работ и служат для оценки качества получаемых данных. Они ведутся в процессе выполнения первичного пробоотбора до получения результатов анализа или при дистанционных измерениях без пробоотбора и после построения геохимических карт. В первом случае контрольные съемки проводят по выборочным профилям, равномерно распределенным по всей изучаемой площади, и на участках, представляющих особый интерес по геологическим и геофизическим данным. Во втором случае — на выявленных геохимических аномалиях и в местах, где по геологическим данным результаты первичных съемок вызывают недоверие.

Повторно-контрольные наблюдения выполняют лица, не участвовавшие в первоначальном пробоотборе [17].

Мерой погрешности геохимических съемок является величина случайной ошибки воспроизводимости первичных и повторно-контрольных наблюдений. Распределение погрешностей геохимических съемок аппроксимируется логнормальным законом распределения случайных величин. Первоначально по данным обеих серий наблюдений вычисляют величину систематического расхождения между ними:

$$\delta_{\text{сист.}} = \text{ant } \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg C_{i1} - \lg C_{i2}) \right],$$

где n — число пар контрольных проб ($n \geq 100$); C_{i1} и C_{i2} — данные первичных и контрольных съемок.

Если $0,95 < \delta_{\text{сист.}} < 1,05$, считается, что систематическая ошибка отсутствует; при $0,9 < \delta_{\text{сист.}} < 1,1$ она мала и ею можно пренебречь.

Если $\delta_{\text{сист.}} < 0,9$ или $\delta_{\text{сист.}} > 1,1$, то систематическое расхождение подлежит исключению путем вычитания $\lg \delta_{\text{сист.}}$ из всех $\lg C_{i1}$. По

Таблица 49

Требования к повторно-контрольным съемкам [17]

Вид съемки	Объем контрольных наблюдений, %	Допустимая средняя случайная (относительная) ошибка $\delta_{случ.}^{\pm 1}$
Литохимическая:		
по коренным породам	3	2,0
по рыхлым образованиям	3	1,6
Гидрохимическая	5	1,6
Автохимическая	10	2,0
Газортутная	10	1,6
Биогеохимическая	5	1,6

исправленным данным и в случаях, когда $0,9 < \delta_{сист.} < 1,1$, рассчитывают среднюю случайную ошибку

$$\delta_{случ.} = \text{ant lg} \left[\frac{1}{n\sqrt{2}} \sum_{i=1}^n | \lg C_{i1} - \lg C_{i2} | \right].$$

Средняя случайная ошибка измерений $\Delta_{случ.}$ меньше средне-квадратической s и связана с ней соотношением $s = 1,25\Delta_{случ.}$ или $\varepsilon = \delta_{случ.}^{1,25}$, где $\delta = \text{ant lg} \Delta_{случ.}$. Обязательные объемы контрольных наблюдений при различных видах геохимических съемок и допустимые погрешности приведены в табл. 49.

3.21. МЕЛКОМАСШТАБНОЕ ОБОБЩЕНИЕ

Результаты многолетних геохимических съемок, постепенно охватывающих обширные пространства, требуют обобщения в целесообразном более мелком масштабе. Составленные на основе первичных данных обзорные геохимические карты служат для уточнения существующих представлений о структурно-геологических закономерностях размещения полезных ископаемых на исследованной площади и за ее пределами. Анализ результатов мелкомасштабного обобщения нередко позволяет сделать важные поисковые выводы, которые не были очевидны в процессе съемок.

Простейшим методом обобщения результатов поисковых геохимических съемок является пантографирование контуров геохимических аномалий на картах в рабочем масштабе съемки для их перенесения на мелкомасштабную обзорную карту. Таким путем была, например, составлена обзорная карта в масштабе 1:200 000 вторичных ореолов рассеяния свинца для Центрального Каратау на основе результатов поисковой литохимической съемки масштаба 1:50 000 (рис. 37). Пантографировались контуры аномалий $\geq 0,02\%$ Pb, объем первичных данных составил более 150 тыс. точек пробоотбора по сети 500×50 м. Аналогичным путем была составлена обзорная карта результатов литохимической съемки Байджансайского рудного района в масштабе 1:25 000 по данным первичных съемок масштаба 1:10 000. Пантографировались два контура литохимических аномалий ($\geq 0,02$ и $> 0,1\%$ Pb).

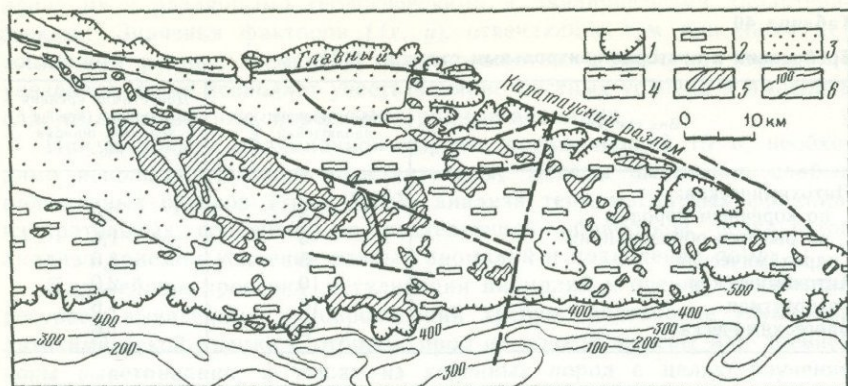


Рис. 37. Сводная карта вторичных ореолов рассеяния свинца

1 — контур выходов докембрийских пород; 2 — карбонатные отложения ($D_3 + C_1$); 3 — нижнепалеозойские образования; 4 — протерозойские образования; 5 — ореолы рассеяния свинца ($\geq 0.02\%$); 6 — изогипсы кровли палеозоя (в м) по данным ВЭЗ

Метод пантографирования ореолов рассеяния непригоден для составления обзорных карт мельче 1 : 200 000, поскольку уже в масштабе 1 : 500 000 даже обширный и богатый ореол рассеяния превращается в точку, не отличимую от второстепенных аномалий геохимического поля. Более того, прямое перенесение контуров вторичных ореолов рассеяния на обзорную карту не способно отразить смену условий их формирования, в частности, переменную мощность рыхлых образований, ослабляющих остаточные ореолы рассеяния, или их частичный переход в погребенное состояние, а также изменения масштаба первичных съемок или их неполноту.

Значительно эффективнее метод составления мелкомасштабных геохимических карт удельной рудоносности территорий со снятым покровом рыхлых образований, разработанный в Казахстане (Б. А. Досанова и др.). Принципиальную основу этого метода составляет подсчет по данным первичной литохимической съемки надфоновой продуктивности вторичных ореолов рассеяния в пределах равновеликих площадок $\sum P$ м²%, с последующим делением этой величины на заснятую площадь S_i км² и на средневзвешенное значение местного коэффициента остаточной продуктивности k_i или

$$\Delta q_{pi} = \frac{\sum P}{S_i \cdot k_i \cdot 40}$$

Полученные величины удельной продуктивности коренного оруденения Δq_p в т/м на 1 км² относят к центрам площадок и используют для построения карт изолиний в масштабе обзорной карты. Таким способом составляются 5—8 моноэлементных мелкомасштабных карт для главных рудных элементов, а затем 3—4 карты безразмерных отношений между удельными продуктивностями коренного оруденения в первого или более высоких порядков. Выбор геохимических показателей подчиняется последовательному анализу геохимического поля по отдельным рудным формациям, проявленным в исследованном районе.

Достоинствами этого метода являются возможность свободного выбора размеров площадок подсчета $\sum P$, независимость результата от различных масштабов первичных съемок, учет местного средневзвешенного значения k_i , а также отражение в значениях S_i частичной закрытости или неполной заснятости каждой отдельной площадки. В результате Δq_p приобретает нормированную объективную величину, независимую от смены геоморфологических и ландшафтных условий. Составленные по этой методике обзорные карты характеризуются высокой информативностью. Производство таких обобщений возможно «вручную» и на ЭВМ. В последнем случае подсчеты в заданных площадках ведутся методом «скользящего окна» с шагом 1 см в масштабе обзорной карты, что наиболее эффективно.

Задача усложняется, если мелкомасштабному обобщению подвергаются данные литохимических съемок по потокам рассеяния (например, масштаба 1 : 200 000). В отличие от содержаний рудных элементов в элювиоделювии, аномальные содержания металлов в потоках рассеяния не аддитивны. Это исключает их прямое сложение, в принципе требующее предварительного умножения каждого надфонового содержания металла на площадь водосбора данной точки опробования (т. е. перехода к P'_x в $m^2\%$). Алгоритмы выполнения этой операции на ЭВМ излишне сложны, а массовое выполнение расчетов «вручную» нереально.

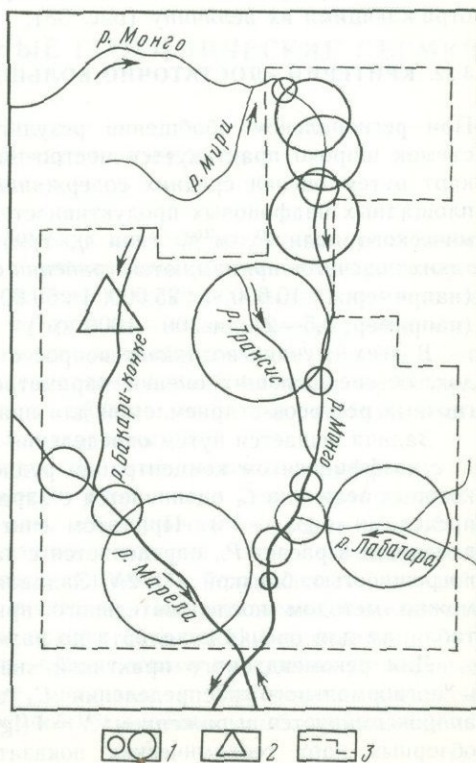


Рис. 38. Пример обобщения результатов региональной литохимической съемки по потокам рассеяния в масштабе 1 : 500 000. По Д. Каринка (1987): 1 — продуктивность потоков рассеяния q' (в т/м Au); 2 — продуктивность потоков рассеяния q (в т/м Au); 3 — площадь рекомендуемой литохимической съемки масштаба 1 : 50 000

Практикуемое некоторыми авторами мелкомасштабное осреднение содержаний в аллювии только для точек с равновеликими водосборами (например, 3,0 или 5,0 км²) связано с большой потерей информации, способно давать неверные результаты и не должно применяться.

В. П. Бородин исследовал степень приближения осредненных содержаний рудных элементов в аллювии к их средним содержаниям в элювиоделювии, для которых такое осреднение корректно. Он обнаружил снижение величины случайных расхождений между содержаниями металлов в тех же точках от $1,61^{\pm 1}$ (при площадках 1 км²) до $1,11^{\pm 1}$ (при площадках 49 км²) и возрастание коэффициента корреляции между средними содержаниями в ореолах и потоках рассеяния от 0,71 до 0,89; одновременно при этом происходит снижение условной информации от 3,9 до 2,4 бит.

Несмотря на указанную неизбежную потерю части информации, эти данные позволяют для мелкомасштабного обобщения результатов региональных литохимических съемок по потокам рассеяния рекомендовать метод скользящего окна с числом точек опробования в окне от 50 и больше. При съемках по сети 1 проба на 1 км² (обычно для масштаба 1 : 200 000) это определяет масштаб обзорной карты 1 : 1 000 000.

Упрощенным методом обобщения является изображение на карте истинных продуктивностей потоков рассеяния условными знаками, отражающими их величину (рис. 38).

3.22. КРИТЕРИЙ «ДОСТАТОЧНО БОЛЬШИХ» ПЛОЩАДЕЙ

При региональном обобщении результатов поисковых геохимических съемок широко практикуется построение различных мелкомасштабных карт путем оценки средних содержаний рудных элементов \bar{C}_x , % или площадных надфоновых продуктивностей равновеликих участков геохимического поля P , м²% (или q , т/м). В качестве «площадок» для таких подсчетов принимаются трапеции ближайшего удобного масштаба (например, 1 : 10 000, 1 : 25 000, 1 : 50 000) или фиксированные площади (например, 0,5—2 или 300—1000 км²).

В этих случаях возникает вопрос о минимальных размерах площадок, обеспечивающих оценки параметров геохимического поля и прогнозных ресурсов с приемлемой для практики точностью.

Задача решается путем определения числа точек наблюдения (проб) N с коэффициентом концентрации рудного элемента $K_k = C_{\max} : C_{\text{ф}}$, при которых величина \bar{C}_x оценивается с заранее заданными доверительными пределами ($\pm s$; $\epsilon^{\pm 1}$). При этом считается, что площадь аномалий, входящая в расчет P_i , определяется с заведомо меньшей относительной погрешностью, близкой к $1/2N$. Задаваясь значениями K_k и s (или ϵ), можно методом последовательного приближения найти число N по таблицам для оценки стандарта по размаху [17, 37].

Для рекомендуемого практикой значения $\epsilon = 1,2^{\pm 1}$ (т. е. $\pm 20\%$) и логнормального распределения C_x зависимость N от K_k хорошо аппроксимируется выражением: $N = 4 (\lg K_k)^2 + 10 \lg K_k$. При построении обзорных карт геохимических показателей I_x , образованных путем

Таблица 50

Соответствие числа точек N величине размаха R

Размах R	N	Размах R	N
1	0	300	49
3	6	1000	66
10	14	3000	83
30	24	10000	104
100	36	30000	125

мультипликации содержаний (или продуктивностей) нескольких химических элементов, числа точек N для тех же значений s (или ε) рассчитываются по величине размаха $R = J_{\max}/J_{\phi}$. Соответствующие числа точек N для подсчета параметров аномального геохимического поля с погрешностью $\varepsilon = 1,2^{\pm 1}$ при различных коэффициентах концентрации элементов $K_k = C_{\max} : C_{\phi}$ или R приведены ниже (табл. 50).

Размеры площадок подсчета, которые для данных величин K_k или R и масштаба съемки, по числу точек с аномальными значениями геохимического поля удовлетворяют условию $\geq N$, могут считаться «достаточно большими».

ГЛАВА 4

ПОИСКОВЫЕ И ДЕТАЛЬНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ В РУДНЫХ РАЙОНАХ

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ РАССЕЙНИЯ

Впервые классификация геохимических ореолов рассеяния предложена Н. И. Сафроновым в 1936 г. и с небольшими уточнениями существует в качестве общепринятой. В основе классификации лежит деление гипергенных ореолов рассеяния по трем признакам: фазе рассеиваемого вещества, их генезису, доступности для обнаружения [8, 10]. Эта классификация определила создание специальной научной терминологии, постепенно сложившейся в области методики геохимических поисков месторождений полезных ископаемых.

Ореолы рассеяния образуются за счет ранее сформированного коренного оруденения и являются вторичными (эпигенетическими) по отношению к рудным залежам, их первичным ореолам и любым проявлениям рудной минерализации, которые они сопровождают. Формирование вторичных ореолов рассеяния протекает в твердой, жидкой и газообразной фазах вещества. Соответственно выделяются механические, солевые и газовые ореолы (и потоки) рассеяния.

В твердой фазе подвергаются механическому рассеянию устойчивые первичные и вторичные рудные минералы и обломочные продукты выветривания полезного ископаемого: от крупных глыб, до коллоидно-

дисперсных частиц включительно. Формирование солевого ореола обязано рассеянию рудных элементов в состоянии водно-растворимых соединений в капиллярно-пленочной влаге горных пород, в подземных и поверхностных водах зоны гипергенеза и сопровождается сорбцией и фазовыми переходами, капиллярным подъемом, испарением и движением ореольных растворов. Газовые ореолы обязаны рассеянию вещества полезного ископаемого в форме паров, газов и различных легколетучих соединений. Названия ореолов рассеяния отражают господствующую фазу их формирования; в природных условиях в процессе одновременно участвуют твердые, растворимые и газообразные компоненты. Поэтому уместно говорить, например, о солевой (или биогенной) составляющей механического ореола рассеяния и т. д.

Отражением сложных процессов формирования вторичных ореолов рассеяния являются вошедшие в употребление несколько позднее (В. И. Красников, 1956) термины «литохимический», «гидрохимический» (водный), «атмохимический» (газовый) и «биогеохимический» ореолы. Обозначая среду, в которой развит ореол, эти названия применимы и к первичным ореолам месторождений без добавления слова «рассеяния».

Важнейшее значение для практики геохимических поисков и классификации вторичных ореолов рассеяния имеет их генезис. Следует различать остаточные ореолы, обязанные рассеянию в современных или более древних элювиальных продуктах выветривания коренного оруденения, существовавшего в контуре ореола до его образования гипергенными процессами. В отличие от остаточных ореолов, вторичные и наложенные ореолы рассеяния формируются в профиле дальнеприносных отложений, перекрывающих выход месторождения, в результате диффузии и эффузии компонентов оруденения в направлении к дневной поверхности. В профиле наложенного ореола рассеяния коренного оруденения не было. Вторичные наложенные ореолы рассеяния формируются преимущественно в газовой и солевой фазах и в большинстве случаев принадлежит к разряду слабых геохимических аномалий. Остаточные ореолы рассеяния, как правило, являются механическими и представлены в горных районах весьма яркими геохимическими аномалиями. По вторичным наложенным ореолам рассеяния ведутся поиски погребенных месторождений в закрытых рудных районах. По остаточным литохимическим ореолам рассеяния при геохимических поисках в горно-рудных районах открыты многие промышленные месторождения.

По доступности для обнаружения различают открытые ореолы рассеяния, проявленные непосредственно на дневной поверхности, и закрытые ореолы, обнаружение которых возможно только на некоторой глубине. Переход остаточных ореолов в закрытое состояние может объясняться выщелачиванием рудных элементов из верхних горизонтов элювия атмосферными осадками, высоким уровнем помех, наличием чехла дальнеприносных отложений и другими причинами. Доступность ореола рассеяния для обнаружения является не генетическим, а чисто техническим признаком. Любой закрытый ореол рассеяния при условии более совершенной техники геохимических съемок

может быть обнаружен на дневной поверхности и, следовательно, перейдет в разряд открытых ореолов. Поэтому понятие о закрытых ореолах рассеяния содержит оговорку: — закрытые ореолы не обнаруживаются на дневной поверхности с применением существующих технических средств.

В принятой классификации ореолы рассеяния разделяются следующим образом: по фазе (механические — солевые — газовые); по генезису (остаточные — наложенные); по доступности (открытые — закрытые).

4.2. ГЛАВНЕЙШИЕ ТИПЫ ВТОРИЧНЫХ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ

По генетическим и морфологическим особенностям, взаимоотношениям с рельефом характеристики вторичных ореолов рассеяния могут быть бесконечно разнообразны, однако число главнейших типов вторичных литохимических ореолов рассеяния не столь велико. Принято выделять семь типов ореолов рассеяния, с которыми, в первую очередь, приходится иметь дело в теории и практике литохимических поисков (рис. 39). Ореолы I—IV принадлежат к открытому типу (ореолы II—IV — наложенные, III—IV — наложенные аккумулятивные). Ореолы V—VII являются закрытыми (V—VI — остаточные).

Открытые остаточные (элювиоделювиальные) ореолы рассеяния (тип I) имеют наибольшее поисковое значение и именно их наличие обеспечило широкое и эффективное проведение наземных

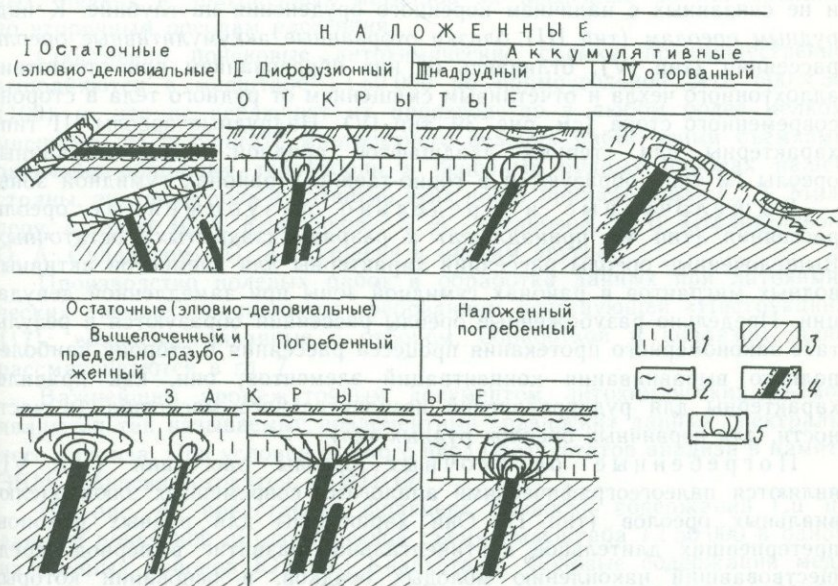


Рис. 39. Главнейшие типы вторичных литохимических ореолов рассеяния

1 — элювиоделювий; 2 — перекрывающие отложения; 3 — рудовмещающие породы; 4 — рудные тела и их первичные ореолы; 5 — вторичные ореолы

литохимических (металлометрических) съемок в рудных районах. Ореолы этого типа характерны для месторождений любых генетических типов, залегающих в верхних структурных этажах. В условиях расчлененного рельефа открытые остаточные ореолы могут образовать горизонтально залегающие месторождения осадочного генезиса (см. рис. 39, тип I а), в ряде случаев ореолы этого типа формируются за счет выветривания и денудации только первичных ореолов рудных тел (см. рис. 39, тип I б).

Открытые наложенные диффузионные ореолы рассеяния (тип II) характерны для равнинных районов с покровом дальнепринесенных (аллохтонных) отложений ограниченной мощности, главным образом, в аридном и умеренно влажном климате. В ореолах этого типа солевое рассеяние существенно преобладает над механическим, хотя в отдельных случаях возможны наложенные механические ореолы рассеяния устойчивых рудных минералов. За счет переменной мощности аллохтонного чехла ореолы типа II даже в пределах одной рудной зоны могут по простиранию переходить в погребенное состояние (типы VI, VII), сочетаться с интервалами открытого остаточного ореола (тип I) или сменяться наложенными надрудными ореолами рассеяния (тип III).

Надрудные (тип III) и оторванные (тип IV) наложенные ореолы рассеяния образуются при сочетании солевого рассеяния рудных элементов с их гипергенной аккумуляцией. Надрудные ореолы рассеяния в ряде случаев трудно отличимы от ландшафтных геохимических аномалий, возникающих на различных геохимических барьерах и не связанных с наличием коренного оруденения на глубине. К надрудным ореолам (тип III) близки оторванные аккумулятивные ореолы рассеяния (тип IV), отличаясь от них образованием при отсутствии аллохтонного чехла и отчетливым смещением от рудного тела в сторону современного стока (см. рис. 39, тип IV). Надрудные ореолы III типа характерны для степных ландшафтов аридной зоны, оторванные ореолы IV типа образуются в горно-таежных районах гумидной зоны.

Выщелоченные и предельно разубоженные ореолы рассеяния (тип V) принадлежат к разряду «закрытых» остаточных. Выщелоченные ореолы рассеяния характерны для элементов активных водных мигрантов в районах гумидной зоны при замедленной денудации. Предельно разубоженные ореолы рассеяния образуются в результате закономерного протекания процесса рассеяния в сторону наиболее полного выравнивания концентраций элементов; они, как правило, характерны для рудопроявлений незначительного масштаба (в частности, для первичных ореолов рудных тел).

Погребенные остаточные ореолы рассеяния (тип VI) являются палеогеографическими аналогами современных элювиоделювиальных ореолов (тип I). Они характерны для рудных районов, претерпевших длительное континентальное развитие в период, предшествовавший накоплению молодых осадков, в основании которых сохранилась древняя кора выветривания. Максимальное площадное развитие погребенные ореолы рассеяния имеют на уровне пестроцветной коры выветривания, которая в данном случае является «представи-

тельным горизонтом» для проведения литохимических поисков.

Погребенные наложенные ореолы рассеяния (тип VII) являются аналогами современных открытых наложенных ореолов рассеяния (тип II), отличаясь от них образованием в палеогеографических условиях с последующим перекрытием чехлом более молодых осадков.

4.3. ПОИСКОВЫЕ ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ ПО ВТОРИЧНЫМ ОСТАТОЧНЫМ ОРЕОЛАМ РАССЕЯНИЯ

Это основной метод геохимических поисков рудных месторождений, который производят после региональных литохимических съемок по потокам рассеяния или минуя их. На основе учения Н. И. Сафронова об ореолах рассеяния рудных месторождений А. П. Соловов в 1934 г. впервые применил литохимические съемки по вторичным ореолам рассеяния при поисках оловорудных месторождений на базе спектрального экспресс-анализа проб по методике, разработанной для этих целей В. К. Прокофьевым.

В настоящее время литохимические съемки применяются во всем мире. Первоначальное название «металлометрическая съемка» в связи с ее привлечением к поискам неметаллических полезных ископаемых (Р, F, слюды и др.) заменено на более общее — «литохимическая съемка». Большинство открытий промышленных месторождений цветных, редких и драгоценных металлов за последние 50 лет сделаны по вторичным ореолам рассеяния.

Собственно поисковые литохимические съемки преимущественно выполняются в масштабе 1 : 50 000 по прямоугольной сети 500 × 50 (100) м, что не исключает их производство в любом более мелком масштабе. В результате многолетнего ведения работ этими съемками охвачены обширные территории в основных рудных районах нашей страны, активная роль в развитии этих работ принадлежала С. Д. Миллеру, а также В. А. Кличникову, Б. А. Досановой, А. В. Строителевой, О. А. Савадскому, П. А. Куршеву и многим другим.

Производство полевых работ и обработка данных при литохимических съемках подчиняются требованиям действующей «Инструкции» [17]; вопросы, связанные с отбором, обработкой и анализом проб, рассматриваются в гл. 7.

Важнейшим промежуточным документом литохимических съемок являются так называемые поэлементные «разноски» данных спектрального анализа. При условии прямого ввода результатов анализа в память ЭВМ разноски готовятся на АЦПУ.

На рис. 40 представлен фрагмент разноски содержаний Cu по данным поисковой литохимической съемки масштаба 1 : 50 000 в одном из степных районов Южного Казахстана. Фоновые содержания меди около точек не выписаны. По расчетным данным параметры местного геохимического фона составили: $C_{\phi} = 4,1 \cdot 10^{-3}\%$ Cu, $\varepsilon = 1,34$ и $C_{A1} = C_{\phi} \varepsilon^3 = 10 \cdot 10^{-3}\%$ Cu. В контур выявленной аномалии вошли 13 точек съемки с $C_{\max} = 350 \cdot 10^{-3}\%$ Cu, протяженность аномалии 2,0 км.

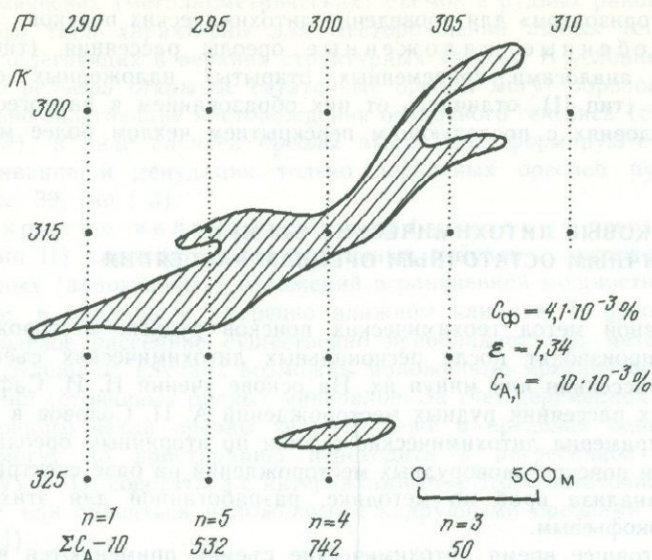


Рис. 40. Открытие медного месторождения по результатам поисковой литохимической съемки масштаба 1:50 000

Приводим подсчет площадной продуктивности аномалии:

$$\sum_{x=1}^{13} C_x - 13C_\phi = (1334 - 53) \cdot 10^{-3}\% = 1,281\% \text{ Cu.}$$

После умножения на площадь ячейки съемочной сети ΔS ($500 \times 50 \text{ м} = 25\,000 \text{ м}^2$) и деления на 40 (для перехода к т/м Cu), имеем $q = 32025 \text{ м}^2\% : 40 = 800 \text{ т/м Cu}$. Этих данных достаточно, чтобы определить необходимость и очередность геологического осмотра этой аномалии на местности, после которого производится подсчет прогнозных ресурсов металла (оценка объекта). Согласно масштабу выявленного оруденения (среднее-мелкое месторождение?) глубину подсчета H принимаем 100 м, местный коэффициент остаточной продуктивности $k = 1,0$ (сухие степи). Имеем $Q_H = \frac{1}{k} q \cdot H = 80 \text{ тыс. т. Cu}$. Это мелкое месторождение, поэтому поправочный множитель, учитывающий долю забалансовых руд, принимаем $\alpha = 0,5$, откуда оценка прогнозных ресурсов Q^* составит $Q^* = Q_H \alpha = 40 \text{ тыс. т Cu}$.

Для контроля произведем независимый подсчет по формуле $Q = \beta q \sqrt{q}$ согласно [8] принимая $\beta = 5,16$ и $\alpha^{3/2} = 0,354$. Имеем $Q^* = Q \alpha^{3/2} = 41,4 \approx 40 \text{ тыс. т Cu}$. Сходимость результатов хорошая, по степени достоверности эти ресурсы допустимо отнести к категории P_2 . Последующие детальные литохимические съемки и горно-буровые работы подтвердили, что месторождение самостоятельного промышленного значения не имеет.

В качестве исторического примера на рис. 41 приведен фрагмент

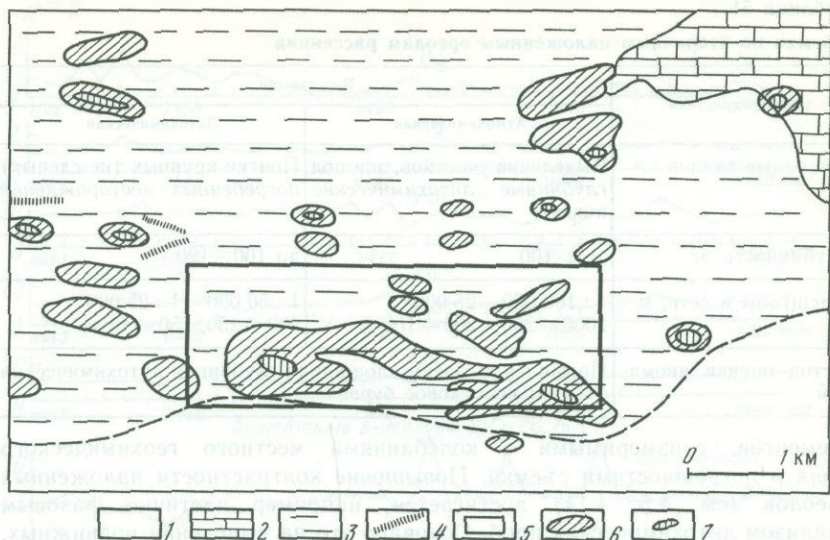


Рис. 41. Результаты поисковой литохимической съемки масштаба 1:50 000 в восточной части гор Тамды-Тау

1 — золотые пески; 2 — известняки; 3 — сланцы; 4 — окварцевание; 5 — контур участка детальной съемки; 6—7 — вторичные ореолы рассеяния As (в $\mu \cdot 10^{-3}\%$): 6 — 8—20, 7 — 20—100

результатов поисковой литохимической съемки масштаба 1:50 000 с вторичными ореолами рассеяния мышьяка, по которым было открыто золоторудное месторождение (Х. Т. Тулеганов, 1967). Отметим, что поисковые, а затем выборочно детальные литохимические съемки были проведены за два года и уже в следующем году в результате бороздowego опробования канавы № 1 исполнителями геохимических работ были выявлены руды с кондиционным содержанием металла.

4.4. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ ПО НАЛОЖЕННЫМ ОРЕОЛАМ РАССЕЯНИЯ

Геохимические поиски по вторичным наложенным ореолам рассеяния проводятся в закрытых рудных районах с целью выявления погребенных месторождений,

Наложённые ореолы образуются в рыхлых отложениях над рудным телом при миграции к дневной поверхности рудных и сопутствующих им компонентов главным образом в газообразной и воднорастворенной формах. Наложённые ореолы имеют столбообразную форму, в вертикальном разрезе чехла они могут усиливаться, ослабляться или исчезать с глубиной, вновь появляясь в нижних горизонтах чехла или в отдельных литологически благоприятных для этого горизонтах [36].

В соответствии со средой опробования (порода, газ) поиски по наложенным ореолам проводятся атмо- и литохимическими методами (табл. 51).

Наложённые литохимические ореолы относятся к разряду слабых геохимических аномалий с максимальными содержаниями рудных

Таблица 51

Съемки по вторичным наложенным ореолам рассеяния

Характеристика	Вид съемки	
	Атмохимическая	Литохимическая
Решаемые задачи	Выделение участков, зон под глубинные литохимические поиски	Поиски крупных (не слепых) погребенных месторождений
Глубинность, м	$> n \cdot 100$	до 100—120
Масштабы и сети, м	1 : 100 000—25 000 1000—250 × 200—100 м	1 : 50 000—1 : 25 000 500—250 × 50—40 м
Метод оценки аномалий	Профильная, затем площадная глубинная литохимическая съемка; колонковое бурение	

элементов, соизмеримыми с колебаниями местного геохимического фона и погрешностями съемки. Повышение контрастности наложенных ореолов (см. 4.5, 4.14) достигается, например частично фазовым анализом литохимических проб. Основано это на выделении подвижных, легкорастворимых, солевых форм рудных элементов, доля которых в области фона мала, а в наложенных ореолах существенно выше.

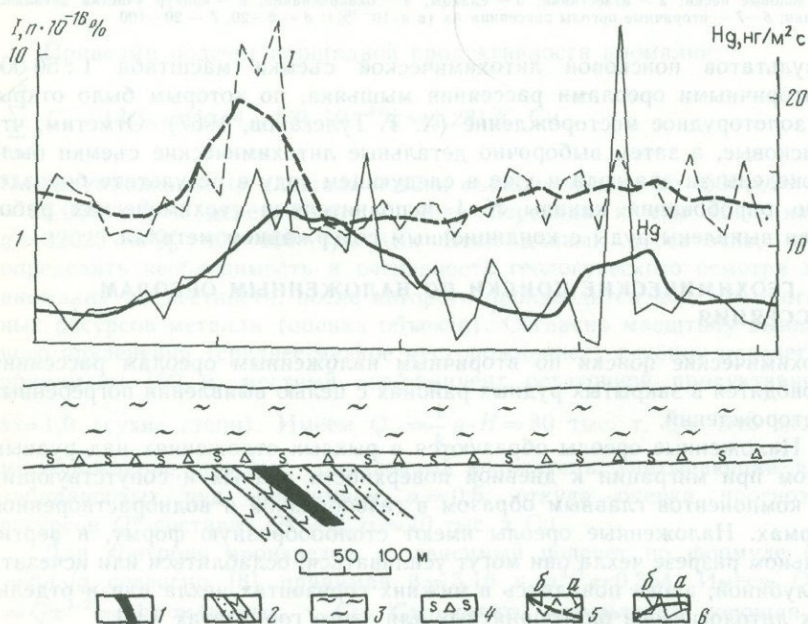


Рис. 42. Результаты литохимической и газотуртнй съемок с мультипликацией и сглаживанием первичных данных

1 — рудное тело; 2 — вмещающие породы; 3 — рыхлые отложения; 4 — кора выветривания; 5 — график $I = \text{Cu} \cdot \text{Zn} \cdot \text{Pb} \cdot \text{Co} \cdot \text{Ag} \cdot \text{Ba}$; а — после мультипликации, б — после сглаживания ($n=5$); 6 — данные газотуртнй съемки (по И. И. Степанову): а — график потока паров ртути, б — после сглаживания ($n=5$)

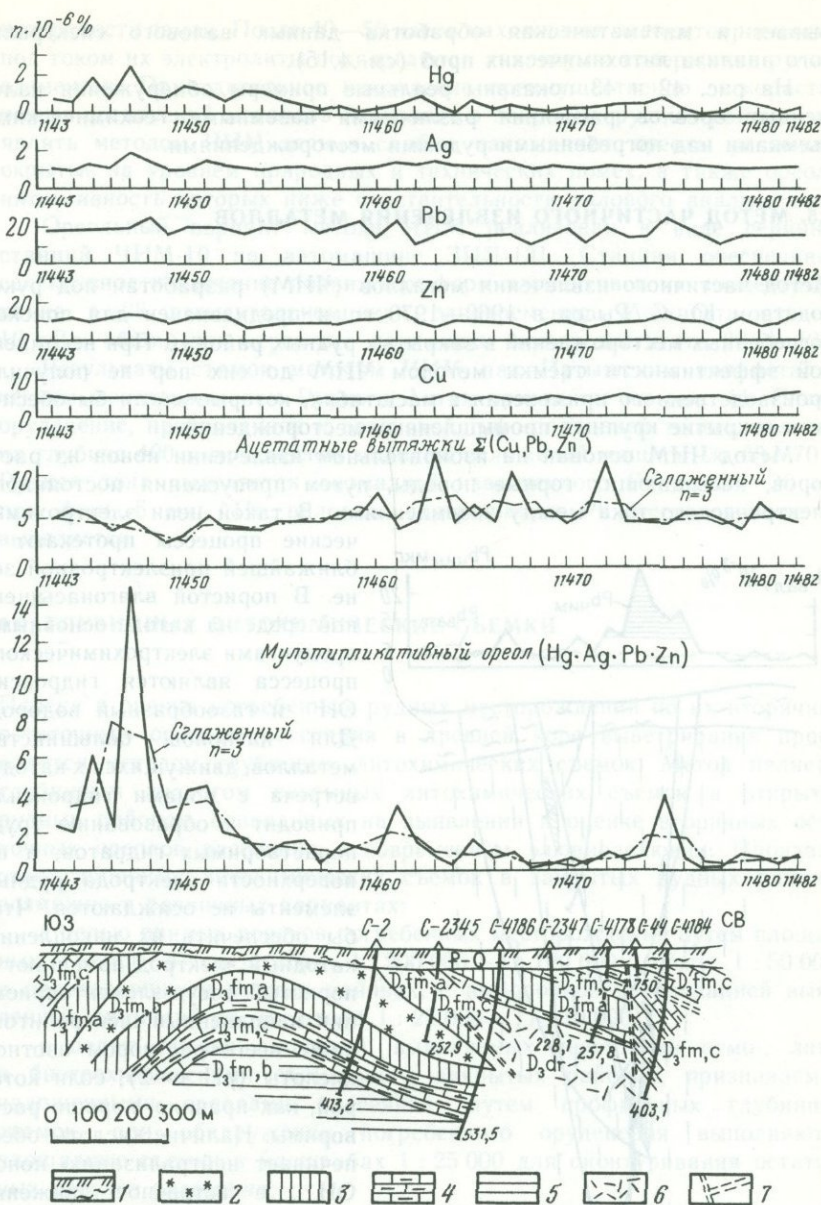


Рис. 43. Вторичные наложенные ореолы рассеяния полиметаллического месторождения

1 — глины; 2 — красноцветные известняки; 3 — чередование железистых и марганцевых руд с пропластами известняков и свинцово-цинковой минерализацией; 4 — углисто-кремнистые известняки с линзами порфиров и туфов; 5 — мергелистые известняки; 6 — песчаники и алевролиты с линзами кислых эффузивов; 7 — тектонические нарушения

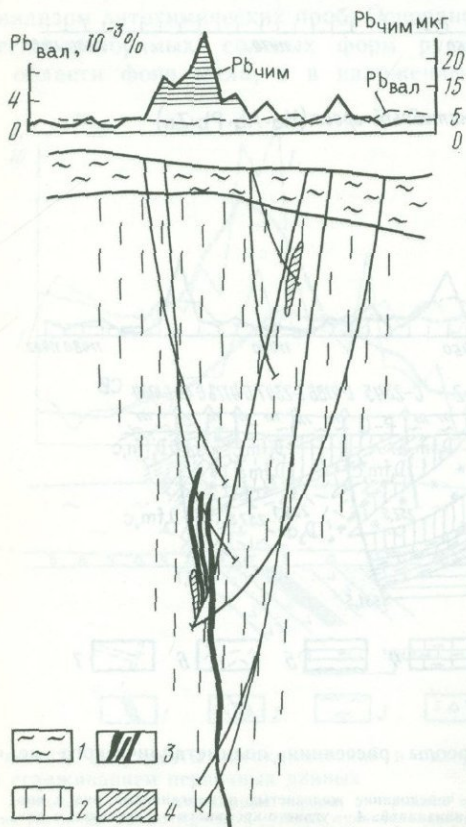
Бывает и математическая обработка данных валового спектрального анализа литохимических проб (см. 4.15).

На рис. 42 и 43 показаны реальные примеры обнаружения наложенных ореолов рассеяния различными наземными геохимическими съемками над погребенными рудными месторождениями.

4.5. МЕТОД ЧАСТИЧНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Метод частичного извлечения металлов (ЧИМ) разработан под руководством Ю. С. Рысса в 1960—1970 гг. и предназначен для поисков погребенных месторождений в закрытых рудных районах. При несомненной эффективности съемки методом ЧИМ до сих пор не получили производственного применения в масштабах, которые могли бы обеспечить открытие крупных промышленных месторождений.

Метод ЧИМ основан на избирательном извлечении ионов из растворов, насыщающих горные породы, путем пропускания постоянного электрического тока между заземлениями.



В такой цепи электрохимические процессы протекают в ближайшей приэлектродной зоне. В пористой влагонасыщенной среде на катоде основными продуктами электрохимического процесса являются гидроксил OH^- и газообразный водород. Для катионов большинства металлов, движущихся к катоду, встреча с ионами гидроксила приводит к образованию труднорастворимых гидратов, и на поверхности электрода рудные элементы не осаждаются. Чтобы обеспечить их накопление, катодный электрод помещают в пористый сосуд-элементоприемник, наполненный электролитом, чаще всего раствором азотной кислоты (рН 1—2), соли которой, как правило, хорошо растворимы. Наличие кислоты обеспечивает нейтрализацию ионов OH^- , а встречное движение анионов NO_3^- не мешает накоплению катионов металлов.

Практическое применение получил ореольный вариант метода ЧИМ, при котором элементоприемники устанавливаются в точках поисковой сети на

Рис. 44. Съемка методом ЧИМ [32]

поверхности земли. После 40—50 часов нахождения элементоприемников под током их электролиты подвергаются анализу на содержание рудных элементов. Принудительное накопление преимущественно легкорастворимых соединений металлов позволяет в закрытых рудных районах выявлять методом ЧИМ весьма слабые наложенные ореолы рассеяния, скрытые за уровнем природных и технических помех, а также ореолы, интенсивность которых ниже чувствительности валового анализа проб.

Ореольный вариант метода ЧИМ реализован в виде серийных станций ЧИМ-10 на автомашине ЗИЛ-131. Станция обеспечивает селективное извлечение подвижных форм элементов и их концентрирование в 28 элементоприемниках одновременно. Мощность станции 10 кВт, общий ток через все приемники может достигать 20 А [32].

Результаты съемок методом ЧИМ над Иртышским полиметаллическим месторождением Рудного Алтая приведены на рис. 44. Слепое оруденение, приуроченное к девонской туфо-сланцевой толще, залегает на глубине 400 м под чехлом молодых отложений мощностью 60—70 м. Рудная зона выделяется аномалией извлеченного Рb до 25—30 мкг при фоне 5 мкг. По валовым содержаниям Рb месторождение не выявляется.

4.6. ГЛУБИННЫЕ ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Поиски и оценка погребенных рудных месторождений по их вторичным остаточным ореолам рассеяния в древней коре выветривания производятся методом глубинных литохимических съемок. Метод является глубинным аналогом наземных литохимических съемок в открытых рудных районах, основанных на выявлении и оценке вторичных остаточных ореолов рассеяния в современном элювиоделивии. Производство глубинных литохимических съемок в закрытых рудных районах возможно в различных вариантах:

с целью прямых поисков погребенных месторождений путем площадных съемок в масштабах 1 : 200 000—1 : 100 000 (реже 1 : 50 000) в определившихся рудных районах, с выборочной детализацией выявленных аномалий до масштаба 1 : 25 000—(1 : 10 000);

с целью оценки аномалий, выявляемых наземными атмо-, лито- и биогеохимическими съемками в закрытых районах, признаваемых наложенными ореолами рассеяния, путем профилейных глубинных съемок; при обнаружении погребенного оруденения выполняются площадные съемки в масштабах 1 : 25 000 для оконтуривания остаточных ореолов рассеяния;

с целью детального опоскования закрытых флангов рудных полей разведываемых и эксплуатируемых крупных месторождений (до масштаба 1 : 10 000, включительно).

Вспомогательное значение глубинные литохимические съемки имеют для оценки резко ослабленных у поверхности, выщелоченных и предельно разубоженных остаточных ореолов рассеяния (см. 4.2, тип V), а также для прослеживания остаточных ореолов нормальной интенсив-

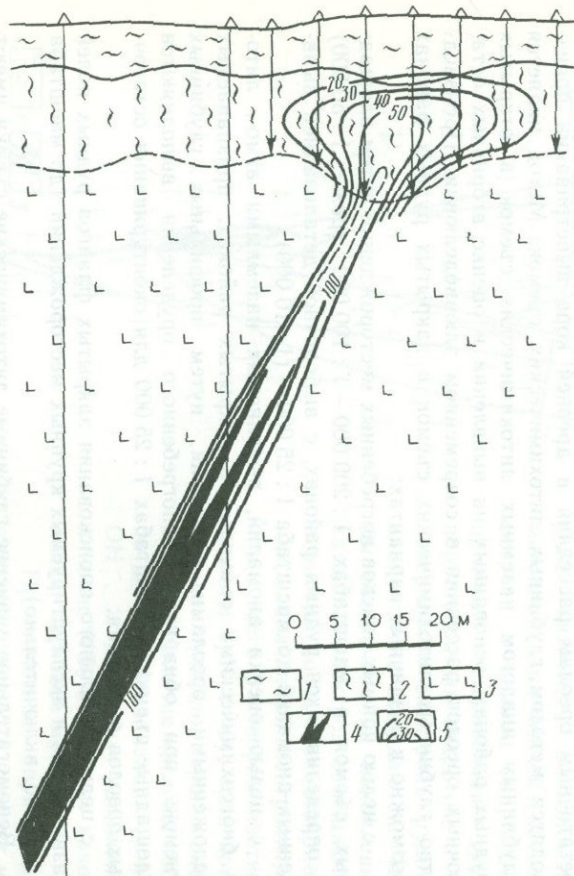
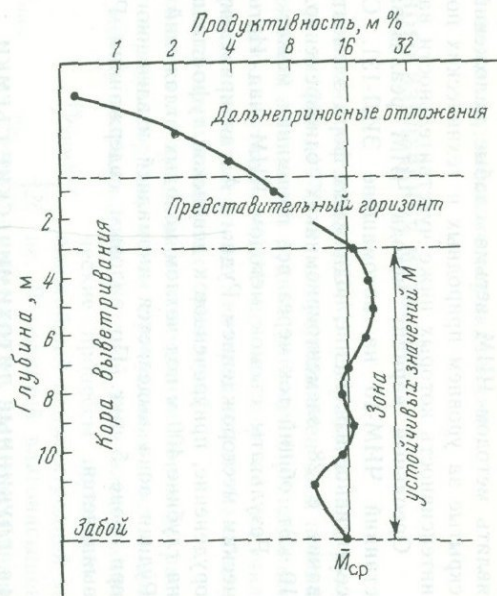


Рис. 45. Погребенный остаточный ореол рассеяния рудопроявления. По А. Н. Еремееву и А. П. Соловову:

1 — суглинки; 2 — глинистая кора выветривания; 3 — вмещающие породы; 4 — рудное тело; 5 — изоконцентрамы в усл. ед.

Рис. 46. Продуктивность наложенного и остаточного ореолов рассеяния меди



ности, скрывающихся по простиранию под чехлом молодых осадков (частично погребенные ореолы).

Характерная форма погребенного остаточного ореола рассеяния в триас-юрской коре выветривания рудовмещающих пород показана на рис. 45. Ореол имеет грибовидную форму; расширяясь в верхних горизонтах коры выветривания, он сужается на глубине, примыкая к своему коренному оруденению у кровли коренных пород. В перекрывающие четвертичные суглинки ореол не прослеживается, очевидно, в связи с малым (непромышленным) масштабом рудопроявления, подтвержденного бурением двух колонковых скважин.

В других случаях, наложенный ореол рассеяния с быстро убывающей продуктивностью наблюдается в разрезе дальнеприносных отложений. Уровень надежного и максимально широкого развития погребенных ореолов рассеяния называется «представительным горизонтом для опоискования». В профиле коры выветривания силикатных пород представительным обычно является горизонт пестроцветных глин. Выявленные погребенные ореолы рассеяния изучаются как геологические тела, имеющие определенные элементы залегания: простирание, падение, мощность и склонение. Начиная с представительного горизонта, линейные (по профилям съемки) и площадная (в замкнутом контуре аномалии) надфоновые продуктивности ореолов рассеяния (соответственно M в $m\%$ и P в $m^2\%$) приобретают устойчивые величины (рис. 46).

Поисковые сети глубинных съемок рассчитываются по формуле Шурыгина (см. 2.21) для попадания в контур ожидаемых аномалий одной точки наблюдения с вероятностью $P \geq 0,99$. Для расчетов и корректировки сетей служат сведения о размерах погребенных ореолов (в плане) или самих месторождений и их рудных полей. Крупные погребенные месторождения могут уверенно выявляться глубинными литохимическими съемками до масштаба 1 : 200 000 включительно. Для первоначальной оценки наложенных ореолов рассеяния глубинные съемки выполняются по 3—5 профилям с шагом 50—100 м.

Глубинные литохимические съемки ориентируются на применение самоходных буровых станков типа КГК с гидротранспортом керна. В ограниченном объеме до глубины менее 50 м применяется шнековое бурение.

Для производства глубинных литохимических съемок наиболее благоприятны равнинные районы степей и саванн с чехлом молодых осадков мощностью до 100—150 м, в которых на поверхности рудоносного фундамента сохранились древние коры выветривания с развитыми в них погребенными остаточными ореолами рассеяния месторождений. Менее благоприятны районы, в которых древние коры выветривания отсутствуют. В таких случаях пробы отбираются из базального горизонта в основании чехла или поиски ориентируются на обнаружение первичных ореолов месторождений путем опробования коренных пород фундамента.

Глубинные литохимические съемки завершаются подсчетом прогнозных ресурсов категорий P_2 — P_1 по параметрам остаточных ореолов рассеяния на принципах, общих с наземными съемками (см. 4.24).

Затем принимается решение о целесообразности перехода к разведочному бурению и выбираются точки для заложения колонковых скважин.

4.7. УРАВНЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО ОРЕОЛА РАССЕЯНИЯ

Содержания рудного элемента C_x по профилю, пересекающему вторичный остаточный ореол рассеяния «тонкого» крутопадающего рудного тела в удалении от его концов, подчиняются зависимости:

$$C_x = \frac{M}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2} + C_\Phi,$$

где M — количество металла в ореоле в м%, σ — коэффициент гипергенного рассеяния в м, x — расстояние в м от центральной точки ореола, в которой $C_x = C_{\max}$. При $M=1,0$ и $\sigma=1,0$ график такого ореола рассеяния за вычетом фона определяется табулированными значениями нормального распределения (см. 2.10). При формальном совпадении математических зависимостей, в отличие от нормального закона, которым аппроксимируются стохастические распределения частоты фоновых («случайных») содержаний химического элемента типа $n_i = f(C_i)$, уравнение остаточного ореола рассеяния является результатом решения дифференциальных уравнений процесса. Уравнение характеризует детерминированные (пространственно упорядоченные) распределения содержаний химического элемента типа $C_x = f(x)$. При горизонтальной дневной поверхности и вертикальном падении рудного тела центральная точка остаточного ореола рассеяния совпадает с эпицентром залежи (рис. 47). Рудное тело может считаться «тонким», если его полумощность p менее $1,25\sigma$. При этом ореол рассеяния подчиняется принципу эквивалентности содержания металла C_p в рудном теле и его мощности $2p$ (см. 4.17). Это определяет существование бесчисленного множества различных пар значений C_p и $2p$, образующих одинаковые вторичные остаточные ореолы рассеяния при условии $M = kM_p = kC_p \cdot 2p = \text{const}$, где k — местный коэффициент остаточной продуктивности. При значениях p более $1,25\sigma$ действие принципа эквивалентности прекращается, график ореола рассеяния перестает подчиняться нормальному закону и приобретает «коробчатый» вид. Содержания металла во вторичном ореоле рассеяния мощного рудного тела, согласно Р. И. Дубову, подчиняются зависимости [14]:

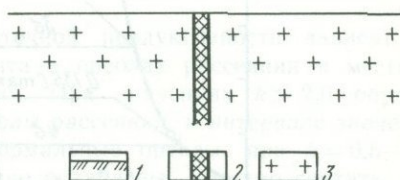
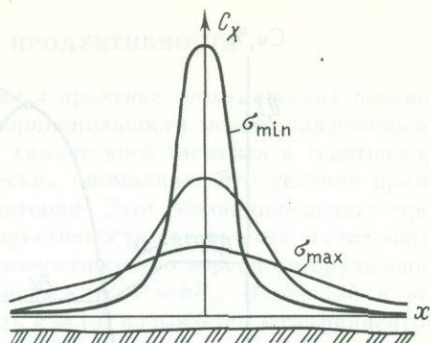
$$C_x = \frac{C_p}{2} \left[\Phi\left(\frac{p+x}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{p-x}{\sigma}\right) \right] + C_\Phi,$$

где $\Phi(x)$ — табулированные значения интеграла вероятностей. При $p > 2\sigma$ имеем $C_{\max} \approx kC_p$.

График содержаний химического элемента в ореоле рассеяния над контактом двух пород неограниченной мощности при $C_2 > C_1$ подчиняется зависимости

$$C_x = \frac{C_2 - C_1}{2} \left[1 \pm \Phi\left(\frac{x}{\sigma}\right) \right] + C_1,$$

Рис. 47. График вторичных ореолов рассеяния рудной жилы для различных значений коэффициента рассеяния при постоянной величине продуктивности $M\%$
 1 — элювиальных; 2 — рудная жила; 3 — вмещающие породы



где начало координат $(x=0, C_x = \frac{C_1 + C_2}{2})$ выбрано над контактом.

Аналогичные решения были предложены для двух- и трехмерных уравнений остаточных ореолов рассеяния для рудных тел, ограниченных по простиранию, прямоугольной и круговой формы [14].

4.8. КОЭФФИЦИЕНТ ГИПЕРГЕННОГО РАССЕЯНИЯ

Коэффициент гипергенного рассеяния σ — параметр, характеризующий подвижность (миграционную способность) химического элемента в процессе диффузионного формирования вторичных ореолов рассеяния. Коэффициент σ определяется зависимостью $\sigma = \sqrt{2DT}$ (D — коэффициент диффузии, T — время) и имеет размерность длины $[\sigma] = L$. Величина σ измеряется в м и соответствует среднему квадратическому удалению атомов химического элемента при ореолообразовании от их первоначального положения в рудном теле (без учета их выноса за пределы системы). В остаточном ореоле рассеяния $\sigma = \eta\sqrt{FT/\mu}$. Здесь F , T и μ характеризуют местные ландшафтно-геохимические условия: F — «сила» внешних агентов, $T = h/\Delta h$ — время выветривания, μ — вязкость рыхлых образований и η — безразмерный коэффициент, зависящий от индивидуальных физических и минералого-геохимических свойств рудных «частиц», подвергающихся рассеянию.

При атомарном анализе проб коэффициент рассеяния данного химического элемента

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i M_i}{\sum_{i=1}^n M_i},$$

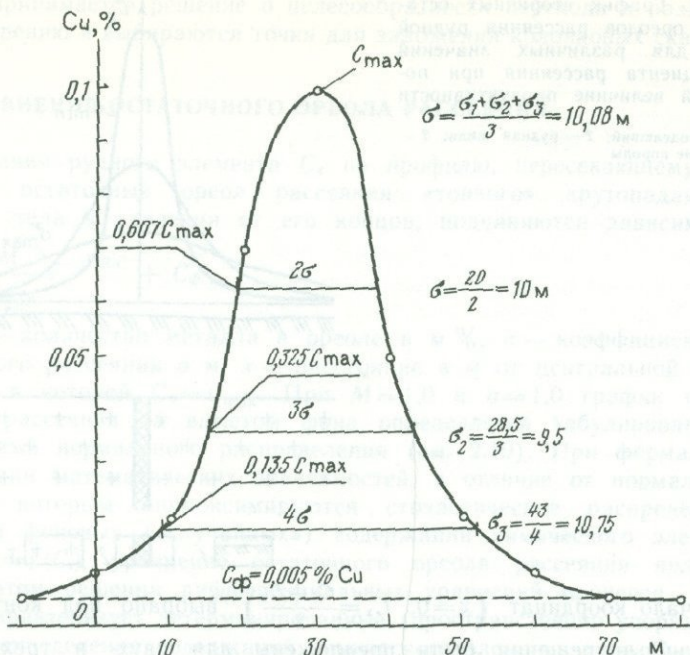


Рис. 48. Пример определения коэффициента гипергенного рассеяния меди методом «трех уровней»

т. е. равен средневзвешенному значению коэффициентов гипергенного рассеяния каждого отдельного типа рудных «частиц» (по форме, размеру, минеральному виду, фазовому состоянию и т. п.), n — число этих типов. В профиле современного алювиоделювия и древней коры выветривания величина коэффициента гипергенного рассеяния убывает с глубиной, в первом приближении по линейному закону:

$$\sigma_z = \sigma_0 \left(\frac{h-z}{h} \right),$$

где $\sigma_0 = \sigma_{\max}$, h — мощность рыхлых образований и $0 \leq z \leq h$. Эта зависимость определяет веерообразное расширение вторичного остаточного ореола рассеяния к дневной поверхности, который на глубине $z=h$ при $\sigma_h=0$ примыкает к материнскому рудному телу.

Ширина ореола рассеяния, подчиняющаяся нормальному закону (см. 4.7), на уровне $0,607 (C_{\max} - C_{\phi})$ составляет 2σ . На практике местные значения σ для «тонких» рудных тел определяются «методом трех уровней» (рис. 48). Если при этом обнаруживается существование зависимости $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, для определения σ следует применить палетки Дубова (см. 4.18).

Местные величины σ обычно составляют от 5 до 15 м (реже до 40 м) с доверительными интервалами оценок $\pm(0,2-1,3)$ м.

Данные о ранжированных рядах коэффициентов рассеяния рудных элементов в комплексных вторичных ореолах рассеяния $\sigma W > \sigma Pb > \sigma Mo > \sigma Be > \sigma Bi > \sigma Ba > \sigma Cu$ недостаточны и требуют уточнения.

4.9. КОЭФФИЦИЕНТ ОСТАТОЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

Фундаментальное значение в теории и практике геохимических поисков имеет существование простой пропорциональности между надфоновыми количествами (не содержаниями!) химического элемента в генетически связанных между собой геохимических аномалиях. Это условие прямо вытекает из закона сохранения материи. Этот закон определяет пропорциональность надфоновой продуктивности вторичных остаточных ореолов рассеяния P м² % продуктивности своего коренного оруденения P_p в тех же м² %, согласно зависимости: $P = kP_p$. Входящий в это выражение безразмерный множитель $k \geq 1,0$ называется коэффициентом остаточной продуктивности вторичных ореолов рассеяния*. Аналогично этому соблюдаются зависимости $q = kq_p$ и $M = kM_p$, где q и q_p выражены в т/м, M и M_p в м %.

Величина коэффициента остаточной продуктивности зависит от форм нахождения рудного элемента в ореолах рассеяния и местных ландшафтно-геохимических условий. При значениях $k > 2,0$ образуются обогащенные остаточные ореолы рассеяния, в интервале значений k от 0,5 до 2,0 формируются нормальные ореолы, при $k = 0,5 - 0,2$ ореолы ослаблены, при $k < 0,2$ резко ослаблены. Уместно считать, что при $k < 0,05$ пропорциональная зависимость между продуктивностью остаточного ореола рассеяния и продуктивностью его коренного оруденения нарушается.

Законы геохимии гипергенеза позволяют заранее оценить ожидаемые значения коэффициента остаточной продуктивности для главных рудных элементов в зависимости от местных условий [36]:

1. В активно денудлируемых горных районах любых ландшафтно-геохимических зон благодаря быстрому эрозионному обновлению ореолов рассеяния индивидуальные различия между химическими элементами сглаживаются и для всех рудных элементов допустимо принимать $k = 1,0$.

2. В районах гумидной зоны со сглаженным рельефом и замедленной денудацией для рудных элементов, представленных тяжелыми устойчивыми в зоне выветривания первичными или вторичными минералами (Au, Pt, Sn, W, Nb, Ta, Ti и др.), следует ожидать $k > 1,0$.

3. В тех же условиях для элементов активных водных мигрантов (F, Sr, Li, Cs, Rb, В в боратах, иногда U, Mo и др.) следует ожидать значений $k < 1,0$. В районах аридной зоны для этих элементов при наличии процессов испарительной аккумуляции следует ожидать $k > 1,0$, иногда $k \gg 1,0$.

4. В профиле современных элювиоделювиальных образований и древних кор выветривания величина k от своего местного значения на поверхности с глубиной приближается к величине $k = 1,0$ при $z \rightarrow h$, где h — мощность рыхлых образований.

В ореолах рассеяния мощных залежей, имеющих «коробчатый» вид, устанавливается зависимость $\bar{C}_{\max} = k\bar{C}_p$, где \bar{C}_{\max} — среднее содержание рудного элемента в области плоского максимума. Во всех других

* Иногда называется «коэффициентом соответствия» (не рекоменд.).

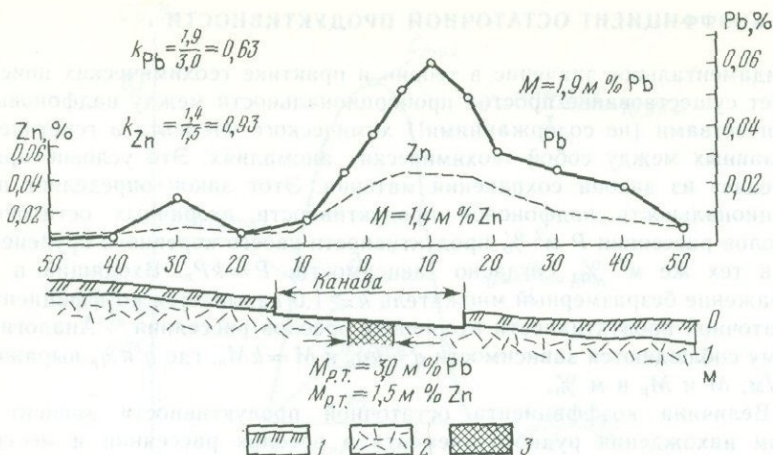


Рис. 49. Оценка коэффициентов остаточной продуктивности свинца и цинка
 1 — элювиоделювий; 2 — туфы порфиров; 3 — рудное тело

случаях, в том числе для ореолов сложной и неправильной формы, оценка k ведется только по величинам M , P или q .

Местные значения коэффициента остаточной продуктивности подлежат уточнению в процессе поисковых геохимических работ для главных рудных элементов и господствующих типов ландшафтов, исходя из зависимости $k = M : M_p$. Исходными данными для этих определений служат результаты опробования разведочных канав, вскрывающих конкретные ореолы рассеяния, с учетом их возможных смещений (см. 4.10), а также данные литохимических съемок по интерпретационным профилям вдоль ранее пройденных канав (см. 4.26). Пример таких определений коэффициентов остаточной продуктивности для ореолов рассеяния Pb и Zn показан на рис. 49. Оба найденных значения (0,63 и 0,93) близки к 1,0. Для серии определений k в однотипных ландшафтах вычисляется среднее геометрическое значение k и стандартный множитель $\epsilon^{\pm 1}$. Если между k_i и M_{pi} в однотипных ландшафтах наблюдается статистически значимая отрицательная корреляция, следует ограничиться вычислением одного значения, согласно зависимости $k = \sum M_i / \sum M_{pi}$. Наличие такой корреляции является прямым указанием на неравномерный, четкообразный характер коренного оруденения. Для месторождений, способных к вторичному сульфидному, окисному или инфильтрационному обогащению, на выходах необходима раздельная оценка k по отношению к продуктивности оруденения в зоне гипергенеза и на уровне первичных руд.

Первостепенная важность знания местных коэффициентов остаточной продуктивности определяется их входением в подсчеты прогнозных ресурсов выявленных месторождений, в расчеты поисковых сетей, показателей зональности и в решения ряда других задач. Понятие о коэффициенте остаточной продуктивности вторичных ореолов рассеяния положило начало методам количественной интерпретации литохимических аномалий.

4.10. СМЕЩЕНИЯ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ

Центральная точка вторичного остаточного ореола рассеяния C_{\max} совпадает с эпицентром рудного тела только при его вертикальном падении и горизонтальной дневной поверхности. Во всех случаях ореол смещается по восстанию рудного тела и к подножию горного склона.

При пологом падении рудного тела смещение центральной точки ореола определяется зависимостью $S_{\beta} = Bh \operatorname{ctg} \beta$, где B — коэффициент изменения объема горных пород при выветривании, h — мощность рыхлых образований и β — угол падения рудного тела. При выветривании с уменьшением объема пород $B > 1,0$, при увеличении объема — $B < 1,0$, при выветривании без изменения объема $B = 1,0$. Наибольшие смещения ореолов по восстанию обнаруживаются при $\beta < 45^{\circ}$ и $B > 1,0$, в других случаях смещения S_{β} пренебрежительно малы. Значительное уменьшение объема возможно при выветривании карбонатных пород и ультрабазитов.

Смещение центральной точки ореола на поверхности плоского склона относительно оси рудного тела, падающего по нормали к склону, определяется зависимостью $S_{\alpha} = Ah^2 \sin \alpha$. Здесь A — местный коэффициент, h — мощность элювиоделювия по нормали к склону и α — угол наклона местности к горизонту. Величина A определяется из выражения $A = gT_0/12v_0$, где g — ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/сек}^2$), $T_0 = h/\Delta h$ — полное время выветривания при ежегодном слое денудации Δh ; v_0 — кинематический коэффициент вязкости верх-

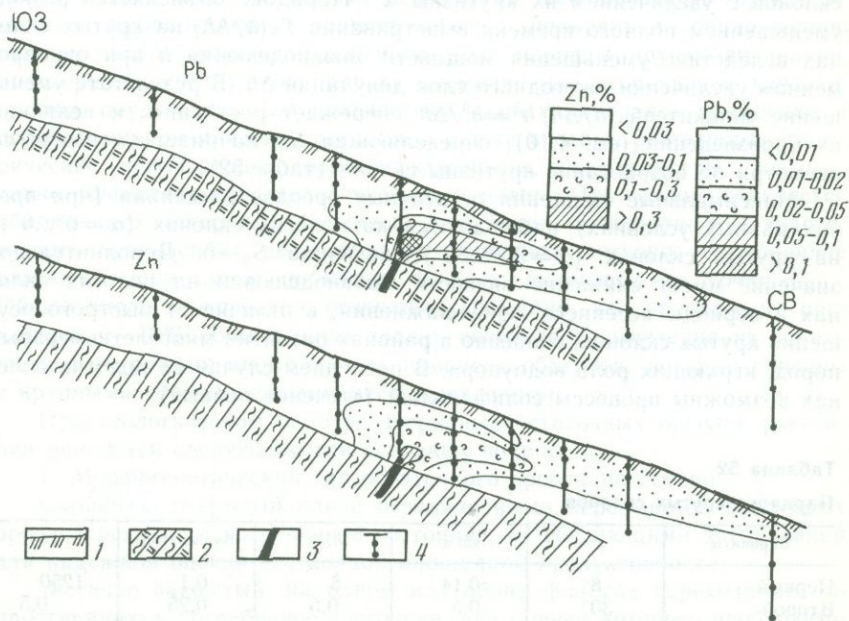


Рис. 50. Смещение ореолов рассеяния свинца и цинка на горном склоне

1 — элювиоделювий; 2 — сланцы; 3 — рудная жила; 4 — точки пробоотбора. Масштабы см. на рис. 61

него слоя элювиоделювия. Зависимость, определяющая величину S_{α} , является результатом решения дифференциального уравнения ламинарного течения вязкой жидкости.

Геологическим условиям этой задачи отвечает ограниченное время T_0 и существование зависимости $T_2 = T_0 \frac{h-z}{\Delta h}$, определяемой динамическим равновесием между выветриванием и денудацией. Большие смещения ореолов рассеяния, превышающие 150 м, наблюдались на умеренно крутых склонах при наличии устойчивой («вечной») мерзлоты и явлений солифлюкции [36]. На рис. 50 показаны вертикальные разрезы остаточных ореолов рассеяния Pb и Zn в стенке разведочной канавы на горном склоне. В данном случае отчетливо видна параболическая деформация оси ореола при смещении его центральной точки по склону на 30—40 м, характерном для склонов средней крутизны в лесных ландшафтах без многолетнемерзлых пород.

Величина общего смещения центральной точки ореола по восстанию рудного тела и к подножию склона определяется векторной суммой $\vec{S}_{\text{общ.}} = \vec{S}_{\alpha} + \vec{S}_{\beta}$, где $\vec{S}_{\text{общ.}}$ — диагональ параллелограмма, построенного на составляющих \vec{S}_{α} и \vec{S}_{β} с учетом их направления.

4.11. ПАРАДОКС КРУТЫХ СКЛОНОВ

Под парадоксом крутых склонов понимается нарушение ожидаемого роста величины смещений S_{α} ореолов рассеяния к подножию горных склонов с увеличением их крутизны α° . Парадокс объясняется резким уменьшением полного времени выветривания $T_0 (h/\Delta h)$ на крутых склонах вследствие уменьшения мощности элювиоделювия h при одновременном увеличении ежегодного слоя денудации Δh . В результате уменьшение множителя $(h/\Delta h) h^2 = h^3/\Delta h$ опережает рост $\sin \alpha$, и величина их произведения (см. 4.10), определяющая S_{α} , начинает уменьшаться несмотря на возрастание крутизны склона (табл. 52).

Максимальные смещения остаточных ореолов рассеяния (при прочих равных условиях) наблюдаются на пологих склонах ($\alpha = 6^{\circ} \dots 8^{\circ}$); на крутых склонах ($\alpha = 30^{\circ} \dots 35^{\circ}$); величина $S_{\alpha} \rightarrow 0$. Дополнительное значение имеет снижение вязкости элювиоделювия на пологих склонах в периоды весеннего переувлажнения, в отличие от быстрого осушения крутых склонов, особенно в районах развития многолетнемерзлых пород, играющих роль водоупора. В последнем случае на пологих склонах возможны процессы солифлюкции («течение почвы»).

Таблица 52

Парадокс крутых склонов

Варианты	α°	$\sin \alpha$	h , м	Δh , мм/год	$h^3/\Delta h$
Первый	8°	0,14	5	0,1	1250
Второй	30°	0,5	0,5	0,25	0,5
Смещение S_{α}	Увеличение в 3,6 раза		Снижение в 2500 раз		

4.12. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОСМОТР И ДЕТАЛИЗАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ

Детализация остаточных ореолов рассеяния с целью их оценки — непременное условие эффективного ведения поисковых работ.

Обнаружение остаточных ореолов рассеяния коренного оруденения является результатом поисковых литохимических съемок, чаще всего проводимых в масштабе 1:50 000. В геологически менее изученных горных районах съемки проводятся после региональных литохимических съемок по потокам рассеяния. В экономически развитых (особенно, в горно-промышленных районах) поисковые съемки по вторичным ореолам рассеяния проводятся минуя региональную стадию. В первом случае основные вопросы генетической принадлежности, условий залегания и масштаба выявленного оруденения уже решались при геологическом осмотре литохимических потоков рассеяния, неизменно охватывающем прилегающие горные склоны (см. 3.9).

Очередность геологического осмотра выявленных литохимических аномалий определяется их предварительной оценкой на основе геологических, геохимических и геофизических данных, рассмотрения топографических карт и ранжирования аномалий по величине площадной продуктивности, подсчитанной по картам-«разноскам» результатов анализа проб (см. 4.3, рис. 40).

Геологический осмотр остаточных ореолов рассеяния начинается с точек максимальных содержаний рудных элементов C_{\max} и затем распространяется в направлении установленного или ожидаемого простиранья рудной зоны. В горных районах со щебенистым и грубообломочным элювиоделювием осмотр обычно приводит к обнаружению рудных свалов, измененных околорудных пород и других признаков, подтверждающих рудную природу аномалии или уточняющих характеристику оруденения. Для диагностики рудных минералов применяются полевые микрохимические реакции, а также полевые рентгенорадиометрические анализаторы, гамма-спектрометры, бериллометры, повышающие эффективность геологического осмотра. При малом количестве обломочного материала (особенно в районах оловорудных и золоторудных проявлений) целесообразно проводить лотковое опробование элювиоделювия путем промывки 4—6 кг мелкозема из точки C_{\max} . Общее число гипергенных безрудных аномалий, как правило, не превышает 5—10%. Важнейшую задачу составляет выделение из многочисленных рудных аномалий тех немногих объектов, которые связаны с крупными промышленными месторождениями.

При геологическом осмотре вторичных остаточных ореолов рассеяния решаются следующие три основных вопроса.

1. Морфогенетический тип остаточного ореола рассеяния:

полностью открытый или с ограниченными перерывами, в которых ореол переходит в погребенное состояние, не создающими затруднений для надежной оценки его полной площадной продуктивности;

частично закрытый, на одном или обоих флангах переходящий по простиранью в погребенное состояние, для оценки которого необходимо его оконтуривание глубинными литохимическими съемками.

2. Тип выявленного (или ожидаемого) коренного оруденения, к которому приурочен данный ореол рассеяния, различая при этом:

принадлежность оруденения к важнейшим промышленно-генетическим типам;

неблагоприятный тип оруденения, для которого промышленные масштабы не характерны.

3. Ожидаемый масштаб оруденения, подчиненный десятичной классификации месторождений по крупности, выделяя при этом:

группу объектов предположительно крупного и среднего масштаба, на которых производство работ следующей стадии рекомендуется в первую очередь. В эту группу, в частности, должны входить наложенные ореолы рассеяния, для которых заранее допускается связь с погребенными месторождениями предположительно крупного и среднего масштабов;

мелкие объекты, на которых работы следующей стадии рекомендуются во вторую очередь и в ограниченном объеме;

непромышленные рудопроявления, подлежащие отбраковке по результатам осмотра.

В процессе осмотра производится детализационный отбор проб по промежуточным профилям и путем повторения профилей основной сети с более частым шагом.

Конечным результатом геологического осмотра ореолов и анализа контрольно детализационных проб являются подсчет прогнозных ресурсов категории P_2 и предложения по производству детальных литохимических съемок масштаба 1:10 000 с указанием положения и размера участка, азимута магистралей и очередности производства работ или обоснованный отказ от дальнейших работ.

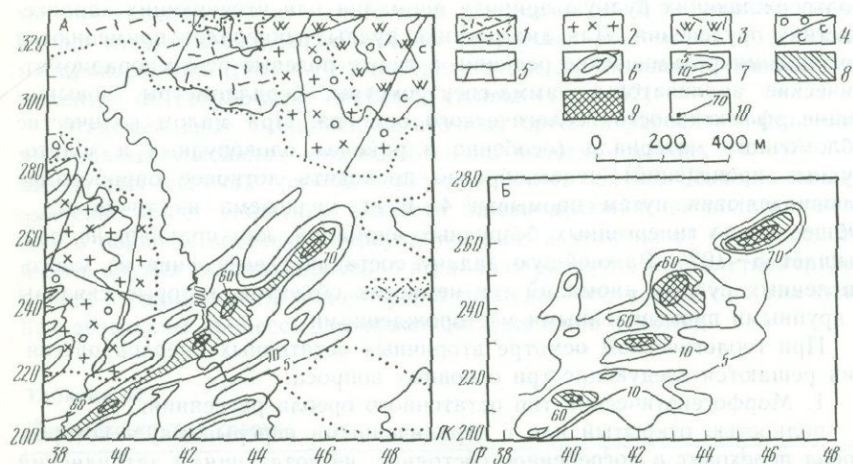


Рис. 51. Гидроморфная геохимическая аномалия. По Н. Д. Склярову (А — исправленный вариант, Б — первоначальный):

1 — кислые эффузивы и их туфы; 2 — гранодиориты; 3 — вторичные кварциты; 4 — окварцевание, серицитизация; 5 — тектонические нарушения; 6 — горизонталы; 7 — изоконцентрации Cu в $10^{-3}\%$; 8—10 — содержания Cu (8 — 20—50; 9 — более 50; 10 — max)

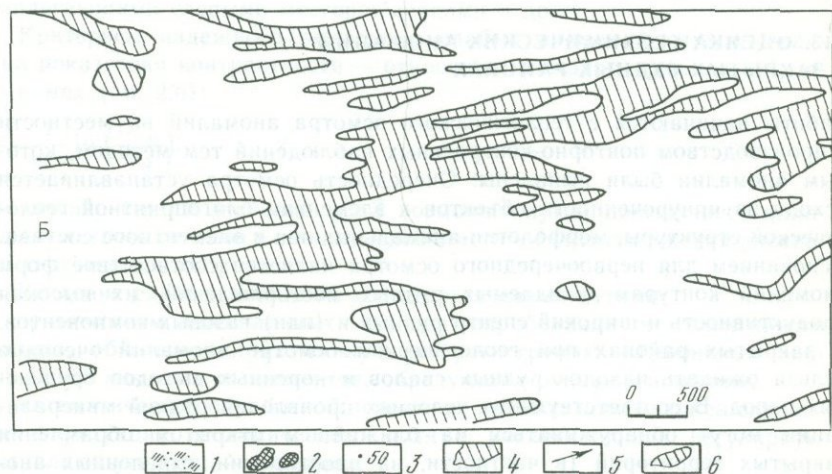
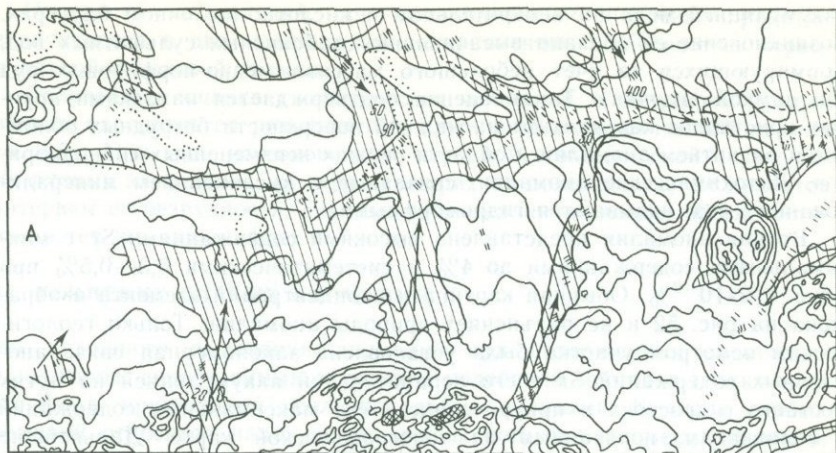


Рис. 52. Результаты литохимической съемки масштаба 1:50 000 (А — исправленный вариант, Б — начальный, без учета направления стока):

1 — солончаки; 2 — контур аномалии Sr (0,02%); 3 — Sr_{max} ; 4 — вторичные ореолы рассеяния Sr; 5 — направление стока; 6 — изоконцентрации Sr (0,02%), Б

Ниже рассматриваются именно такие случаи, когда в результате геологического осмотра аномалии были признаны безрудными. На рис. 51 показана медная аномалия, которая первоначально привлекла внимание своей протяженностью (1000 м) и нахождением в условиях, допускающих предположение о местном коэффициенте остаточной продуктивности меди $k \ll 1,0$. С учетом этого на участке были проведены литохимические съемки масштаба 1:10 000 и начаты горно-буровые работы (см. рис. 51, б). Оказалось, что аномалия отчетливо приурочена к пролювиальным отложениям сухого русла и является гипергенной

аккумуляцией меди на испарительном и кислотно-щелочном барьерах. Возникновение ее обязано высачиванию слабокислых сульфатных вод, формирующихся за счет небольшого массива медно-порфировых руд (за рамкой рисунка). Такая оценка подтверждается находками крупных кристаллов халькантита на нижней поверхности безрудных обломков и развитием аномалии в области свежих неизмененных гранодиоритов. Литохимические аномалии, связанные с высачиванием минерализованных вод, называются гидроморфными.

Вторая аномалия представлена высокими содержаниями Sr с максимальными содержаниями до 4% и систематическими 0,3—0,5% при фоне $< 2 \cdot 10^{-2}\%$. Обычная картина изоконцентраций элемента изображена на рис. 52 и не разъясняет природы аномалии. Только геологическим осмотром участка была установлена закономерная связь аномальных содержаний Sr с его испарительной аккумуляцией на путях местного гидростока и приуроченности его максимальных содержаний к солончакам, показанным на топографической карте. Дальнейшие работы на участке не проводились.

4.13. ОЦЕНКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ЗАКРЫТЫХ РУДНЫХ РАЙОНАХ

Работы начинаются с геологического осмотра аномалий на местности с производством повторно-контрольных наблюдений тем методом, которым аномалии были выявлены. Очередность осмотра устанавливается исходя из приуроченности объектов к элементам благоприятной геологической структуры, морфологии аномальных зон и элементного состава. Основанием для первоочередного осмотра является соответствие форм аномалий контурам ожидаемых рудных месторождений, их высокая продуктивность и широкий спектр рудных (или) газовых компонентов. В закрытых районах при геологическом осмотре аномалий очевидно нельзя ожидать находок рудных свалов и коренных выходов оруденелых пород. В соответствующих условиях проявления рудной минерализации могут обнаруживаться на ближайшем открытом обрамлении закрытых территорий (в частности, на простирации выявленных аномалий). В более общем случае в задачу осмотра входит установление связи контура аномалии с особенностями ландшафта и литологии пород осадочного чехла. В случаях совпадения проверяется влияние тех же элементов ландшафтной обстановки и литологии чехла на структуру геохимического поля на остальной площади съемки. Если такая связь многократно повторяется, подобные аномалии следует считать безрудными ландшафтными аккумуляциями микроэлементов или соответственно «породными». Этот вывод определяется редкостью появления крупных месторождений, на которые ориентируются наземные геохимические поиски в закрытых районах, и неспособностью многочисленных мелких рудных объектов создавать соизмеримые аномалии на поверхности чехла. Ассоциации микроэлементов, аккумулирующихся на физико-химических барьерах, рассмотрены в разделе 1.20. Повышенные содержания рудных элементов в конкретных горизонтах чехла устанавливаются опробованием его разреза.

Плотность наблюдений при детализационно-оценочных работах увеличивается в два-четыре раза по сравнению с плотностью первоначальной поисковой съемки.

Дальнейшая оценка геохимических аномалий в закрытых рудных районах определяется результатами глубинной литохимической съемки (см. 4.6). При этом исчезновение с глубиной геохимической аккумуляции рудных элементов (на первых метрах от поверхности) не является критерием ее безрудности, если такие аномалии не повторяются постоянно в тех же ландшафтах.

4.14. УСИЛЕНИЕ СЛАБЫХ АНОМАЛИЙ

Для надежного выделения аномалий при содержаниях элементов-индикаторов, сопоставимых с уровнем колебаний местного геохимического фона, применяется усиление слабых аномалий. К числу слабых аномалий относятся наложенные ореолы погребенных месторождений, вторичные остаточные ореолы рассеяния, первичные ореолы над глубоко-козалегающими слепыми месторождениями и др.

Критерием надежного выявления слабых аномалий служит величина показателя контрастности — отношение полезного сигнала к уровню помех (см. 2.6):

$$\gamma = \frac{1}{\lg \varepsilon} \lg \left(\frac{C_{\max}}{C_{\phi}} \right).$$

Увеличение его до значений $\gamma \geq 3$ возможно путем повышения амплитуды полезного сигнала в аномальной области и (или) понижения дисперсии геохимического фона.

Усиление слабых аномалий достигается двумя путями:

применением специальных методов опробования и селективного анализа, обеспечивающих наилучшую регистрацию надфоновых концентраций химических элементов, образующих рудную аномалию;

математической обработкой поисковых данных, понижающей случайные флуктуации геохимического поля и увеличивающей регулярную составляющую рудной аномалии.

Первая группа методов включает: 1) повышение точности анализа проб геохимической съемки; 2) селективное извлечение подвижных форм рудных элементов из ореолообразующей среды; 3) частично-фазовый анализ литохимических проб.

Извлечение подвижных форм элементов-индикаторов оруденения в точках наблюдения осуществляется электрохимическим путем при съемках методом ЧИМ (см. 4.5).

Частично-фазовый анализ включает в себя водные, содовые, солянокислые, азотнокислые, ацетатные, пирофосфат-натриевые и другие вытяжки, растворяющие подвижные формы элементов, доля которых в пробах над месторождениями существенно выше по сравнению с фоновыми участками.

На этом принципе основан «метод подвижных форм» (МПФ), разработанный Л. В. Антроповой (1975). При съемках МПФ индикатором погребенных месторождений служит возрастание показателя Me/C , где

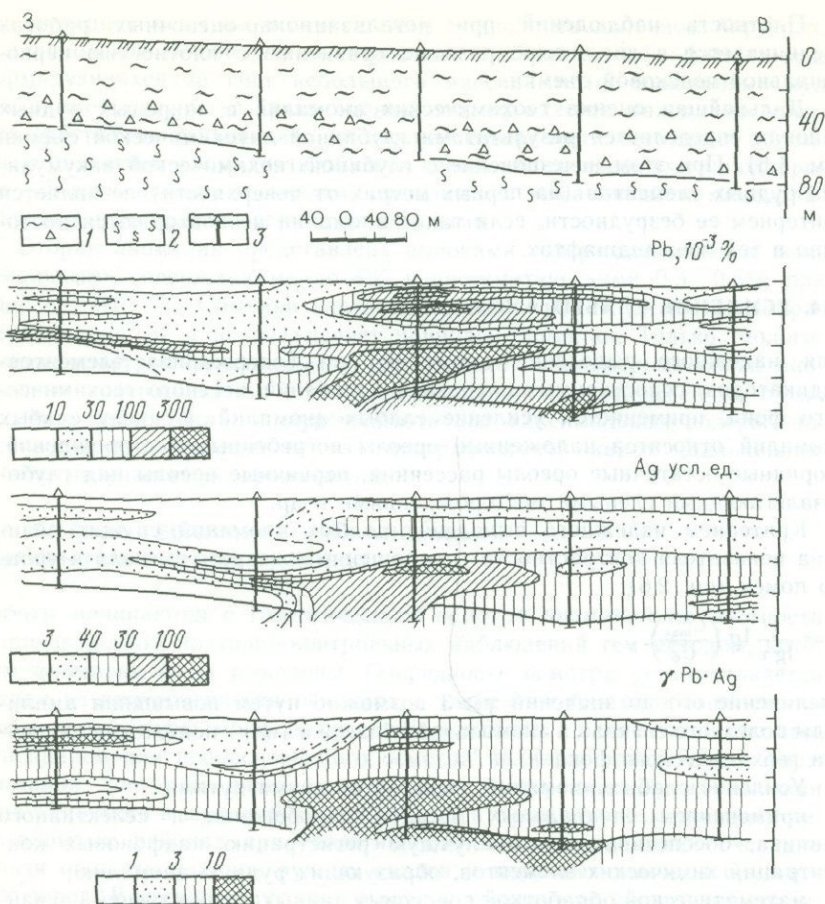


Рис. 53. Наложенные ореолы рассеяния свинца и серебра и значения показателя контрастности γ в ТМФ в вертикальном разрезе рыхлых отложений

Me — концентрация рудного элемента в пирофосфат-натриевой вытяжке и С — содержание органического углерода в исходной литохимической (почвенной) пробе.

К этому виду исследований относится изучение состава минеральных фаз, концентрирующих элементы, мигрирующие в растворенной форме. Одним из приемов усиления слабых геохимических аномалий является метод терромагнитных фракций (ТМФ, см. 3.18). На рис. 53 показан наложенный ореол погребенного полиметаллического месторождения, выделенного по данным ТМФ.

Общим недостатком методов первой группы является резкое снижение технико-экономических показателей поисковых съемок (их удорожание и снижение экспрессности анализов), что ограничивает возможность их использования в производственных масштабах.

Усиление слабых геохимических аномалий достигается и методами

математической обработки. Простейшим способом снижения уровня случайных природных и технических помех является сглаживание данных геохимического опробования методом «скользящего среднего» с числом точек в окне n , близким к их числу в контуре ожидаемой слабой аномалии. В этом случае регулярная составляющая поля (полезный сигнал) сохраняет свою амплитуду, а случайная составляющая (помеха) уменьшается в \sqrt{n} раз, что приводит к увеличению показателя контрастности в такое же число раз.

Рудные аномалии полиэлементны, их контрастность увеличивается при перемножении (мультипликации) содержаний m элементов типоморфного комплекса. В слабых аномалиях превышения содержаний элементов над их фоном соизмеримы между собой, поэтому амплитуда мультипликативной аномалии возрастает примерно в m раз. Одновременно стандартное отклонение мультипликативного фона, согласно теореме о сложении дисперсий, увеличивается только в \sqrt{m} раз и также возрастает контрастность мультипликативной аномалии. В результате сочетания мультипликации и сглаживания показатель контрастности новой аномалии γ^* возрастает в \sqrt{nm} раз по сравнению с контрастностью исходных аномалий γ_0 , или $\gamma^* = \gamma_0 \sqrt{mn}$.

Фактическое увеличение контрастности аномалий несколько ниже, так как помехи, осложняющие геохимическое поле каждого из элементов, коррелированы между собой. Для достижения нужной контрастности слабой аномалии $\gamma^* \geq 3,0$ за счет моноэлементных аномалий, скрытых за уровнем помех ($\gamma_0 < 1,0$), необходимо реализовать условие $mn \geq \left(\frac{3}{\gamma_0}\right)^2$. Например, при $\gamma_0 = 0,3$ имеем $mn \geq 100$. При мультипликации содержаний шести рудных элементов поставленное условие достигается при сглаживании окном (3×7) — 3 профиля по 7 точек на профиле, поскольку $126 > 100$.

Выбор рудных элементов для мультипликации определяют их максимальные кларки концентрации в рудах по сравнению с местным геохимическим фоном. В знаменатель мультипликативного показателя могут вводиться элементы выноса ($K_k < 1$). С целью подавления безрудных ландшафтных аномалий, затрудняющих выявление слабого полезного сигнала, в знаменатель геохимического показателя могут вводиться элементы, характеризующие ландшафтные условия. Число и смысл элементов, образующих мультипликативный показатель, должны тщательно контролироваться. Это положение иллюстрируют специальные номограммы для оценки полезности мультипликации [36]. Некритическое произвольное перемножение содержаний большого числа химических элементов без учета их «вклада» в слабую аномалию и величины максимальной контрастности моноэлементных аномалий способно принести только вред. При поисковых геохимических съемках мультипликация и сглаживание данных проводятся на ЭВМ (см. 4.15). Примеры выявления слабых геохимических аномалий, отвечающих наложенным ореолам рассеяния погребенных полиметаллических месторождений, были приведены в разделах 4.4, 4.5 (см. рис. 42—44).

4.15. ПРОГРАММЫ ДЛЯ МУЛЬТИПЛИКАЦИИ И СГЛАЖИВАНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ЭВМ

Методы мультипликации и сглаживания применяются для повышения контрастности слабых геохимических аномалий, при выделении комплексных аномалий, для анализа зональности геохимического поля и для интерпретации данных нерегулярных сетей опробования.

Мультипликативные показатели являются наиболее простыми целевыми функциями геохимического поля. В общем виде мультипликативная функция определяется выражением:

$$J_i = \frac{\omega_1 C_{i,1} \omega_2 C_{i,2} \dots \omega_k C_{i,k}}{[\omega_{k+1} C_{i,k+1} \omega_{k+2} C_{i,k+2} \dots \omega_{k+m} C_{i,k+m}]},$$

где J_i — значение функции в i -й точке геохимического поля; $\omega, \dots, \omega_{k+m}$ — веса химических элементов; $C_{i,1}, \dots, C_{i,k+m}$ — содержания элементов в i -й точке поля. Наборы химических элементов мультипликативного показателя и их веса априорно задаются исследователем на основании общих представлений о процессе рудоотложения. Обычно веса элементов не известны, и поэтому принимаются равными целым числам. В числитель показателя помещаются элементы типоморфного комплекса рудоотложения, а в знаменатель — элементы выноса. Мультипликативные показатели зональности должны быть безразмерными, для выделения слабых аномалий это не обязательно. Достоинствами мультипликативных функций являются их относительная простота и понятный исследователю геохимический смысл, а недостатком — субъективный характер. Для усиления слабых аномалий используют и более сложные целевые функции (например, уравнения линейных регрессий факторов, полиэлементные линейные функции и т. д.).

При обработке данных методом «скользящего среднего» окно перемещается в геохимическом поле по заданной регулярной сети. В каждом узле этой сети по определенному алгоритму осуществляется осреднение точек, попавших в окно, с помещением результата осреднения в центр окна (узел сети). Скользящее окно является частотным фильтром. Им эффективно подавляются случайные высокочастотные помехи (шумы) с радиусом автокорреляции меньшим ширины окна.

Перед сглаживанием исследователь на основании априорных соображений задает размеры окна и число осреднений поля, кроме того для многих программ сглаживания может быть задана и разновидность весовой функции осреднения. Для задач выделения слабых аномалий размер окна подбирается близким к размерам ожидаемых аномалий в плане. Для задач интерполяции нерегулярных геохимических наблюдений размер окна берется минимальным и осуществляется многократное осреднение геохимического поля. Это приводит к получению геохимических полей, максимально близких к исходным. Осреднение в окне осуществляется по формуле:

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i C_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i},$$

где C_k — осредненное значение переменной (помещается после сглаживания в центре окна); C_i — значение переменной в i -й точке геохимического поля, попавшей в окно; ω_i — вес i -й точки; n — число точек, попавших в окно. При использовании способа «скользящего среднего» веса всех точек, попавших в окно, принимаются равными, т. е. вычисляются средние арифметические значения переменных. Если применяются весовые функции, то веса точек ω_i являются обратной функцией их расстояний r до центра окна. Например, можно использовать линейную ($1/r$) или квадратическую ($1/r^2$) функции. Используемое окно может быть прямоугольным или круговым. Достоинство метода «скользящего окна» — простота и универсальность, а недостатки — интуитивность при задании параметров сглаживания и недостаточная статистическая обоснованность метода. Для сглаживания применяют и более сложные алгоритмы, например, тренд-анализ, сглаживание функциями Стеклова, сплайнами и т. д. [38].

В результате сочетания мультипликации и сглаживания показатель контрастности новой аномалии возрастает по сравнению с контрастностью исходных моноэлементных аномалий (см. 4.14).

Мультипликация и сглаживание данных поисковых съемок выполняется на ЭВМ с большой оперативной памятью (см. 7.32), при малом объеме данных — на программируемых микрокалькуляторах (см. 7.31).

4.16. ДЕТАЛЬНЫЕ ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Детальные съемки — главный вид завершающих геохимических работ на поисковой, а затем поисково-оценочной стадиях, по данным которых начинается горно-буровая разведка выявленного оруденения и подсчитываются прогнозные ресурсы категории P_1 . Съемки обычно выполняются в наземном варианте в масштабе 1:10 000 по сети 100×20 м, размеры участков самые различные: менее 1 км^2 — десятки и сотни квадратных километров. При больших площадях работы должны выполняться в рамках трапеций соответствующей разграфки (см. 1.23). Геохимические съемки сочетаются с геологическими и геофизическими съемками того же или смежных масштабов, могут дополняться глубинными литохимическими, радиометрическими, газорутутными и другими видами детальных оценочных геохимических работ. Помимо выполнения в рудных районах в составе основной последовательности геохимических съемок (1:200 000—1:50 000—1:10 000), детальные литохимические съемки целесообразны в пределах рудных полей любых ранее выявленных разведываемых, эксплуатируемых, отработанных или законсервированных месторождений, если они в свое время не проводились. На выявленных промышленных месторождениях выполнение детальных литохимических съемок с охватом периферии рудного поля крайне важно в ранний период разведочных работ, до застройки и техногенного загрязнения территории.

В отличие от стандартных требований к производству любых видов региональных и собственно поисковых геохимических съемок, ориентированных на признаки, свойственные всем месторождениям, (например, большая протяженность аномалий, связанных с крупными

объектами, и т. п.), методика детальных литохимических съемок и количественная интерпретация ее данных в большой степени зависят от конкретных геологических, геоморфологических и ландшафтно-геохимических условий участка работ, от генетического типа, условий залегания и минералого-геохимических особенностей изучаемого месторождения. Готовых рецептов для ведения детальных литохимических съемок не существует, и успех этих работ зависит от исполнителей.

Первичная обработка данных при детальных литохимических съемках заключается в составлении карт изоконцентраций основного рудного и главнейших сопутствующих элементов в рабочем масштабе съемки или смежном более крупном. Ореолы рассеяния изучаемого месторождения должны быть полностью оконтурены, что обеспечивается выбором границ участка детальных литохимических съемок по данным лито-, гидро-, атмо- или биогеохимических съемок поисковой стадии. При необходимости производится выборочное сгущение съемочной сети и задание дополнительного числа оконтуривающих профилей.

Карта изоконцентрат на геологической основе и ландшафтная схема участка служат основаниями для задания горных выработок и подсчета прогнозных ресурсов месторождения. Задание первых канав производится на местности лично исполнителем геохимических работ. Результаты горных работ и данные бороздowego опробования рудных тел в коренном залегании служат для уточнения геохимических характеристик оруденения, оценки смещений ореолов, местных значений коэффициента остаточной продуктивности, поправочного множителя $\alpha < 1,0$ (см. 4.27) и других параметров геохимического поля.

На рис. 54 представлены результаты детальной литохимической съемки масштаба 1:10 000 на одном из золоторудных месторождений

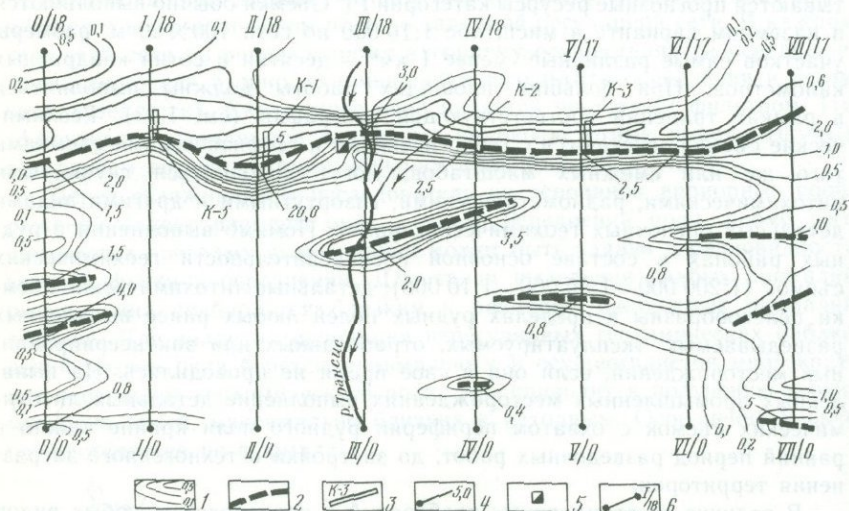


Рис. 54. Результаты детальной литохимической съемки в районе Дабола (Республика Гвинея). По К. Диавара (1987):

1 — изоконцентрации Au (г/т); 2 — оси ореолов рассеяния и рудные жилы; 3 — канавы; 4 — Au_{max}; 5 — старый шурф; 6 — точки пробоботбора

Гвинеи. Золотокварцевые малосульфидные жилы этого месторождения залегают среди кристаллических сланцев и гнейсов протерозоя, по ландшафтным условиям участок относится к зоне горной саванны. Анализ проб литохимической съемки на золото проводится методом Сафронова с порогом определений $5 \cdot 10^{-7}\%$ Au. Одновременно выполнялся общий эмиссионный спектральный анализ на 36 элементов и ААА на ртуть.

Изоконцентраты золота, отвечающие вторичным остаточным ореолам рассеяния при $C_{\max} = 20,0$ г/т Au, с высокой надежностью фиксируют положение золотокварцевых жил. Это позволило задать по жиле № 1 четыре разведочных канавы длиной 20—35 м каждая, которые вскрыли рудное тело с кондиционным содержанием металла. Ореолы рассеяния рудных жил в данном случае не оконтурены по простиранию, что объясняется заданием участка при отсутствии результатов литохимической съемки предыдущей стадии. Это определило условный характер оценки прогнозных ресурсов золота $Q_{\text{тоо}}$, подсчитанных по продуктивности остаточных ореолов рассеяния при местных значениях коэффициента остаточной продуктивности $k = 1,4 \cdot 1,16^{\pm 1}$ и поправочного множителя на забалансовые руды $\alpha^2 = 0,2$. Полученная цифра ресурсов категорий P_1 рассматривается как минимальная.

4.17. ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Для вертикального рудного пласта (жилы) конечной мощности $2p$ с содержанием металла C_p формула для расчета вторичного остаточного ореола рассеяния по профилю вкрест простирания имеет вид:

$$C_x = \frac{C_p}{2} \left[\Phi\left(\frac{p+x}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{p-x}{\sigma}\right) \right],$$

где $\Phi(U)$ — интеграл вероятностей; σ — коэффициент гипергенного рассеяния на горизонте опробования. Начало координат на дневной поверхности в центре пластов 1, 2, 3 ...9; $C_{\phi} = 0$ (рис. 55).

По графикам содержаний в остаточном ореоле рассеяния рудного тела различной мощности видно, что при $p < \sigma$ наступает действие принципа эквивалентности, т. е. форма графика под пластом малой мощности зависит только от его продуктивности ($M_p = 2p \cdot C_p$) и, следовательно, постоянному значению M соответствует бесчисленное множество различных пар значений C_p и $2p$. В этом случае содержание рудного элемента в ореоле рассеяния может быть рассчитано по формуле:

$$C_x = \frac{M_p}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

При $2p \gg \sigma$ левая и правая половины ореола представляют собой графики над контактом. В этом случае оценить по графику параметры рудного тела наиболее просто: $C_p = C_{\max}$ в пределах плоского максимума, $2p$ — равно ширине ореола на уровне $0,5C_{\max}$, σ — равно расстоянию между точками с содержанием $0,84C_{\max}$ и $0,5C_{\max}$ или между $0,5C_{\max}$ и $0,16C_{\max}$ на обоих контактах рудного пласта.

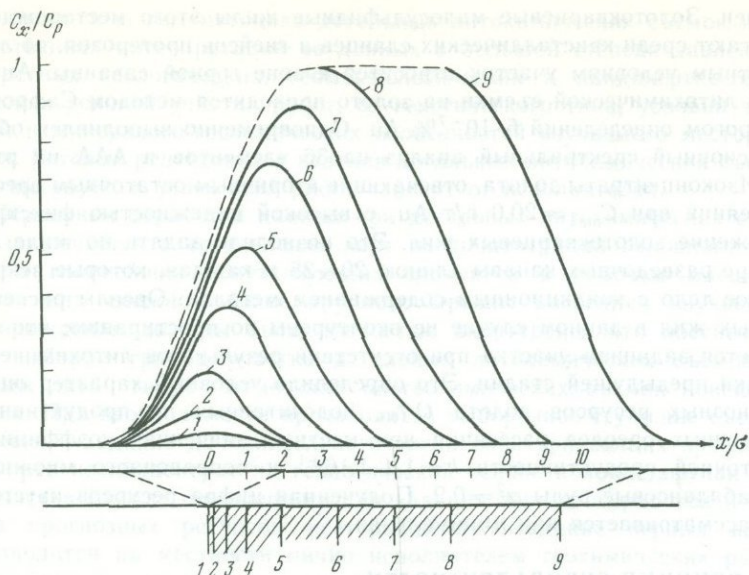


Рис. 55. Графики содержаний рудного элемента в остаточных ореолах рассеяния рудных жил различной мощности

В случае маломощного рудного тела раздельное определение C_p и 2ρ невозможно, так как в этом случае действует принцип эквивалентности мощности пласта и содержаний в нем металла. Это возможно установить путем определения значения σ методом трех уровней (см. 4.8). Если для всех трех уровней получаем одинаковые значения σ , это свидетельствует о справедливости соотношения $\rho < \sigma$. В противном случае, ширина ореола с уменьшением уровня содержаний растет значительно медленнее, чем в случае действия принципа эквивалентности. Установив σ можно определить $M = C_{\max} \sigma \sqrt{2\pi}$, где C_{\max} — максимальное содержание элемента в ореоле.

Для промежуточного случая, когда уже не действует принцип эквивалентности, но мощность рудного пласта еще не очень велика, ($2\rho \leq 6\sigma$), по графику C_x можно раздельно определить оба параметра рудного пласта 2ρ , C_p и коэффициент рассеяния σ , используя для этой цели палетки Дубова или номограмму ЛГИ. Строго говоря, палетки и номограммы пригодны лишь для интерпретации ореолов рассеяния рудных тел жильной формы ($2\rho_x \ll 2\rho_y$), при вертикальном их падении и горизонтальной дневной поверхности (остаточные элювиальные ореолы рассеяния). Однако с некоторыми допущениями этот метод можно использовать и при наклонном падении рудных тел (определяя при этом видимую мощность рудного тела) и при негоризонтальной дневной поверхности (если ореол не шлейфообразный и нас не интересует смещение центра ореола вниз по склону). Кроме того, предполагается, что при формировании ореола не происходит его обеднения

или обогащения по сравнению с исходным рудным телом, т. е. коэффициент остаточной продуктивной ореола $k=1$.

4.18. ПАЛЕТКИ ДУБОВА

Палетки представляют собой набор теоретических кривых [14], рассчитанных по формуле рассеяния для мощного рудного тела (см. 4.7) и построенных в логарифмическом масштабе по вертикальной оси содержаний и в линейном масштабе — по горизонтальной оси расстояний от центра ореола (рис. 56). Для интерпретации практическая кривая строится в том же масштабе по вертикальной оси содержаний, а масштаб по горизонтальной оси выбирается с таким расчетом, чтобы практическая кривая оказалась в пределах теоретических кривых палетки. Соблюдая параллельность осей, среди палеток подбирается наиболее близкая к практической и снимают с нее значения σ/L , $2\rho/\sigma$, $K=C_p/C_{\max}$. Сопоставляя линейные размеры отрезков, отсекаемых на горизонтальной оси практической кривой (в м) и палеточной кривой (в усл. ед. x/L), определяют значение L и пересчитывают σ и 2ρ в метры. Значения K определяется по точке пересечения практической кривой с соответствующей палеточной линией «К». По K и C_{\max} определяется C_p . Для сопоставления с теоретическими кривыми используются обе половины (правая и левая) ореола, обычно несколько асимметричного, и полученные значения 2ρ , C_p , σ — осредняют.

4.19. НОМОГРАММА ЛГИ

Для определения параметров 2ρ , C_p и σ по форме графика C_x можно использовать номограмму, построенную путем соответствующего графического анализа теоретических кривых функции рассеяния.

При построении номограммы использовано два способа определения $2\rho/\sigma$ по форме: способ касательных и способ отношений полуширины ореола [20].

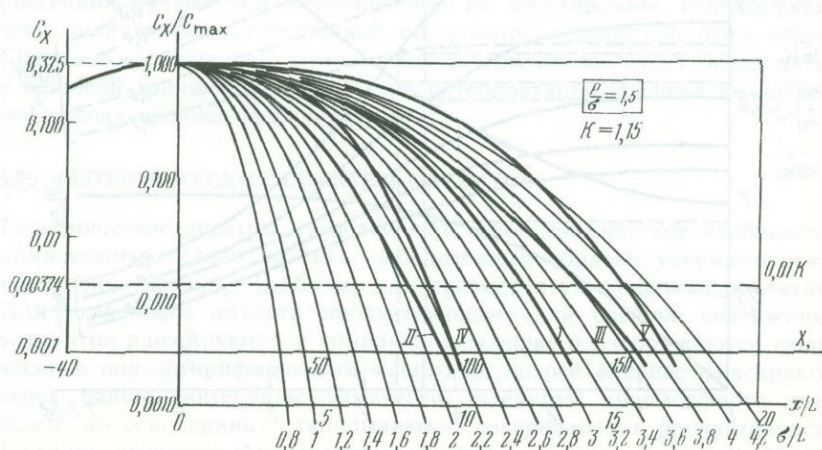


Рис. 56. Интерпретация ореолов рассеяния с помощью палеток Дубова

Способ касательных (рис. 57, а). В точке C_{\max} и C_x к графику содержаний проводятся касательные MN и AB . Из точки пересечения касательных опускается перпендикуляр, делящий полуширину ореола на уровне C_x на два отрезка: a и b . Величина отношения a/b зависит от $2\rho/\sigma$. Графики этой зависимости при различных значениях C_x/C_{\max} приведены на номограмме (см. рис. 57, б).

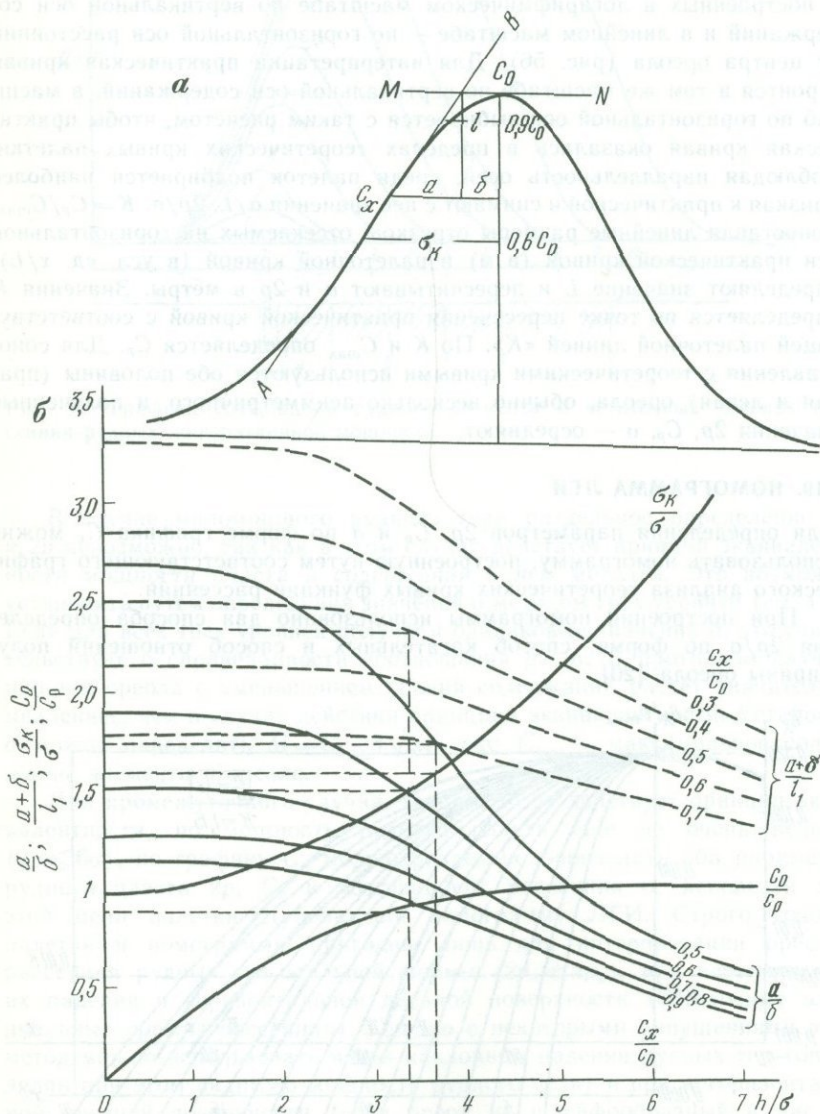


Рис. 57. Ключ к номограмме (а) и номограмма (б) для интерпретации вторичного ореола рассеяния

Способ отношений полуширины ореола (см. рис. 57, а). Способ основан на использовании зависимости отношений $(a+b)/l$ от $2\rho/\sigma$, где $(a+b)$ — полуширина ореола на уровне C_x ; l — полуширина ореола на уровне $0,9C_{\max}$. Графики этой зависимости также приведены на номограмме (рис. 57, б). Далее полуширина ореола на уровне $0,6C_{\max}$ при $2\rho \rightarrow 0$, как известно, равна коэффициенту рассеяния σ . При $2\rho \gg 0$ полуширина ореола на этом уровне, которую обозначим σ_k , будет тем больше, чем больше 2ρ . На номограмме приведен график зависимости σ_k/σ от $2\rho/\sigma$.

Содержание элемента в центре ореола C_{\max} зависит от содержания элемента в рудном теле C_p и от величины $2\rho/\sigma$, при $2\rho \gg \sigma C_{\max} \rightarrow C_p$. График зависимости C_{\max}/C_p от $2\rho/\sigma$ также приведен на номограмме.

Для интерпретации вторичных остаточных ореолов рассеяния по номограмме ЛГИ по профилю, перпендикулярному к оси ореола, в удобном линейном масштабе строится график содержаний элемента. Описанными выше приемами (см. рис. 57, а) с графика снимаются значения C_{\max} , a , b , $(a+b)$, σ_k при различных значениях C_x/C_{\max} (на номограмме приведены кривые для значений C_x/C_{\max} равных 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9). Затем по величине отношения a/b или $(a+b)/l$ по номограмме определяется значение $2\rho/\sigma$ и по двум другим кривым этой же номограммы значения σ_k/σ и C_{\max}/C_p . Зная σ_k и C_{\max} , можно определить σ и C_p , а по σ и $2\rho/\sigma$ определяется и 2ρ .

Для получения более надежных данных при интерпретации следует значения $2\rho/\sigma$ определять как средние из результатов, полученных при различных C_x/C_{\max} : по правой и левой ветвям графика C_x обоими способами интерпретации по номограмме.

Область действия принципа эквивалентности несколько сужается при использовании все более далеких от C_{\max} участков кривой ($C_x < 0,6C_{\max}$), однако надежность (устойчивость) интерпретации при этом падает.

С помощью палеток и номограмм можно интерпретировать ореолы рассеяния рудных тел, ограниченных по простиранию, используя для этой цели графики содержаний по длинной и короткой осям ореола. Содержание элемента в рудном теле в этом случае будет определяться с ошибкой занижения, причем при интерпретации графика по длинной оси ореола ошибка увеличивается.

4.20. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ОБЪЕКТОВ

Геохимические спектры представляют собой графическое изображение химического состава объекта, определенным образом упорядоченное и приведенное к виду, удобному для сравнения со сходными объектами. Для эталонного объекта продуктивности (или средние содержания) элементов ранжируются в убывающем порядке и изображаются графически в полулогарифмическом масштабе: по оси абсцисс фиксируются через равные интервалы химические элементы типоморфного комплекса, по оси ординат откладываются логарифмы их продуктивностей (средних содержаний). Полученный график имеет монотонно убывающий вид и характеризует геохимический спектр эталонного объекта.

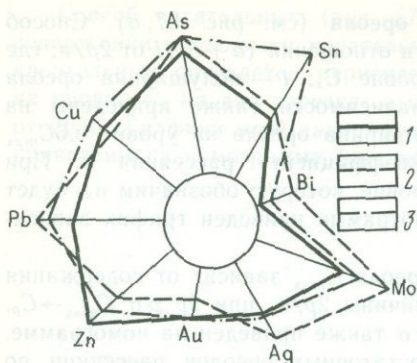


Рис. 58. Круговые геохимические спектры коренного оруденения, вторичного ореола и потока рассеяния (1, 2, 3 соответственно)

Геохимический спектр другого объекта (рудного пересечения) строится в том же масштабе и при том же порядке расположения элементов по оси абсцисс. При этом возможны любые отклонения от монотонного характера, и график приобретает «изрезанный» вид. Различие или сходство между сравниваемыми объектами выявляются путем передвижения одного из графиков вдоль оси ординат до их совмещения по основному рудному или любому элементу (или группе элементов). Совокупность геохимических различий между двумя объектами А и Б выражается с помощью геохимического коэффициента i -го порядка v . Этот показатель представляет собой безразмерную дробь, числитель которой образует произведение продуктивностей (или средних содержаний) элементов, находящихся в дефиците, а знаменатель — произведение тех же величин элементов, находящихся в избытке. Количественной мерой различия между сравниваемыми сходными объектами служит величина отношения $R = v_A/v_B$ (где $v_A > v_B$), именуемого размахом геохимического показателя.

При сравнении геохимического состава достаточно большого числа объектов может быть применен способ построения круговых (радиальных, лучевых) геохимических спектров для величин отношений линейных (площадных) продуктивностей или средних содержаний элементов типоморфного комплекса к продуктивности (среднему содержанию) основного рудного элемента в изучаемом объекте. Для однотипных месторождений и рудопроявлений перечень и взаимное расположение элементов по окружности принимается постоянным. По соответствующим радиусам откладываются безразмерные величины отношений химический элемент/основной рудный элемент в логарифмическом масштабе с модулем $\lg 10 = 1$ см. Начало отсчета на круге диаметром 2 см принимается в соответствии с возможной минимальной величиной этого отношения. В качестве примера на рис. 58 приведены круговые геохимические спектры коренного оруденения, вторичного ореола и потока рассеяния золото-серебряного рудопроявления.

4.21. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ СОДЕРЖАНИЯМИ ЭЛЕМЕНТОВ

Корреляционные зависимости характеризуют сходство (различие) поведения химических элементов в процессах миграции. Мерой взаимозависимости двух элементов X и Y служит величина коэффициента парной корреляции между их содержаниями. Она может быть определена по формуле

$$r = \frac{\sum x_i y_i - \frac{1}{N} \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{|\sum x_i^2 - \frac{1}{N} (\sum x_i)^2| |\sum y_i^2 - \frac{1}{N} (\sum y_i)^2|}}$$

где x_i , y_i — содержания элементов (или их логарифмы) в точках опробования.

Коэффициент корреляции — безразмерная величина и лежит в диапазоне $-1 \leq r \leq +1$. Величина коэффициента не изменяется при изменении начала отсчета и масштаба концентраций.

Равенство коэффициента корреляции единице ($|r|=1$) указывает на линейную функциональную зависимость между содержаниями рассматриваемых элементов: каждому значению концентрации одного элемента соответствует единственное значение другого. При $r=1$ полагается полная идентичность, а при $r=-1$ полная противоположность поведения двух элементов. Величина $r=0$ указывает на отсутствие линейной зависимости между содержаниями элементов, их поведение признается взаимно независимым. Однако следует учитывать, что нулевая корреляция не исключает существования нелинейной зависимости.

Величина коэффициента корреляции, определенная по выборочным данным, имеет случайные флуктуации. При отличии коэффициента корреляции от нуля ($r \neq 0$) значимость коэффициента определяется отношением $r > r_p$, где r_p — критическое значение при заданной надежности вывода (90, 95, 99%). Критическое значение r_p находится по таблицам [37] для числа степеней свободы $f = N - 2$.

Совокупность корреляционных связей между всеми парами элементов в изучаемом объекте может быть представлена графически в виде круговой корреляционной диаграммы или двумерного графа-дендрограммы (рис. 59). В круговой диаграмме элементы располагаются по окружности, и линиями соединяются элементы со значимыми корреляционными связями. Дендрограммы строятся объединением в группы элементов, имеющих положительные корреляционные связи между собой. Ядро групп образуют пары элементов с максимальными коэффициентами корреляции. Порядок последующего включения элементов в группу и объединения групп определяется получением наибольшей величины среднего коэффициента корреляции элементов во вновь образуемой группе.

Для элементов с содержаниями, образующими закрытую числовую систему (сумма концентраций близка к 100%), корреляционные связи

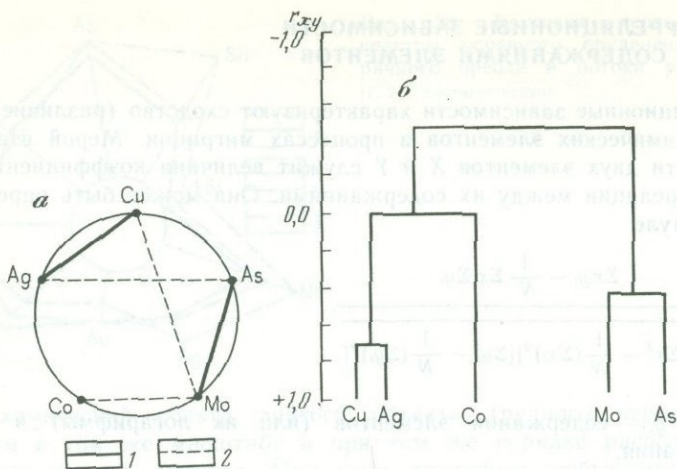


Рис. 59. Корреляционная диаграмма и дендрограмма
 1, 2 — значимые корреляционные связи (1 — положительные, 2 — отрицательные)

в значительной мере характеризуют свойства системы; содержания любого из элементов выражается через сумму других: $C_i = 100 - \sum_{j=1}^{N-1} C_j$. Это приводит к появлению отрицательных корреляционных связей между макроэлементами, не отражающих реальные зависимости. Так, величина коэффициента парной корреляции между содержаниями Fe и Mn в железо-марганцевых конкрециях близка к минус единице. При рассмотрении абсолютных количеств Fe и Mn, приходящихся на единицу площади морского дна, коэффициент корреляции близок к плюс единице. Для одного и того же полиметаллического месторождения в бедных рудах корреляция между содержаниями Pb и Zn сильная положительная, в рядовых рудах отсутствует, а в богатых агрегативных рудах — сильная отрицательная. Никакой генетической информации эта зависимость не содержит.

Величина коэффициента парной корреляции в значительной мере зависит не только от степени взаимосвязанности элементов, но и от воздействия на них других элементов. Для получения величины коэффициента корреляции, характеризующего зависимость между элементами с учетом влияния на их содержания других элементов, вычисляют частный коэффициент корреляции [38]. Значимость частных коэффициентов корреляции с учетом влияния m признаков определяется по таблицам для парных коэффициентов при $f = Nm$.

Если численные значения геохимических признаков не могут быть определены с необходимой точностью, а лишь взаимно упорядочены по степени их проявленности, сила и направление линейной связи оцениваются с помощью ранговых коэффициентов корреляции:

$$r_{xy} = 1 - \frac{6\sum\Delta^2}{N(N^2 - 1)},$$

где $\Sigma\Delta^2$ — сумма квадратов разностей порядковых номеров ранжированного ряда значений x и y . При повторяемости ранговых номеров к сумме $\Sigma\Delta^2$ добавляют значения T_x и T_y , исходя из соотношения $T = |\Sigma(t_i^3 - t_i)|/12$, где t_i — число повторений. Критические значения оцениваются по таблицам [37].

Мерой линейной зависимости содержаний одного элемента от совокупности других служит величина сводного коэффициента корреляции R . Множественная корреляция применяется при прогнозировании геохимических признаков по значениям серии других, в тех случаях, когда прямые измерения затруднены или экономически невыгодны. Сводный коэффициент корреляции лежит в диапазоне от 0 до 1.

В случае нелинейной корреляции двух признаков мерой их зависимости является корреляционное отношение $\eta_{y/x}$ для зависимостей y от x или $\eta_{x/y}$ для зависимостей x от y . Корреляционные отношения вычисляются по формуле:

$$\eta_{y/x}^2 = \frac{\sum_{j=1}^l m_j (\bar{y}_{x_j} - \bar{y})^2}{(N-1)S_y^2},$$

где l — число интервалов разбиения диапазона содержаний x (обычно 8—10); m_j — число точек, попавших в j интервал ($1 < j < l$); \bar{y}_{x_j} — среднее значение y в j интервале. Корреляционные отношения удовлетворяют неравенствам $0 \leq |r| \leq \eta_{y/x} \leq 1$. При $\eta_{y/x} = 1$ между содержаниями двух элементов имеется функциональная зависимость, равенство $\eta_{y/x} = 0$ означает некоррелированность величин x и y .

При изучении корреляционных зависимостей между содержаниями химических элементов в геохимических аномалиях или на различных уровнях рудной зоны необходимо учитывать статистическую значимость различий найденных коэффициентов корреляции. Значимость различий двух коэффициентов парной корреляции может быть оценена с помощью критерия Стьюдента после преобразования r к виду:

$$z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r},$$

Дисперсия z равна $D = 1/(N-3)$. Пределы незначимых различий между двумя коэффициентами корреляции при соответствующих N_1 и N_2 , приведены в [37].

При малых значениях n_1 и n_2 в двух выборках пределы незначимых различий между коэффициентами корреляции настолько велики, что в практике геохимических поисков их диагностическое значение существенно сужается. Однако при многомерном сопоставлении объектов по корреляционным матрицам даже незначимые коэффициенты участвуют в их классификации. Одним из способов сравнения сходных геохимических аномалий может служить метод вычисления парных коэффициентов корреляции между их корреляционными матрицами.

4.22. ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭРОЗИОННОГО СРЕЗА

Для характеристики выявленного оруденения на стадиях поисковых работ по вторичным остаточным ореолам рассеяния или по интервалам

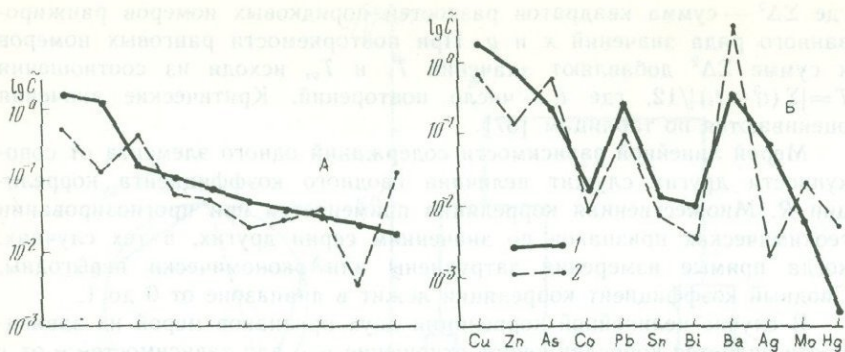


Рис. 60. Линейные геохимические спектры первичных (сплошная линия) и окисленных руд месторождений Авангард (А) и Кусмурун (Б)

окисленных руд необходима оценка уровня эрозионного среза в метрике эталонных, генетически однотипных месторождений (см. 5.15). Взаимоотношения между содержаниями рудных элементов в остаточных ореолах рассеяния обычно хорошо отражают геохимический состав коренного оруденения и не требуют внесения каких-либо поправок. Однако, иногда различия между ними могут быть значительными и требуют учета.

На рис. 60 показаны линейные геохимические спектры окисленных и первичных руд медно-колчеданных месторождений Авангард (Северные Мугоджары) и Кусмурун (Восточный Казахстан). Для окисленных руд месторождения Авангард отмечается заметное накопление Мо и As и существенный вынос Cu, Zn, Ag. В зоне окисления месторождения Кусмурун накапливаются Мо, As, Ba и Hg. Совокупность геохимических различий между окисленными и первичными рудами этих месторождений может быть выражена с помощью показателя $v = (Cu \cdot Zn) / (Mo \cdot As)$. Его численные значения для первичных руд месторождения Авангард составили 604,2; для окисленных руд — 1,06; $R = 570,0$. Для месторождения Кусмурун эти значения составили соответственно 1490,0 и 17,2; $R = 86,6$. Таким образом, при оценке уровня эрозионного среза по вторичным ореолам рассеяния или по окисленным рудам, в первую очередь, медно-колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений, необходимо вводить поправочные коэффициенты.

4.23. ЗАДАНИЕ ПЕРВЫХ КАНАВ И СКВАЖИН

При геохимических поисках задание выработок проводится по данным детальных литохимических съемок масштаба 1:10 000 с целью вскрытия оруденения в коренном залегании и его опробования. Выбор мест заложения горных выработок и скважин проводится на основе совместного анализа геологических, геохимических и геофизических данных.

Канавы задаются вкрест ожидаемого простирания рудной зоны в максимумах вторичных ореолов рассеяния с учетом возможного смещения ореола к подножью склона и по восстанию залежи. Длина

первой канавы не должна быть меньше ширины ореола на уровне $0,5C_{\max}$, что соответствует максимальной мощности предполагаемого рудного тела, способного, согласно принципу эквивалентности (см. 4.17), образовать данный ореол. При мощности элювиоделювия меньше 3,0 м проходку первой канавы на склоне целесообразно начинать в 5—6 м ниже точки C_{\max} и продолжать канаву до пересечения рудной зоны. При мощности рыхлых образований более 3,5 м разведку ведут шурфами, что не исключает пропуск рудной зоны между выработками. При неясных результатах проходки первых канав и шурфов проводят оперативное геохимическое опробование стенок горных выработок с шагом 2—5 м и лотковое (шлиховое) опробование элювиоделювия. Шурфы глубже 8—10 м проходить не рекомендуется, более эффективна проходка скважин.

При заложении первых скважин различия между висячим и лежащим боками рудной зоны могут определяться по смещению максимумов ореолов рассеяния As и Hg в сторону висячего бока от максимумов Pb, Zn, Cu и ореолов Co, W в сторону лежащего бока. Это особенно важно при бурении скважин с целью оценки погребенных ореолов, когда прямые геологические наблюдения невозможны из-за мощного чехла дальнепринесенных отложений.

Дальнейшее размещение разведочных выработок производится с учетом полученных геологических данных на основе карты ореолов рассеяния и приобретенного опыта.

4.24. ОПРОБОВАНИЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И КЕРНА СКВАЖИН

Опробование — обязательный элемент геологической документации любых выработок. Традиционное геологическое опробование дополняет специализированное геохимическое опробование с целью поисков слепых рудных тел по их первичным ореолам (см. 7.2).

При геологоразведочных работах производится сплошное опробование канав (по полотну), шурфов и шахт (по одной из стенок и забою), горизонтальных горных выработок (по одной из стенок на уровне пояса человека, реже из кровли и забоя). По интервалам, пересекающим полезное ископаемое, отбираются бороздовые пробы размером 10×5 см длиной до 1—2 м, зависящей от мощности залежи; обычная масса пробы 8—12 кг*. По предположительно безрудным интервалам отбираются линейные пробы размером 2×1 см длиной 1—2—5 м и массой 0,5—1,5 кг. При алмазном бурении малого диаметра в пробу поступает весь керн, в других случаях — коаксильная половина керна или по его оси вырезается соответствующая борозда. Дробление, сокращение и анализ проб, отобранных по полезным ископаемым, подчиняются требованиям, принятым при разведке соответствующего сырья.

* Задиговое, валовое и технологическое опробование не рассматривается.

4.25. ИНТЕРПРЕТАЦИОННОЕ ОПРОБОВАНИЕ КАНАВ

Погоризонтное опробование стенок разведочных канав проводится с целью изучения морфологии вторичных остаточных ореолов рассеяния в вертикальном разрезе элювиоделювия, для анализа изменений параметров ореолов с глубиной и решения ряда других вопросов. Число опробуемых горизонтов зависит от мощности элювиоделювия, расстояние между горизонтами обычно принимается 0,5 м. Шаг опробования по горизонтам выбирается в зависимости от мощности рудной зоны и составляет от 1—2 м до 5 м в пределах развития вторичных ореолов рассеяния. При выходе в нормальное поле шаг опробования увеличивается до 10 м. Стенки канав опробуются точечным методом, в пробу отбирается песчано-глинистый материал рыхлых образований. Последующая обработка (сушка, просеивание) и анализ проб ведутся по стандартной методике, принятой при литохимической съемке (см. 7.3). На рис. 61 показано опробование канавы.

В дополнение к опробованию стенок канав проходятся интерпретационные профили литохимической съемки вдоль канав с целью опре-

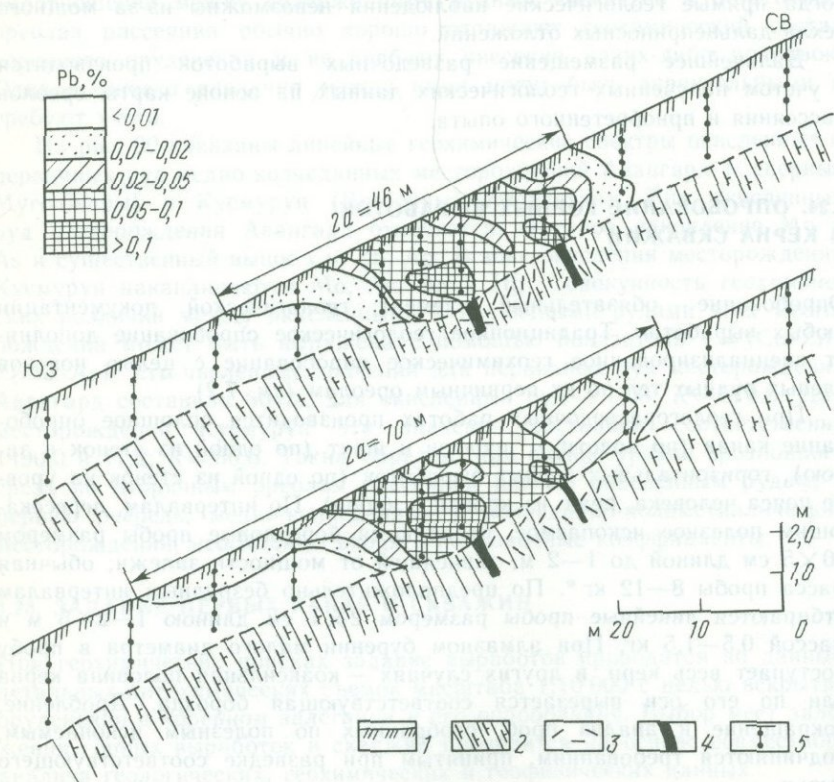


Рис. 61. Литохимическое опробование стенки канавы

1 — элювиоделювий; 2 — туфы кислого состава; 3 — зона трещиноватости; 4 — рудные тела; 5 — точки пробоботбра

деления местной величины коэффициента остаточной продуктивности (см. рис. 49). Профили проходятся по одному или обоим бортам канавы на расстоянии 3—5 м от нее. В горных условиях проходится один профиль выше канавы по склону во избежание заражения проб отвалами. Шаг пробоотбора в зависимости от рудно-формационного типа коренного оруденения принимается 5—10 м с разряжением до 20—50 м при выходе в нормальное геохимическое поле. Длина интерпретационных профилей должна быть достаточной, чтобы гарантировать выход за пределы ореольной зоны. Глубина пробоотбора и фракция, передаваемая на анализ, должны совпадать с условиями производства поисковых литохимических съемок в данном районе.

4.26. ПОДСЧЕТ ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ КАТЕГОРИЙ P_2 И P_1 ПО ПАРАМЕТРАМ ОСТАТОЧНЫХ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ

Независимо от того, ведутся ли поисковые геохимические съемки в «открытом» районе или на закрытой территории, оценки прогнозных ресурсов производятся по параметрам вторичных остаточных ореолов рассеяния в современном элювиоделювии или в древней коре выветривания после выполнения глубинных литохимических съемок. Каких-либо различий между подсчетами прогнозных ресурсов по параметрам современных или палеоклиматических остаточных ореолов рассеяния, в принципе, нет. Оценки ресурсов коренного оруденения по вторичным наложенным ореолам рассеяния не практикуются.

Основными объектами поисков на этих стадиях литохимических съемок являются месторождения, выходящие на уровень современного или древнего эрозионного среза в интервалах промышленных руд, создающие адекватные своему масштабу остаточные ореолы рассеяния. Методы оценки слепых месторождений и месторождений, выходящих на эрозионный срез только надрудными первичными ореолами, рассматриваются в гл. 5 (см. 5.28—5.30). Дополнительным условием правомочности оценки прогнозных ресурсов по остаточным ореолам рассеяния является их полное оконтуривание литохимическими съемками. Последнее не исключает наличия отдельных перерывов по оси ореола, допускающих надежное восполнение расчетным путем [37].

Количественную характеристику выхода оруденения на поверхность коренных пород P_p в $m^2\%$ обеспечивает подсчет продуктивности вторичного остаточного ореола рассеяния P согласно зависимостей

$$P = \Delta x \cdot 2l \left(\sum_{x=1}^N C_x - NC_{\phi} \right) = S(\bar{C}_x - C_{\phi})$$

$$\text{и } P_p = (1/k)P,$$

где k — местное значение коэффициента остаточной продуктивности. Распространяя эту оценку до глубины H м имеем геохимические ресурсы металла:

$$Q = \frac{P}{40k} \cdot H.$$

Здесь деление на 40 отвечает переходу от $m^2\%$ к тоннам металла с учетом объемной плотности горных пород $d=2,5 \text{ т/м}^3$ [17]. В этом выражении величина P подсчитывается по данным съемки, а величина k принимается из опыта работ или из общих геохимических и ландшафтно-геохимических данных (см. 4.9). Поэтому при оценке прогнозных ресурсов по этой простейшей формуле обсуждения заслуживает только выбор глубины H , на которую распространяется подсчет.

Выше (см. 3.10) рассмотрен вариант подсчета «полотном» до фиксированных глубин 100 м (для малых и драгоценных металлов) и 200 м (для цветных и части редких металлов). Такие подсчеты, пригодные для оценки относительно крутопадающих рудных зон, предполагают выклинивание оруденения на глубине $2H$, эквивалентны подсчетам «треугольником» до глубины 200 и 400 м.

В отличие от оценки прогнозных ресурсов категории P_3 по потокам рассеяния, съемки по ореолам рассеяния позволяют приближенно судить о протяженности L (м) рудных объектов вытянутой формы — жильных, пластовых и линзообразных залежей. В этих случаях допустимо пользоваться старинным правилом, согласно которому прогнозная оценка «полотном» рекомендуется до глубины $H=1/4L$. Физическую длину рудной залежи L при этом целесообразно определять в контуре изолинии $0,5\bar{C}_{\max}$ («среднее максимальное» по простиранию остаточного ореола рассеяния). При таком выборе H реализуется «принцип подобия» (см. 5.2), согласно которому более протяженному по простиранию рудному телу (при прочих равных условиях) соответствует большая протяженность оруденения на глубину.

Согласно тому же «принципу подобия» глубину подсчета прогнозных ресурсов целесообразно выбирать пропорционально величине \sqrt{P} в условиях одинаковых значений k и уровня эрозионного среза генетически однотипных объектов.

Последнее условие — пропорциональность H и P нарушается при пологих падениях рудных тел (рис. 62). Начиная с углов падения β^0 (относительно плоскости наблюдения) менее 20° — 25° , видимая продуктивность остаточного ореола рассеяния существенно завышается и выбор глубины подсчета H без учета элементов залегания рудной зоны был бы ошибочным.

Посчеты Q_H по проведенной выше формуле соответствует величине геохимических ресурсов, в то время как часть металла в рудной зоне характеризуется содержаниями ниже бортового. Поэтому собственно прогнозные ресурсы в кондиционных рудах меньше Q_H и определяются зависимостью $Q_H^* = \alpha Q_H$ — где $\alpha < 1,0$ — поправочный множитель, учитывающий долю забалансовых руд в составе показателей площадной продуктивности оруденения. В практике величина α для конкретного месторождения поддается определению по данным опробования первых канав и скважин (см. 4.27). В общем случае, величина α зависит от генетического типа оруденения и возрастает с увеличением промышленного масштаба оруденения. Последнее вполне очевидно, поскольку запасы металла в первичном ореоле, образующего «оболочку» вокруг промышленной залежи, растут пропорционально второй степени ее линейных размеров, а запасы руд — пропорционально

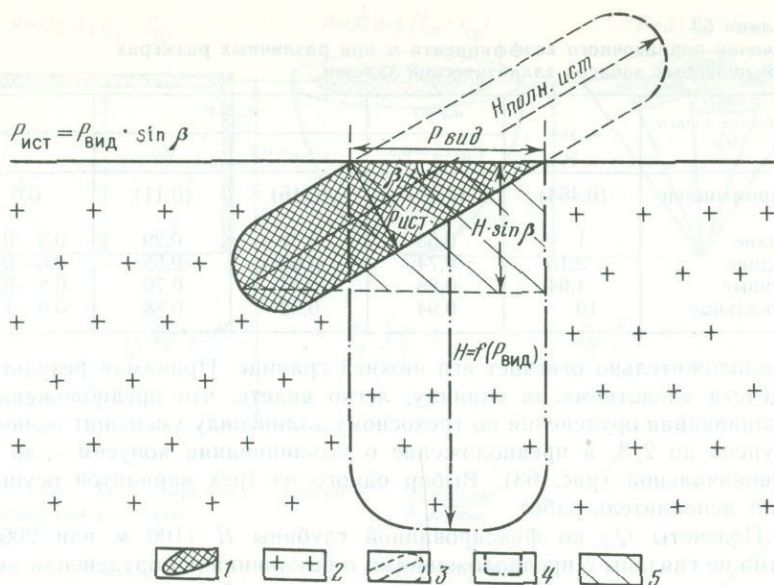


Рис. 62. Учет пологого падения залежи при оценке прогнозных ресурсов
 1 — рудная залежь; 2 — вмещающие породы; 3 — контур эродированной залежи; 4 — контур крутопадающего тела той же продуктивности $P_{\text{вид}}$; 5 — ресурсы, близкие к истинным

третьей степени. При этом делается вполне законное допущение, что эффективная ширина первичного ореола (протяженность интервала горных пород, в котором содержание металла изменяется от C_0 до $C_{\text{ф}} \epsilon^3$) не зависит от масштаба залежи, а только от ее генетического типа, проницаемости пород и свойств рудного элемента.

Указанную зависимость α от масштаба промышленных запасов в залежи, которая аппроксимируется эллипсом с полуосями a_p и $b_p = m a_p$, можно выразить аналитически:

$$\alpha = \frac{a_p^2}{(2a_p a_{\text{ор}} + a_{\text{ор}}^2 \bar{C}_{\text{ор}} / \bar{C}_p + a_p^2)},$$

где $(a_{\text{ор}} - a_p)$ и $b_{\text{ор}} - b_p = m(a_{\text{ор}} - a_p)$ ширина первичного ореола в направлении осей эллипса, \bar{C}_p и $\bar{C}_{\text{ор}}$ — средние содержания металла соответственно в рудах и первичном ореоле. Задаваясь различными значениями $a_{\text{ор}}$, a_p и $\bar{C}_{\text{ор}} / \bar{C}_p$, можно вычислить значения α для месторождений различной крупности. Некоторые результаты таких вычислений приведены в табл. 53. При этом от m величина α не зависит.

Значения $\alpha < 1,0$, приведенные в табл. 53, естественно, не являются единственными, при недостатке других данных допустимо пользоваться цифрами в интервалах указанных в последнем столбце. Таким образом, основная формула подсчета прогнозных ресурсов металла категорий P_2 имеет вид $Q_{\text{н}}^* = \alpha (P/40k) H$, где H и α выбираются по P_p , L и $Q_{\text{н}}$.

Дальнейшее уточнение величины $Q_{\text{н}}$ связано с рассмотрением характера выклинка оруденения, если выбранная глубина подсчета H

Таблица 53

Значения поправочного коэффициента α при различных размерах промышленных запасов эллиптической залежи

Условные запасы Q_H	a_p усл.	$a_{op}=1$		$a_{op}=2$		α округлены
		$C_{op}/C_p=0,3$	$\bar{C}_{op}/\bar{C}_p=0,2$	0,3		
Непромышленные	(0,464)	(0,27)	(0,16)	(0,11)		0,0
Мелкие	1	0,53	0,38	0,29		0,3—0,5
Средние	2,15	0,74	0,65	0,55		0,6—0,7
Крупные	4,64	0,88	0,83	0,76		0,8—0,9
Уникальные	10	0,94	0,92	0,88		0,9—1,0

предположительно отвечает его нижней границе. Принимая результаты подсчета «полотном» за единицу, легко видеть, что предположение о выклинивании оруденения по трехосному эллипсоиду уменьшит величину ресурсов до 2/3, а предположение о выклинивании конусом — до 1/3 первоначальной (рис. 63). Выбор одного из трех вариантов осуществляет исполнитель работ.

Подсчеты Q_H до фиксированной глубины H (100 м или 200 м) прямо не связаны с предположениями о выклинивании оруденения именно на этих глубинах. Независимо от этого и особенно при выборе H на основе принципа подобия необходим учет уровня эрозионного среза рассматриваемого рудного объекта, в зависимости от которого увеличивается или уменьшается величина H .

Принимая в условной метрике (см. 5.14) протяженность интервала промышленного оруденения от $z=0,2$ до $z=0,8$, имеем $H_i^* = H_{\text{полн.}} \frac{0,8 - z_i}{0,6}$, где z_i — уровень среза оцениваемого объекта и $H_{\text{полн.}}$ — полная протяженность его промышленного интервала. При подсчетах прогнозных ресурсов категории P_2 на стадии поисковых литохимических съемок масштаба 1:50 000 при недостатке данных о зональности оруденения допустимо принимать $z_i=0,5$ (среднее из возможных значений в интервале 0,2—0,8). При этом предполагается, что подсчеты ресурсов до указанных фиксированных глубин (100 м и 200 м) или до выбранных на принципе подобия не противоречат этому среднему эрозионному срезу.

При подсчетах прогнозных ресурсов категории P_1 по данным наземных литохимических съемок масштаба 1:10 000 или глубинных съемок масштаба 1:25 000 учет конкретного уровня эрозионного среза z_i обязателен.

В Инструкции по геохимическим поискам рудных месторождений [17] приведен график для выбора глубины H_i , основанный на принципе подобия (рис. 64). Входными данными для пользования этим графиком служат значения P_i^* , подсчитанные для интервала 0,2—0,8 с учетом множителя $1/k$, но до введения поправки $\alpha < 1,0$, т. е. с учетом ресурсов металла в первичном ореоле. Численные значения $P_{\text{мелк.}}$ и $H_{\text{мелк.}}$ выбираются исполнителем подсчетов на основе модели мелкого месторождения конкретного металла и генетического типа, отвечающего оцениваемому объекту [8].

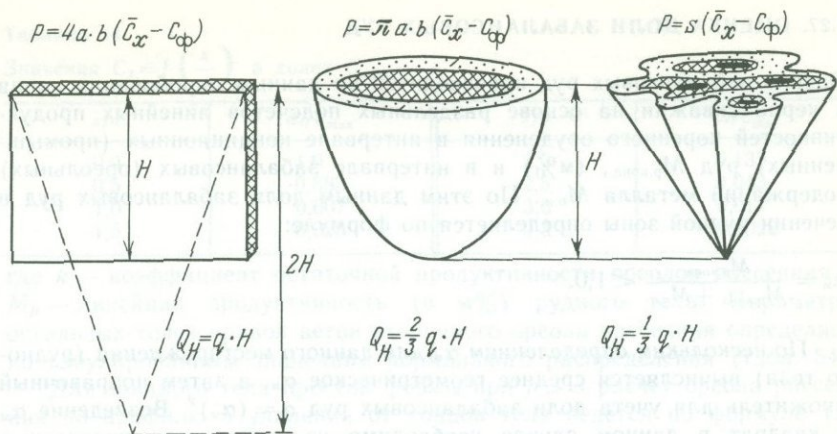


Рис. 63. Три варианта оценки прогнозных ресурсов

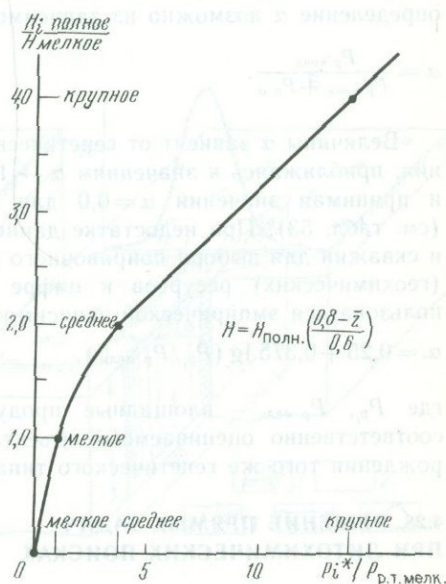


Рис. 64. График для оценки H_i в единицах $H_{\text{мелк.}}$ по величине $P_i/P_{\text{мелк.}}$

В итоге, основная форма подсчета прогнозных ресурсов категории P_1 имеет вид:

$$Q_H^* = \alpha \frac{P^*}{40k} H^*,$$

где P^* и H^* приняты на основе принципа подобия с учетом эрозионного среза конкретного объекта. В целом, подсчеты прогнозных ресурсов металлов при геохимических поисках требуют творческого подхода исполнителей и не должны рассматриваться как простое перемножение и деление величин.

4.27. ОЦЕНКА ДОЛИ ЗАБАЛАНСОВЫХ РУД

Оценка забалансовых руд производится по данным опробования канав и керна скважин на основе отдельных подсчетов линейных продуктивностей коренного оруденения в интервале кондиционных (промышленных) руд $M_{р.конт.}$ (м%) и в интервале забалансовых (ореольных) содержаний металла $M_{п.о.}$. По этим данным доля забалансовых руд в сечении рудной зоны определяется по формуле:

$$\alpha_m = \frac{M_{р.конт.}}{M_{р.конт.} + M_{п.о.}} < 1,0.$$

По нескольким определениям α_m для данного месторождения (рудного тела) вычисляется среднее геометрическое $\bar{\alpha}_m$, а затем поправочный множитель для учета доли забалансовых руд $\alpha = (\alpha_m)^2$. Возведение α_m в квадрат в данном случае необходимо из-за подсчета прогнозных ресурсов по параметрам площадной продуктивности оруденения. Прямое определение α возможно из зависимости:

$$\alpha = \frac{P_{р.конт.}}{P_{р.конт.} + P_{п.о.}}$$

Величины α зависят от генетического типа и масштаба месторождения, приближаясь к значениям $\alpha \rightarrow 1,0$ для уникальных месторождений и принимая значения $\alpha = 0,0$ для непромышленных рудопроявлений (см. табл. 53). При недостатке данных опробования горных выработок и скважин для выбора поправочного множителя α и перехода от общих (геохимических) ресурсов к цифре прогнозируемых ресурсов можно пользоваться эмпирической зависимостью:

$$\alpha_i = 0,25 + 0,375 \lg (P_{p_i} / P_{р.мелк.}),$$

где P_{p_i} , $P_{р.мелк.}$ — площадные продуктивности коренного оруденения соответственно оцениваемого объекта и мелкого (эталонного) месторождения того же генетического типа.

4.28. РЕШЕНИЕ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ ПРИ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

Решение прямых задач — это расчеты вторичных остаточных ореолов рассеяния по заданным характеристикам коренного оруденения и местным параметрам геохимического поля. В отличие от решений обратных задач (расчета ожидаемого оруденения по выявленным ореолам рассеяния, являющихся многозначными), прямые задачи имеют единственное решение.

Для крутопадающего тонкого рудного тела, подчиняющегося условию $p < 1,25\sigma$, где p — его полумощность и σ — местный коэффициент гипергенного рассеяния, имеем (за вычетом фона):

$$C_{\max} = \frac{kM_p}{\sigma \sqrt{2l}}$$

Таблица 54

Значения $C_x = f\left(\frac{x}{\sigma}\right)$ в долях C_{\max}

x/σ	C_x/C_{\max}	x/σ	C_x/C_{\max}
0,0	1,0	2,0	0,135
0,5	0,883	2,5	0,043
1,0	0,607	3,0	0,011
1,5	0,325	3,5	0,0022

где k — коэффициент остаточной продуктивности ореолов рассеяния и M_p — линейная продуктивность (в м%) рудного тела. Параметры остальных точек правой ветви вторичного ореола рассеяния определяем по табулированным значениям нормального распределения (табл. 54).

Для мощного тела простой формы при $\rho > \sigma$ расчет ореола рассеяния по профилю в удалении от концов тела ведется по формуле (за вычетом фона):

$$C_x = \frac{kC_p}{2} \left[\Phi\left(\frac{\rho+x}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{\rho-x}{\sigma}\right) \right],$$

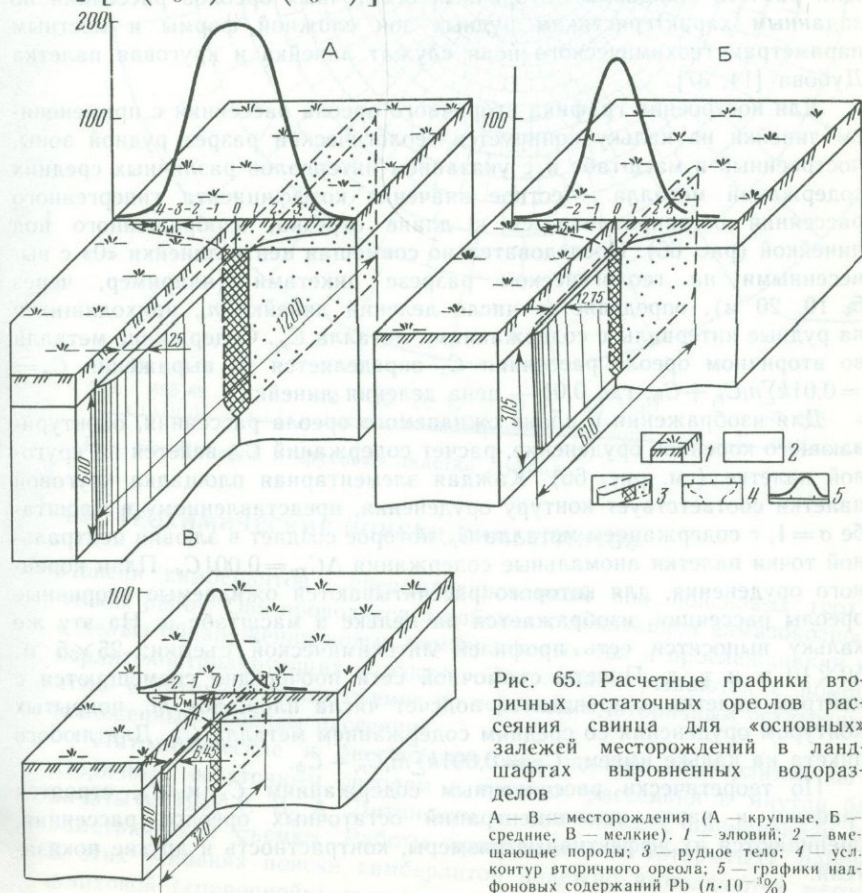


Рис. 65. Расчетные графики вторичных остаточных ореолов рассеяния свинца для «основных» залежей месторождений в ландшафтах выровненных водоразделов

А — В — месторождения (А — крупные, Б — средние, В — мелкие). 1 — элювий; 2 — вмещающие породы; 3 — рудное тело; 4 — усл. контур вторичного ореола; 5 — графики фоновых содержаний Рb ($n \cdot 10^{-4}\%$)

где $\Phi(u)$ — табулированные значения интеграла вероятностей для верхних пределов, стоящих в скобках, x — расстояние от центра ореола, в котором $C_x = C_{\max} = \frac{k\bar{C}_p}{\Phi(p/\sigma)}$ и \bar{C}_p — среднее содержание металла в рудах. Уже при $\left(\frac{p}{\sigma}\right) > 2$ имеем $C_{\max} \approx k\bar{C}_p$.

На рис. 65 показаны теоретические графики вторичных остаточных ореолов рассеяния для трех линзообразных залежей полиметаллических руд с запасами 1,0 млн, 100 тыс. и 10 тыс. т Рb, являющихся геометрическими фигурами подобия. Для случая А ореол рассеяния рассчитан по формуле для мощной залежи, для случая В — по формуле для тонкого рудного тела. Ореол рассеяния для случая Б рассчитан по обеим формулам, показавшим хорошую сходимость [36].

4.29. ЛИНЕЙКА И КРУГОВАЯ ПАЛЕТКА ДУБОВА

Для расчета ожидаемых вторичных остаточных ореолов рассеяния по заданным характеристикам рудных зон сложной формы и местным параметрам геохимического поля служат линейка и круговая палетка Дубова [14, 37].

Для построения графика вторичного ореола рассеяния с применением линейки на кальку копируется геологический разрез рудной зоны, построенный в масштабе σ с указанием интервалов различных средних содержаний металла. Местное значение коэффициента гипергенного рассеяния σ приравнивается к длине отрезка, изображенного под линейкой (рис. 66). Последовательно совмещая центр линейки «0» с вынесенными на геологическом разрезе пикетами (например, через 5, 10, 20 м), определяется число делений линейки n_i , приходящихся на рудные интервалы с содержаниями металла C_{p_i} . Содержание металла во вторичном ореоле рассеяния C_x определяется из выражения $C_x = 0,01k\sum n_i C_{p_i} + C_{\phi}$, где 0,01 — цена деления линейки.

Для изображения в плане ожидаемого ореола рассеяния, оконтуривающего коренное оруденение, расчет содержаний C_{xy} ведется по круговой палетке (см. рис. 66). Каждая элементарная площадка круговой палетки соответствует контуру оруденения, представленному в масштабе $\sigma = 1$, с содержанием металла C_p , которое создает в элювии центральной точки палетки аномальные содержания $\Delta C_{xy} = 0,001C_p$. План коренного оруденения, для которого рассчитываются ожидаемые вторичные ореолы рассеяния, изображается на кальке в масштабе σ . На эту же кальку выносятся сеть профилей литохимической съемки: 25×5 м; 50×10 м и т. д. Пикеты съемочной сети поочередно совмещаются с центром палетки и проводится подсчет числа площадок m_i , покрытых контуром оруденения со средним содержанием металла \bar{C}_{p_i} . Для любого пикета на кальке имеем: $C_{xy} = 0,001k\sum m_i C_{p_i} + C_{\phi}$.

По теоретически рассчитанным содержаниям C_x и C_{xy} строятся графики и карты изоконцентраций остаточных ореолов рассеяния, оцениваются их эффективные размеры, контрастность и другие показатели.

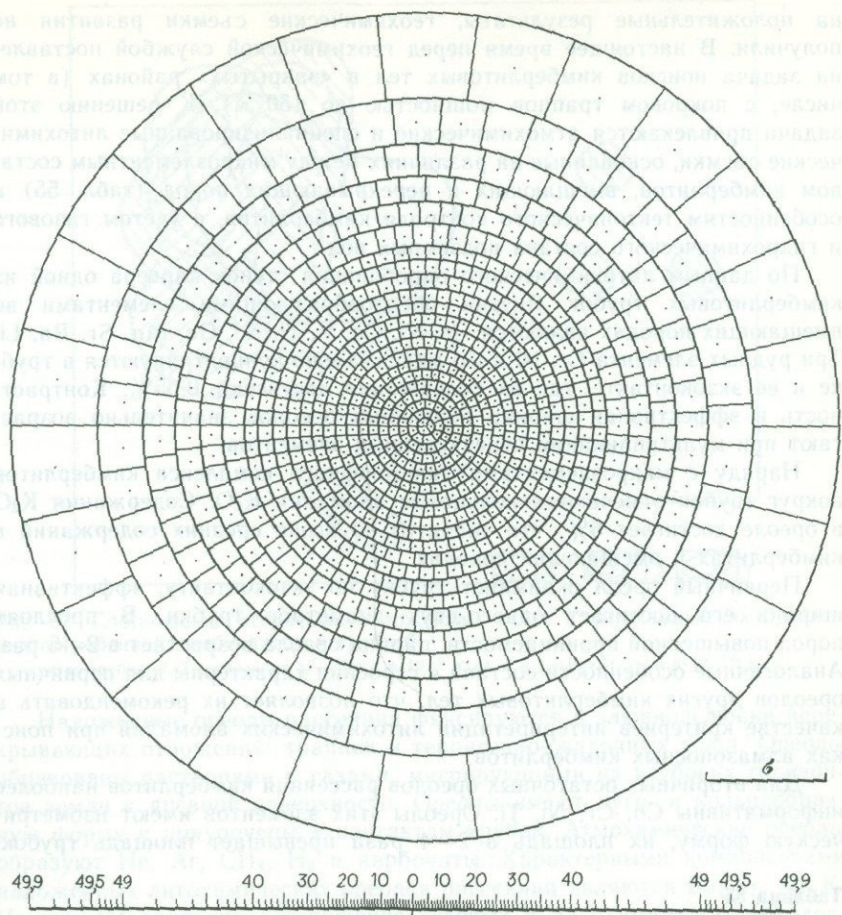


Рис. 66. Линейка и круговая палетка Дубова

4.30. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ КИМБЕРЛИТОВ

Поиски кимберлитов — специализированный вид поисковых геохимических работ. Они проводятся в районах с доказанной алмазонасностью с целью обнаружения новых кимберлитовых тел и прослеживания кимберлитоконтролирующих структур. Эти задачи решаются с помощью атмо- и литохимических съемок по первичным, вторичным остаточным и наложенным ореолам рассеяния.

Литохимические и биогеохимические поиски кимберлитов по их вторичным остаточным ореолам и потокам рассеяния в Якутии были начаты в 1957 г. В. А. Литинским, в том числе с применением кап-параметрической съемки. Работы проводились в «открытых» районах. В этих условиях поиски кимберлитов надежно выполняются методом шлиховой («пиропной») съемки и магниторазведки и потому, несмотря

на положительные результаты, геохимические съемки развития не получили. В настоящее время перед геохимической службой поставлена задача поисков кимберлитовых тел в «закрытых» районах (в том числе, с покровом траппов мощностью до 150 м). К решению этой задачи привлекаются атмосферические и специализированные литохимические съемки, основанные на различиях между микроэлементным составом кимберлитов, вмещающих и перекрывающих пород (табл. 55) и особенностям тектонического контроля кимберлитов, с учетом газового и гидрохимического состава подземных вод.

По данным литохимического опробования стенок карьера одной из кимберлитовых трубок Якутии ореолообразующими элементами во вмещающих породах являются Cr, Ni, Co, V, Ti, Sc, Ga, Mn, Sr, Ba, Li. Три рудных элемента Cr, Ni и Co максимально концентрируются в трубке и ее экзоконтакте, где их содержания достигают 0,05%. Контрастность и эффективная ширина первичных ореолов значительно возрастают при мультипликации перечисленных элементов.

Наряду с микроэлементами типоморфного комплекса кимберлитов вокруг трубок отмечаются кольцевые аномалии K_2O . Содержания K_2O в ореоле достигает 6%, что значительно выше средних содержаний в кимберлитах и вмещающих породах.

Первичный ореол окаймляет трубку по экзоконтакту, эффективная ширина его достигает одного-двух диаметров трубки. В прослоях пород повышенной проницаемости ширина ореола возрастает в 2—5 раз. Аналогичные особенности состава и строения характерны для первичных ореолов других кимберлитовых тел, что позволяет их рекомендовать в качестве критериев интерпретации литохимических аномалий при поисках алмазонасных кимберлитов.

Для вторичных остаточных ореолов рассеяния кимберлитов наиболее информативны Co, Cr, Ni, Ti. Ореолы этих элементов имеют изометрическую форму, их площадь в 2—4 раза превышает площадь трубок.

Таблица 55

Параметры распределения в кимберлитах, вмещающих карбонатных отложениях и траппах Якутии (в $\mu \cdot 10^{-3}\%$)

Химический элемент	Кимберлит		Терригенно-карбонатные породы		Траппы (базальты)	
	\bar{C}	$e^{\pm 1}$	\bar{C}	$e^{\pm 1}$	\bar{C}	$e^{\pm 1}$
Марганец	10,7	1,32	80,0	2,15	96,0	1,32
Никель	31,0	1,11	0,35	1,30	14,0	1,27
Кобальт	4,9	1,35	0,3	1,71	5,0	1,29
Титан	880,0	1,12	80,0	1,56	800,0	1,26
Хром	30,0	1,30	1,0	1,42	17,0	1,19
Ванадий	6,6	1,36	4,0	1,58	18,0	1,17
Медь	3,8	1,37	3,0	1,45	21,0	1,79
Цинк	6,5	1,44	5,0	1,16	6,0	1,18
Скандий	55,0	1,58	0,1	1,19	1,2	1,18
Бор	7,4	1,36	2,0	1,43	1,7	1,16
Фосфор	195,0	1,60	50,0	1,71	3,0	1,16
Стронций	67,0	1,42	35,0	1,16	4,0	1,41
Барий	47,0	1,52	20,0	1,15	1,0	—

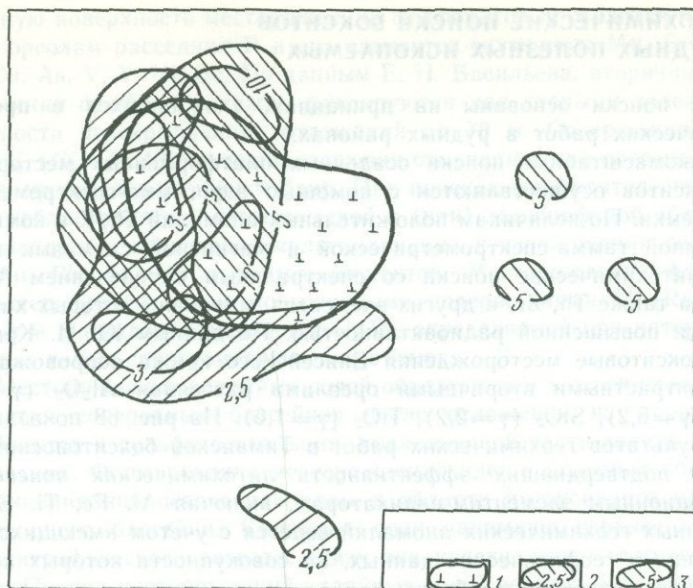


Рис. 67. Соотношение вторичных наложенных атмо- и литохимических ореолов над погребенной кимберлитовой трубкой

1 — контур трубки; 2, 3 — изолинии (2 — He в $\mu\text{л}\cdot 10^{-6}$ мл/л, 3 — $1 = \text{Ba}\cdot\text{Sr}/\text{Ti}^2$ в $\mu\cdot 10^{-1}\%$)

Наложённые ореолы рассеяния фиксируются в элювиоделювии перекрывающих отложений: траппов и терригенно-осадочных толщ. Ореолы образованы растворами и газами, мигрирующими из глубоких горизонтов земли к дневной поверхности. Ореолы имеют дуго- и кольцеобразную форму и приурочены к контактам трубок. Атмохимические ореолы образуют He, Ag, CH_4 , H_2 и карбонаты. Характерными компонентами наложенных литохимических ореолов рассеяния являются Ba, Sr, Sc, K. На рис. 67 показано соотношение газовых и литохимических ореолов.

На открытых территориях поиски трубок ведется по вторичным остаточным ореолам рассеяния минералов-спутников (пиропы, хромшпинель и др.) и элементов-индикаторов кимберлитового магматизма. Рациональными масштабами литохимических съемок на открытых территориях являются 1:50000 — 1:25000.

В закрытых районах, где кимберлитовмещающие толщи перекрыты чехлом терригенно-осадочных пород и траппов, поиски трубок проводятся по наложенным (атмо- и литохимическим) ореолам рассеяния. Атмохимические съемки проводятся в масштабе 1:50000 — 1:25000 для выделения перспективных зон под детальные поиски. Литохимические съемки ориентированы на выявление наложенных ореолов рассеяния трубок. Они проводятся совместно с атмохимическими в масштабе 1:25000 — 1:10000.

Поиски кимберлитов по первичным ореолам проводятся бурением скважин по сети, рассчитанной на обнаружение первичных геохимических ореолов, окаймляющих кимберлитовые тела.

4.31. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ БОКСИТОВ И НЕРУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Данные поиски основаны на принципах, сложившихся в процессе геохимических работ в рудных районах.

Мелкомасштабные поиски осадочных платформенных месторождений бокситов осуществляются с помощью аэрогамма-спектрометрической съемки. По величинам положительных аномалий Th/K в комплексе с наземной гамма-спектрометрической и магнитной съемками проводятся литохимические поиски со спектральным определением Al, Fe, Ti, Ga, а также Th, Zr, и других элементов, минералы которых характеризуются повышенной радиоактивностью. По данным Ю. И. Кривопалова, бокситовые месторождения Енисейского кряжа сопровождаются слабоконтрастными вторичными ореолами рассеяния Al_2O_3 ($\gamma=3,2$), Fe_3O_4 ($\gamma=5,2$), SiO_2 ($\gamma=2,2$), TiO_2 ($\gamma=1,6$). На рис. 68 показан пример результатов геохимических работ в Тиманской бокситоносной провинции, подтвердивших эффективность литохимических поисков по нетрадиционным элементам-индикаторам, включая Al, Fe, Ti. Оценка выявленных геохимических аномалий ведется с учетом имеющихся геологических и геофизических данных, по совокупности которых прогнозируются бокситоносные объекты.

Геохимические поиски неглубоко залегающих и выведенных на

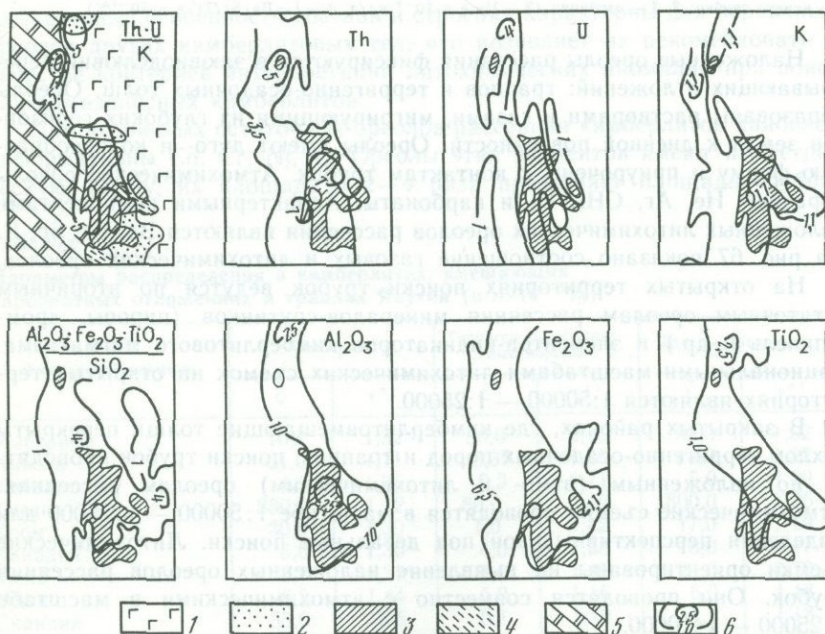


Рис. 68. Вторичные ореолы рассеяния месторождения бокситов

1 — покровные эффузивы; 2 — терригенно-осадочные породы; 3 — бокситы; 4 — глины; 5 — породы фундамента; 6 — вторичные ореолы рассеяния: Th, U — $\mu \cdot 10^{-4}\%$; K, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 — %; Th·U/K — $\mu \cdot 10^{-8}\%$

дневную поверхность месторождений фосфоритов проводятся по вторичным ореолам рассеяния Р и его элементов-спутников: Мп, Sr, Pb, Мо, Ti, Cu, As, V, Y, Ni, Be. По данным Е. Н. Васильева, вторичные ореолы рассеяния фосфора надежно фиксируются над слепыми залежами при мощности перекрывающих отложений до 70 м. Содержания P_2O_5 до 1—5% ($C_{\phi} = 0,04\%$) в элювиоделувии отмечались над слепыми залежами фосфоритов республики Заир. При поисках фосфоритов, находящихся в неблагоприятной геологической и (или) ландшафтной обстановках, рекомендуется проведение мультипликации и сглаживания содержаний Р, Мп, Pb, Sr, Мо и других элементов. Месторождения фосфоритов характеризуются также повышенными содержаниями U (Ra) до 5—20 г/т и аномальной величиной U/Th, определяемой при интерпретации данных гамма-спектрометрических съемок.

Месторождения калийных солей образуются в заключительную фазу развития солеродных бассейнов после отложения из морской воды карбонатов и сульфатов кальция, подавляющей части галита и сульфата магния. Формирование месторождений идет в условиях обособления и накопления остаточной рапы в области интенсивного прогибания солеродного бассейна. Калийные соли занимают верхнее положение стратиграфического разреза, снизу они подстилаются отложениями галита. Поиски месторождений калийных солей ведутся бурением и гидрохимическими методами путем опробования речных и подземных вод на их выходах на дневную поверхность (ключи, родники). Калий относится к числу умеренно активных и слабоподвижных водных мигрантов. Поисковым признаком месторождений калийных солей служит повышенная величина отношения Вг/Сl (более 15) и К/Вг (более 10) при содержаниях Сl более 150 г/кг.

Основной источник борного сырья — месторождения боратов, связанные с галогенными формациями и часто приуроченные к солянокупольным структурам. Бораты кристаллизуются на заключительной стадии сгущения морской рапы. Осаждение происходит из межкристаллизационного рассола в поровом пространстве соляного осадка (сульфат магния) на стадии его раннего диагенеза. По данным В. И. Борисенкова, для поисков месторождений боратов наиболее перспективны галогенные формации сульфатного типа, не содержащие глинистых прослоев. Признаком бороносности является увеличение вверх по разрезу соленосной толщи содержаний рассеянного В с достижением в зоне калийных солей концентраций бора, достигающих 0,7 г/кг. Промышленные скопления боратов наиболее вероятны в зоне перехода от горизонтов сульфатов магния к горизонтам хлоридных солей. Поиски месторождений ведутся бурением.

Месторождения боратов элювиального типа образуются при выветривании бороносных галогенных отложений, выведенных на дневную поверхность. Бораты малорастворимы и накапливаются в местах выхода эродируемых толщ. Наряду с В, выветрелая масса обогащается К, Ва, Sr и другими элементами. Мелкомасштабные геохимические поиски элювиальных месторождений боратов проводятся аэрогамма-спектральными съемками по К и Ra. Выделенные аномалии детализируются наземными гамма-спектральными и литохимическими съемками.

Поиски месторождений минеральных вод (бром-, йодсодержащих; металлоносных рассолов и др.) ведутся в платформенных и складчатых областях. Основным видом работ является гидрохимическая съемка, заключающаяся в опробовании водоносных горизонтов, вскрываемых гидрогеологическими скважинами.

Поиски газонасыщенных минеральных вод проводятся атмосферики съемками (3.14). Поисковыми признаками являются аномалии углекислого газа, гелия, водорода, метана и других газов в подпочвенном воздухе. Газовые ореолы позволяют выделять зоны дробления и смятия горных пород, в которых локализованы месторождения минеральных вод на глубинах до 600 м. Убедительные результаты получены А. И. Фридманом в районе Кавказских Минеральных Вод при поисках минеральных вод типа «Боржоми».

ГЛАВА 5

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СТАДИЯХ РАЗВЕДКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

5.1. ТИПЫ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Предварительная, детальная и эксплуатационная разведка и доразведка рудных месторождений, а затем их отработка сопровождаются проведением разнообразных геохимических исследований. Современные методы экспресс-анализа горных пород создали неограниченные возможности для геохимического опробования, стоимость которого на 1 п/м канав, подземных выработок или скважин не превышает 0,01—1,0% затрат на их проходку. В результате опробования обнаруживаются интервалы рудной минерализации, включая промышленные руды, недоступные для визуального распознавания. Горная выработка или скважина, неопробованная на всю длину от устья до забоя, не может считаться задокументированной. Имеются в виду любые методы современного опробования, включая классический пробоотбор, контактное геофизическое опробование и геохимический каротаж при бескерновом бурении.

Сплошное геохимическое опробование на стадиях разведки месторождений подчинено решению двух основных задач.

1. Детальная геохимическая характеристика каждого промышленного разведываемого и эксплуатируемого месторождения с целью повышения эффективности проводимых на нем горных работ [18, 19], а также создания обобщенных геохимических моделей главнейших генетических типов рудных месторождений (см. 5.2.— 5.8) для их применения в практике геохимических поисков.

2. Выявление резервов оруденения в пределах рудного поля конкретного месторождения, в том числе на его флангах и глубоких горизонтах, путем обнаружения слепых рудных тел по их первичным геохимическим ореолам.

Решение первой задачи связано с изучением минералого-геохимических особенностей, первичной зональности, формы рудных тел и их первичных ореолов, околорудных метасоматитов и других геохимических характеристик месторождений, определяющих их генетическую и рудоформационную принадлежность на основе существующих классификаций [35, 39]. В свою очередь, результаты геохимических исследований служат уточнению прогнозных оценок и пересмотра сложившихся представлений о процессах рудоотложения.

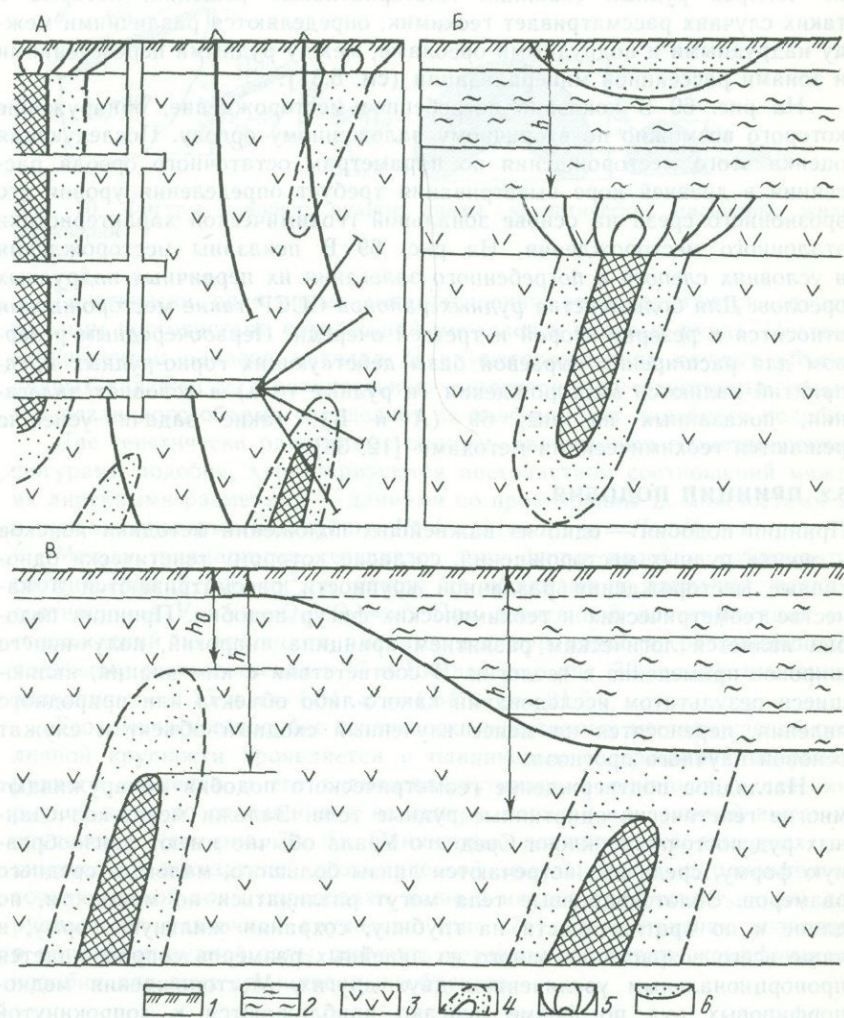


Рис. 69. Типы поисковых геохимических задач

1 — элювиальных; 2 — осадочный чехол; 3 — вмещающие породы; 4 — рудные тела и их первичные ореолы; 5, 6 — вторичные ореолы (5 — остаточные, 6 — наложенные)

Типы поисковых задач, решаемых геохимическими методами на стадиях разведки месторождений, схематически показаны на рис. 69. Левая верхняя часть рисунка (А) соответствует решению первой задачи — объемному, многогоризонтному геохимическому опробованию хорошо разведанного рудного тела, характеристика которого служит геохимическим эталоном при поисковых работах.

Опробование керна скважин поисково-разведочного наземного и подземного бурения отвечает второй задаче — поиски скрытого оруденения путем оценки непромышленного оруденения, встреченного в трех из четырех рудных скважин. Альтернативные решения, которые в таких случаях рассматривает геохимик, определяются различиями между надрудными и подрудными ореолами, между рудными пересечениями и зонами рассеянной минерализации (см. 5.31).

На рис. 69 Б показано погребенное месторождение, обнаружение которого возможно по вторичному наложенному ореолу. Последующая оценка этого месторождения по параметрам остаточного ореола рассеяния в древней коре выветривания требует определения уровня его эрозионного среза на основе зональной геохимической характеристики эталонного месторождения. На рис. 69 В показаны месторождения в условиях слепого и погребенного залегания их первичных надрудных ореолов. Для большинства рудных районов СССР такие месторождения относятся к резерву второй и третьей очереди. Первоочередным резервом для расширения сырьевой базы действующих горно-рудных предприятий являются месторождения (и рудные тела) в условиях залегания, показанных на рис. 69 (А и Б); такие задачи успешно решаются геохимическими методами [12, 36].

5.2. ПРИНЦИП ПОДОБИЯ

Принцип подобия — одно из важнейших положений методики поисков и оценки рудных месторождений, согласно которому генетически однотипные месторождения различной крупности рассматриваются в качестве геометрических и геохимических фигур подобия. Принцип подобия является логическим развитием принципа аналогий, получившего широкое применение в геологии. В соответствии с ним знания, являющиеся результатом исследований какого-либо объекта или природного явления, переносятся на менее изученный сходный объект и служат основой научного прогноза.

Наглядное подтверждение геометрического подобия обнаруживают многие генетически однотипные рудные тела. Залежи медно-колчеданных руд восточного склона Среднего Урала обычно имеют линзообразную форму, среди них встречаются линзы большого, малого и среднего размеров. Золото кварцевые тела могут различаться по мощности, по длине и по протяженности на глубину, сохраняя жильную форму, и чаще всего возрастание одного из линейных размеров сопровождается пропорциональным увеличением двух других. Месторождения медно-порфириновых руд по форме нередко приближаются к «опрокинутой чаше», различаясь размерами. Геометрическими фигурами подобия являются пластовые и штокверковые месторождения различной крупности (рис. 70).

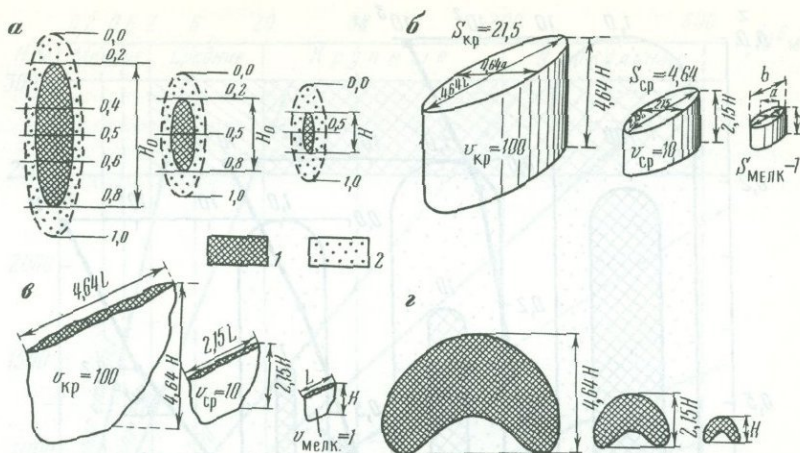


Рис. 70. Фигуры подобия: рудные линзы, эллиптические цилиндры, жилы, штокверки

Генетически однотипные месторождения характеризуются относительным постоянством содержаний металлов в рядовых рудах. Поэтому эквивалентом запасов металла Q в месторождениях служат объемы рудных залежей V . Сравнительную характеристику однотипных объектов различного объема определяет их коэффициент линейного подобия.

Две генетически однотипные залежи, являющиеся геометрическими фигурами подобия, характеризуются постоянством соотношений между их линейными размерами — длинами по простиранию L , мощностями $2a$ и протяженностями на глубину H : $L_1 : L_2 = a_1 : a_2 = H_1 : H_2 = \kappa$.

Между площадными сечениями двух фигур подобия соблюдается соотношение $S_1 : S_2 = \kappa^2$, а между их объемами и запасами металла соотношения $V_1 : V_2 = Q_1 : Q_2 = \kappa^3$. При десятичной классификации месторождений по крупности имеем для фигур подобия, различающихся по объему соответственно в 10 и 100 раз (см. рис. 70, а и в); численные значения $\kappa = 2,15$ и $\kappa = 4,64$; $\kappa^2 = 4,64$ и $\kappa^2 = 21,5$.

Геохимическое подобие генетически однотипных месторождений различной крупности проявляется в одинаковых содержаниях основного рудного элемента и его элементов-спутников в одинаковых сечениях рудной зоны по отношению к ее центру, верхней или нижней выклинке оруденения (см. рис. 70, б). Одинаковые величины безразмерных геохимических показателей геохимической зональности ν в одноименных точках рудной зоны определяют разный наклон графиков $\nu_z = f(z)$ для рудных тел различной крупности (рис. 71). Этот признак позволяет в интервале рудной зоны получать независимые оценки коэффициента подобия для двух сравниваемых объектов:

$$\kappa_{\omega} = \operatorname{tg} \omega_1 : \operatorname{tg} \omega_2; \kappa_M = M_1 : M_2; \kappa_P = \sqrt{P_1 : P_2}.$$

Здесь ω_1, ω_2 — углы наклона графиков ν_z к горизонту, M_1, M_2 и P_1, P_2 — соответственно линейные (в м %) и площадные (в м² %) продук-

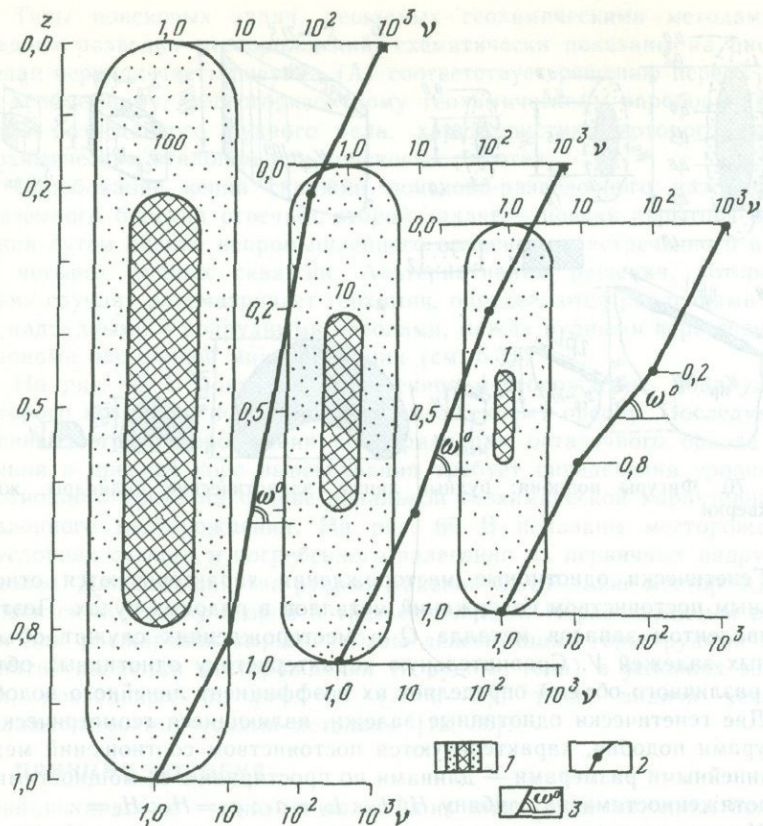


Рис. 71. Сечения генетически однотипных рудных линз

1 — рудное тело, первичный ореол; 2 — график $v_i = f(z)$; 3 — угол ω в рудном интервале

тивности. Если второй объект является эталонным и для него известны промышленные запасы металла $Q_{\text{эт}}$, принцип подобия позволяет решить основную задачу количественной интерпретации поисковых геохимических данных — оценить прогнозные ресурсы нового объекта согласно зависимости $Q_i = \bar{\kappa}^3 Q_{\text{эт}}$, где $\bar{\kappa} = \sqrt{\kappa_\omega \kappa_M \kappa_p}$. В данном случае для простоты сделаны предположения, что местные коэффициенты остаточной продуктивности $k_1 = k_2 = 1,0$ и уровни эрозионного среза оцениваемого и эталонного объекта одинаковы ($\bar{z}_i = \bar{z}_{\text{этал}}$). На основе принципа подобия решаются многие другие задачи при геохимических поисках.

5.3. ФОРМЫ РУДНЫХ ТЕЛ И ЗАПАСЫ РУД

Формы литохимических аномалий в плане, контуры рудных полей месторождений и отдельных залежей наилучшим образом аппроксимируются эллипсами с различными размерами полуосей. Трехосный эллипсоид с полуосями a , b , c позволяет формализовать любые рудные

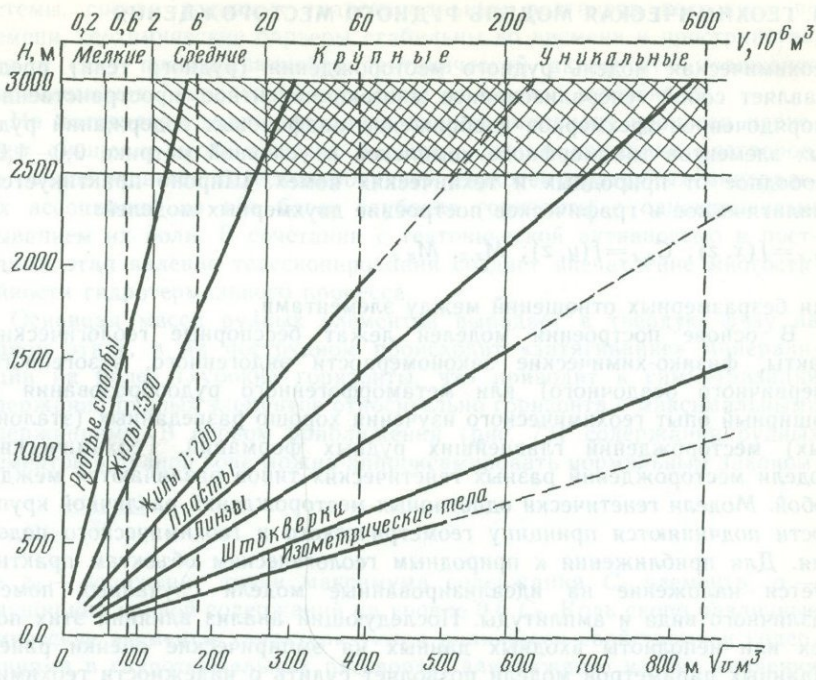


Рис. 72. Рудные тела различной формы

тела простой формы: изометрические ($a=b=c$), линзообразные, пластовые, жильные ($a \ll b, c$), где $2a$ — горизонтальная мощность крутопадающих залежей, $2b$ — их протяженность по простиранию и

$2c$ — протяженность по падению. На координатной плоскости ($\sqrt[3]{V}, 2c$) любой форме залежей соответствует своя прямая линия, на которой лежат все фигуры подобия данной формы (рис. 72). Здесь V — объемы залежей в m^3 и $2c=H$ в м — полная протяженность залежей на глубину (на момент их формирования). Очевидно, что для однотипных месторождений их объемы пропорциональны запасам металла Q . Прямые имеют различный наклон к оси абсцисс и достигают интервала «крупные месторождения» при различных значениях $2c$. Такая модель подтверждает наиболее выгодную штокверковую, линзообразную и пластовую форму залежей, поскольку строго изометрические рудные тела больших размеров в природных условиях, по-видимому, не образуются. Одиночные жильные тела обычной мощности по объему горной массы редко достигают интервала $V_{\text{круп}}$ (только при значениях H , превышающих глубину, доступную для отработки в современных условиях). Крупные месторождения жильного типа нередко представлены многочисленными жилами (300 и более). В этих случаях геометрическое подобие однотипных месторождений различной крупности реализуется дважды: по размерам отдельных жил и по их числу (т. е. по размеру рудных полей и суммарным запасам руд).

5.4. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Геохимическая модель рудного месторождения (рудного тела) представляет собой генерализованное многокомпонентное, пространственно упорядоченное трехмерное изображение надфоновых содержаний рудных элементов типоморфного комплекса в условной метрике 0,0—1,0, свободное от природных и технических помех. Широко практикуется аналитическое и графическое построение двухмерных моделей:

$$C_{x,z} = f(x, z); C_{y,z} = f(y, z); M_{x,z}, M_{y,z}$$

или безразмерных отношений между элементами.

В основе построения моделей лежат бесспорные геологические факты, физико-химические закономерности эндогенного, экзогенного (первичного осадочного) или метаморфогенного рудообразования и обширный опыт геохимического изучения хорошо разведанных (эталонных) месторождений главнейших рудных формаций. Геохимические модели месторождений разных генетических типов различаются между собой. Модели генетически однотипных месторождений различной крупности подчиняются принципу геометрического и геохимического подобия. Для приближения к природным геологическим объектам практикуется наложение на идеализированные модели случайных помех различного вида и амплитуды. Последующий анализ влияния этих помех или неполноты входных данных на эмпирические оценки ранее заданных параметров модели позволяет судить о надежности геохимических характеристик изучаемых месторождений по имеющимся данным опробования.

Геохимические модели служат основой исследования первичной зональности месторождений, интерпретации аномалий, оценки прогнозных ресурсов при геохимических поисках, прогноза оруденения на глубину и реконструкции рудных интервалов, уничтоженных эрозией. Геохимические характеристики реальных месторождений сложнее их абстрактных моделей.

5.5. МОДЕЛЬ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Формирование гидротермальных рудных тел — процесс концентрации вещества из подвижной фазы на геохимических барьерах. Этот процесс можно разделить на три этапа: дорудный, рудный и пострудный. На дорудном этапе происходит становление гидротермальной системы, структурно-тектоническая подготовка рудоподводящих и рудовмещающих каналов, формирование состава гидротермального раствора, метасоматическая дорудная переработка вмещающих пород (окварцевание, альбитизация, хлоритизация, серитизация и т. д.) за счет привноса и перераспределения порообразующих элементов. На дорудном этапе положение геохимических барьеров (P , T , pH , Eh) неустойчиво во времени и пространстве, они смещаются по направлению движения гидротермальных растворов.

Для рудного этапа, как правило наиболее продолжительного, характерно стабильное, динамически устойчивое состояние гидротермальной

системы, состав исходных гидротермальных растворов постоянен во времени, геохимические барьеры стабильны во времени и пространстве, хотя в силу продолжающейся тектонической активности положение рудовмещающих каналов может время от времени изменяться.

На пострудном этапе затухания гидротермального процесса происходит смещение геохимических барьеров против движения растворов, что сопровождается телескопированием низкотемпературных минеральных ассоциаций на все более глубокие горизонты с одновременным убыванием их роли. В сочетании с тектонической активностью в пострудный этап явление телескопирования создает впечатление многостадийности гидротермального процесса.

Основная масса рудных элементов выпадает в твердую фазу на рудном этапе, а на пострудном происходит «затягивание» минерализации на более глубокие горизонты, что приводит к симметризации содержаний рудных элементов относительно горизонта с максимальными содержаниями. В первом приближении (рис. 73) содержания рудных элементов в рудной зоне можно аппроксимировать нормальным законом:

$$C_z = C_0 e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma^2}},$$

где z_0 — положение точки максимума содержания C_0 элемента, σ — полуширина кривой содержаний на уровне $0,6 C_0$. Коль скоро различные химические элементы характеризуются различными свойствами и содержаниями в гидротермальных растворах, для каждого из них значения C_0 , z_0 и σ будут различными, т. е. неизбежно зональное строение рудных тел и их первичных ореолов. В частности, на рис. 73 рудное тело основного рудного элемента сопровождается над- и подрудным первичным ореолом различного элементного состава.

При определении обстановки в минерализованной зоне на некотором интервале содержание химического элемента достигает «насыщения» (на этом интервале $C_z = C_0 = \text{const}$), а выше и ниже этого интервала изменение содержаний элемента может быть в первом приближении аппроксимировано экспоненциальной зависимостью (рис. 74):

$$C_z = C_0 e^{-\lambda(z-z_0)}.$$

По такому же закону изменяется содержание элемента вкrest простирания рудной зоны. Параметр $1/\lambda$ имеет смысл подвижности элемента и зависит как от его свойств, так и от состава и свойств среды миграции. Различия λ предопределяют зональное строение рудных зон, в том числе вкrest их простирания. Обобщенная по литературным данным [14, 33, 35] картина распределения рудных и сопутствующих элементов вкrest простирания жильной зоны приведена на рис. 75, причем в силу недостаточной изученности подрудных интервалов контуры зон выноса элементов на этих горизонтах показаны в какой-то мере условно, хотя их существование установлено однозначно. Масса рудных элементов в зоне привноса ($C_z > C_\phi$) несоизмеримо больше их массы, вынесенной из локальных подрудных ореолов выноса, т. е. источник рудного вещества должен располагаться за пределами рисун-

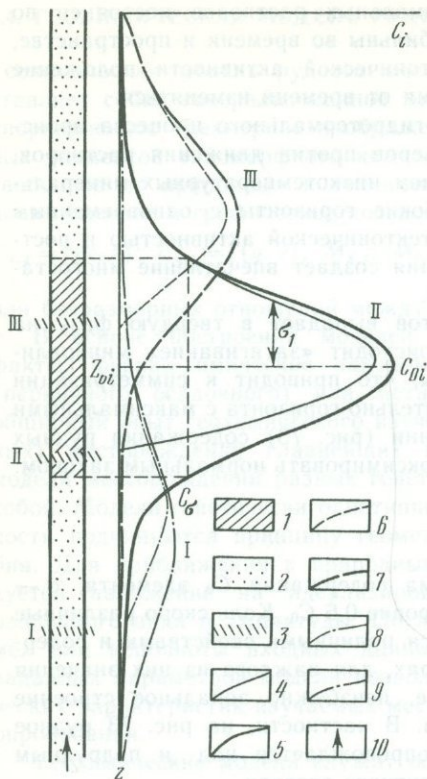


Рис. 73. Идеализированные графики содержаний рудных элементов в гидротермальной рудной зоне

1 — рудное тело по основному элементу ($C_i \geq C_0$); 2 — первичный ореол; 3 — геохимические барьеры для надрудного (III), основного рудного (II) и подрудного (I) элементов; 4—5 — графики содержаний элементов рудного этапа; 6—9 — графики интегральных содержаний элементов дорудного и порудного этапов; 10 — направление движения гидротерм

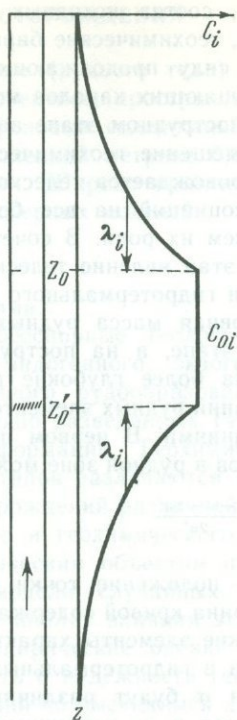


Рис. 74. Идеализированный график содержаний рудных элементов в гидротермальной рудной зоне при наличии постоянного интервала

ка, на значительно большей глубине и быть несоизмеримо больше.

Так, если источником рудного вещества служат рассеянные в земной коре элементы, и в гидротермальные растворы переходит порядка 0,5 кларка элемента, то для формирования рудного тела, соответствующего по запасам мелкому месторождению $Q_{\text{мелк.}} = 10^6 C_k$ т объем пород, из которых произошло выщелачивание элементов должен быть равен:

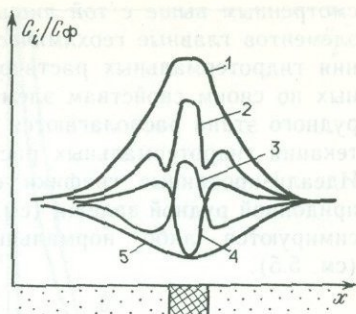
$$V \delta 0,5 C_k 10^{-2} = 10^6 C_k.$$

Принимая $\delta = 2,5 \text{ т/м}^3$, получаем

$$V = 8 \cdot 10^7 \text{ м}^3 \approx (430 \text{ м})^3.$$

Если рассматривать жильную зону в плоскости сечения (см. рис. 75) и принять среднее содержание рудных элементов в зоне привноса равным $10\sqrt{C_k}$, то соотношение площадей привноса и выноса равно.

Рис. 75. Идеализированные графики содержаний химических элементов на разных горизонтах вкрест простирания рудной зоны
1—5 — различные сечения рудной зоны



$$0,5C_k S_{\text{выноса}} = 10\sqrt{C_k} S_{\text{привноса}}, \text{ или } S_{\text{выноса}}/S_{\text{привноса}} = 20/\sqrt{C_k}.$$

Для рудных элементов с $C_k \approx 10^{-4}\%$ это соотношение равно 2000.

5.6. МОДЕЛЬ ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Эта модель, в частности, характеризует медно-колчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения, формирование которых связано с подводной вулканической деятельностью (типа наблюдаемой в современных рифтовых зонах). Принципиальным отличием этой модели (рис. 76) является центробежное растекание гидротермальных растворов в главной зоне рудоотложения в придонной части водоема. В рудоподводящем канале процесс рудообразования сходен с рас-

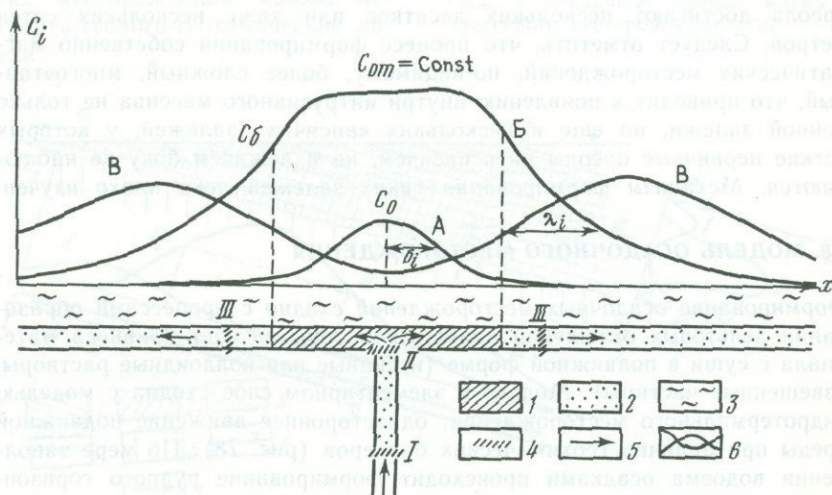


Рис. 76. Идеализированные графики содержаний рудных элементов в вулканогенно-осадочном месторождении

1 — рудное тело по основному рудному элементу; 2 — первичный ореол рудного тела; 3 — придонный слой морской воды; 4 — геохимические барьеры для подрудного (I), основных рудных (II) и надрудного (III) элементов; 5 — направление движения гидротерм; 6 — графики средних содержаний рудных элементов А, Б, В в придонной линзообразной рудной залежи

смотренным выше с той лишь разницей, что для большинства рудных элементов главные геохимические барьеры приурочены к месту смешения гидротермальных растворов с морской водой. Для резко различных по своим свойствам элементов устойчивые геохимические барьеры рудного этапа располагаются в подводющем канале, либо на пути растекания гидротермальных растворов в придонном слое морской воды. Идеализированные графики содержаний элементов в линзообразной придонной рудной залежи (см. рис. 76), в первом приближении аппроксимируются либо нормальным, либо экспоненциальным законами (см. 5.5).

5.7. МОДЕЛЬ МАГМАТОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

К типичным магматогенным объектам относятся сульфидные медно-никелевые, хромитовые, титаномагнетитовые, платиновые и апатитовые месторождения, приуроченные к придонным частям материнских интрузий. Отщепление рудного вещества обусловлено процессами ликвации или кристаллизационной дифференциации магматических расплавов, а формирование рудных залежей и их первичных ореолов — дифференциацией рудных частиц различной плотности в гравитационном поле Земли.

Н. И. Сафронов показал [33], что распределение элементов в первичном ореоле донной рудной залежи аппроксимируется экспоненциальным законом (рис. 77), причем параметр $1/\lambda$ для различных элементов пропорционален плотности рудных частиц. Так, для медно-никелевых месторождений $1/\lambda_{Cu} < 1/\lambda_{Ni}$, размеры зонального первичного ореола достигают нескольких десятков или даже нескольких сотен метров. Следует отметить, что процесс формирования собственно магматических месторождений, по-видимому, более сложный, многоэтапный, что приводит к появлению внутри интрузивного массива не только донной залежи, но еще и нескольких «висячих» залежей, у которых четкие первичные ореолы ни в висячем, ни в лежащем боку не наблюдаются. Механизм формирования таких залежей пока плохо изучен.

5.8. МОДЕЛЬ ОСАДОЧНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Формирование осадочных месторождений сходно с процессами образования дельтовых отложений прибрежной зоны за счет привноса материала с суши в подвижной форме (истинные или коллоидные растворы, взвешенные частицы). Модель в элементарном слое сходна с моделью гидротермального месторождения: одностороннее движение подвижной среды при наличии геохимических барьеров (рис. 78). По мере заполнения водоема осадками происходит формирование рудного горизонта, согласного или секущего слоистость осадочной толщи (см. рис. 78). Вкрест напластования толщи также наблюдается при этом зональное распределение элементов. Эта простейшая модель соответствует устойчивому во времени положению коренного ложа и уровня поверхности морского бассейна. При ином режиме осадконакопления (трансгрессив-

ном или регрессивном) картина может отличаться от представленной на рис. 78.

Во многих случаях в пострудный этап формирования месторождения проявляются процессы метаморфизма, с которыми связано перераспределение рудных элементов в рудных телах и их первичных ореолах. Если при этом не происходит миграция вещества на значительные расстояния и наблюдаются лишь процессы перекристаллизации, локальная концентрация рудных элементов в трещинах и пустотах, то общая картина распределения рудных элементов мало изменится и характер первичной зональности минерализованной зоны не будет нарушен.

В отличие от этого типично метаморфогенные месторождения с мобилизацией рудного вещества и его перемещением на большие расстояния характеризуются особой картиной зональности. Для этих месторождений можно построить геолого-геохимические модели.

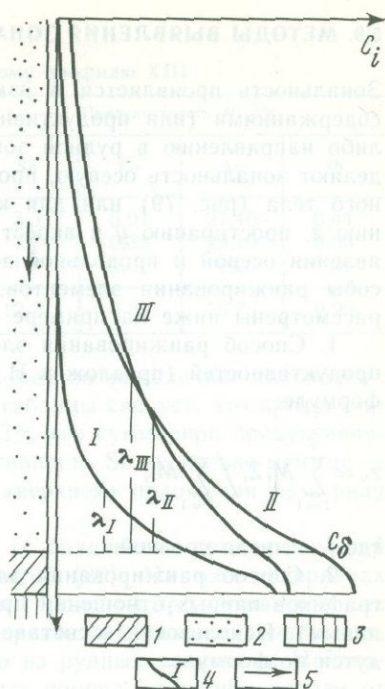


Рис. 77. Идеализированные графики содержаний рудных элементов в первичном ореоле магматогенного месторождения [33]

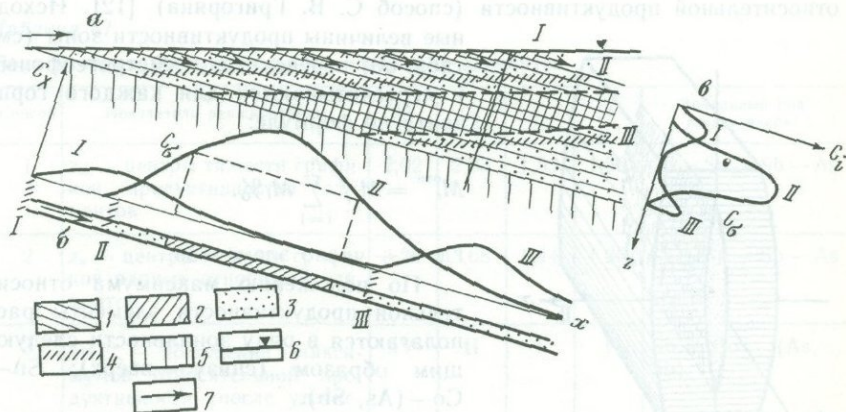


Рис. 78. Идеализированный разрез (а) и графики содержаний рудных элементов по слоистости (б) и вкост слоистости (в) осадочного месторождения: 1 — рудоносная осадочная толща; 2 — содержания основного рудного элемента; 3 — первичный ореол рудного горизонта; 4 — геохимические барьеры надрудного (I), основного (II) и подрудного (III) элементов; 5 — подстилающие породы; 6 — уровень моря; 7 — направление рудоносного стока с суши

5.9. МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗОНАЛЬНОСТИ ОРУДЕНЕНИЯ

Зональность проявляется в изменении соотношений между средними содержаниями (или продуктивностями) рудных элементов по какому-либо направлению в рудной зоне. В зависимости от направления выделяют зональность осевую, продольную и поперечную вдоль осей рудного тела (рис. 79) или для крутопадающих рудных тел — по падению z , простиранию y и вкрест простирания рудного тела x . Для выявления осевой и продольной зональности используют различные способы ранжирования элементов, из которых наиболее употребляемые рассмотрены ниже на примере оловорудной зоны Ягодной (табл. 56).

1. Способ ранжирования элементов по центрам тяжести графиков продуктивностей (предложен Н. Н. Сочевановым). Расчеты ведутся по формуле:

$$z_m = \frac{\sum_{i=1}^j M_i Z_i}{\sum_{i=1}^j M_i},$$

где j — число уровней.

2. Способ ранжирования элементов по средним центрам тяжести графиков парных отношений продуктивностей (предложен А. В. Гараниным). Использован в составе программы «НЮ-2» [36]. Расчеты ведутся по формуле

$$Z_v = \frac{\sum_{i=1}^j v_i z_i}{\sum_{i=1}^j v_i},$$

где $v = M_1/M_2$.

3. Способ ранжирования элементов по положению максимума их относительной продуктивности (способ С. В. Григоряна) [12]. Исходные величины продуктивности зоны (см. табл. 56) переводятся в «метрогеофоны» и пересчитываются для каждого горизонта по формуле:

$$M_i^{\text{отн.}} = M_i / \sum_{i=1}^{\kappa} M_i \%,$$

где κ — число элементов.

По положению максимума относительной продуктивности элементы располагаются в ряду зональности следующим образом (снизу — вверх): Sn—Co—(As, Sb).

Максимумы As и Sb оказались на одном горизонте и совпадение максимумов всегда будет наблюдаться, если число элементов больше числа горизонтов опробования. Разделение их может

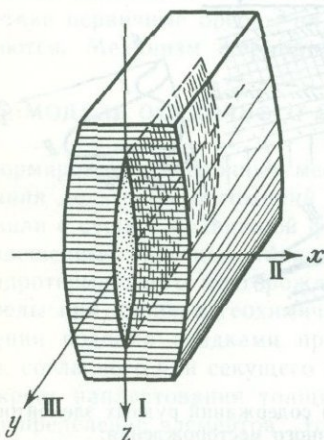


Рис. 79. Направления зональности рудных месторождений

Таблица 56

Продуктивность зоны Ягодной по разведочному профилю XIII

Вскрывающая выработка	Отметка z		Продуктивность M, м%			
	абс., м	усл. горизонт	Sn	Co	As	Sb
Скв. 16	925	I-1	3,3	0,01	27,40	0,44
Шт. 2	850	II-2	7,1	0,33	29,10	0,50
Шт. 1	700	IV-4	1,8	0,01	0,25	0,01
ΣM	—	—	12,2	0,35	56,75	0,95

быть проведено путем ранжирования элементов по величине накопления на горизонте совпадения. Из исходной таблицы следует, что продуктивность As на горизонте I составляет 48,3% его суммарной продуктивности по всем трем горизонтам, а продуктивность Sb несколько меньше — 46,3%, что позволяет говорить о более «верхнем» положении As в ряду зональности.

4. Способ ранжирования элементов по градиентам продуктивностей рудной зоны (способ Е. М. Квятковского) [20]. На всех интервалах опробования рудной зоны определяются градиенты продуктивности как отношения продуктивностей верхнего горизонта к нижнему (например, M_I/M_{II} , M_I/M_{IV} , M_{II}/M_{IV}) для каждого из рудных элементов. Найденным значениям присваиваются ранговые номера (в нашем случае от I до 4). Положение элемента в зональном ряду определяется по сумме мест, присвоенных каждому из элементов.

В табл. 57 приведено сопоставление рядов зонального отложения рудных элементов, полученных каждым из четырех способов (снизу вверх).

Таблица 57

Зона Ягодная. Ряды зонального отложения элементов

Способ	Показатель ранжирования	Sn	Co	As	Sb	Зональный ряд (снизу вверх)
1	z_0 — центры тяжести графиков продуктивностей элементов	2,02	2,03	1,53	1,56	Co—Sn—Sb—As
2	z_0 — центры тяжести графиков парных отношений элементов	3,23	3,68	1,44	1,80	Co—Sn—Sb—As
3	$z_{M_{\max}}^{\text{отн}}$ — положение максимумов относительной продуктивности (после уточнения)	IV	II	I	I	Sn—Co—(As, Sb) Sn—Co—Sb—As
4	ΣN_i — градиенты вертикальной продуктивности элементов, сумма мест на горизонтах	5	4	12	9	Co—Sn—Sb—As

Эти данные подтверждают близость результатов, полученных различными способами, наиболее четко ранжируются элементы по второму способу.

Для выявления рядов поперечной зональности также предложено несколько способов ранжирования элементов, вид которых зависит от положения горизонта опробования в рудной зоне.

5.10. РЯДЫ ЗОНАЛЬНОГО ОТЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Различия в миграционной способности (подвижности) химических элементов в процессах рудообразования определяют существование зональных рядов их отложения. Для гидротермальных месторождений детальное описание закономерностей зональной смены минеральных ассоциаций по направлению падения температуры и глубины впервые дал в 1924 г. В. Эммонс. Предложенный им ряд зонального (снизу вверх) отложения рудных элементов ($\text{Sn} - \text{W} - \text{As} - \text{Bi} - \text{Au}_1 - \text{Cu} - \text{Zn} - \text{Pb} - \text{Ag} - \text{Au}_2 - \text{Sb} - \text{Hg}$) неоднократно подвергался критике, но в настоящее время не вызывает сомнений; все последующие данные его только дополняли и уточняли. Примерами зональности экзогенного рудообразования являются известные триады Страхова, характеризующие условия гумидного ($\text{Al} - \text{Fe} - \text{Mn}$) и аридного ($\text{Cu} - \text{Pb} - \text{Zn}$) литогенеза, а также последовательная смена селеновой минерализации урановой в месторождениях зоны пластового окисления [27]. Геохимическую зональность рудных месторождений изучали Н. И. Сафронов, А. Д. Каблуков и Г. И. Вертелов, Г. И. Росман, С. В. Григорян, А. П. Соловов, Э. Н. Баранов, Е. М. Квятковский и многие другие.

А. А. Сауков впервые обратил внимание на важное поисковое значение ртути, которая благодаря своим халькофильным свойствам и высокой летучести формирует надрудные первичные ореолы сульфидных месторождений различных металлов. Расширяя представления об индикаторной роли легко подвижных элементов, Н. И. Сафронов указал на существование надрудных первичных ореолов галоидных элементов (в частности, йода). Последующие исследования В. З. Фурсова, Н. А. Озеровой, М. А. Лаппа, Б. А. Судова, Н. Н. Трофимова, А. И. Рычкова и других подтвердили правильность этих представлений. Наиболее полно вертикальная зональность гидротермальных сульфидных месторождений освещена в работах С. В. Григоряна и Л. Н. Овчинникова [2, 12]. В результате сравнительного изучения более 300 месторождений различных рудных формаций авторами предложен обобщенный ряд вертикальной зональности отложения элементов (снизу вверх): $\text{W}_1 - \text{Be} - \text{As}_1 - \text{Sn}_1 - \text{Au}_1 - \text{U} - \text{Mo} - \text{Co} - \text{Ni} - \text{Bi} - \text{W}_2 - \text{Au}_2 - \text{Cu}_1 - \text{Zn} - \text{Pb} - \text{Sn}_2 - \text{Ag} - \text{Cd} - \text{Au}_3 - \text{Cu}_2 - \text{Hg}, \text{As}_2, \text{Sb} - \text{Ba}$. Индексы 1, 2, 3 при символах химических элементов означают, что в зональном ряду они могут занимать различное положение в зависимости от минеральных форм. В частности, As_1 соответствует нахождению As в форме арсенопирита, а As_2 — в виде более низкотемпературного аурипигмента или блеклых руд, в которых содержание As может превышать 20%. Положение Sn_1 определяется отложе-

нием Sn в форме касситерита, а Sn₂ — более низкотемпературного станнина и т. д. Обобщенный зональный ряд имеет статистический характер, поскольку в каждом конкретном месторождении, в зависимости от его рудно-формационной принадлежности, наблюдаются те или иные инверсии без существенного нарушения общей последовательности. Приведенный ряд можно дополнить сверху такими легколетучими элементами как Tl, J; определенные места в нем могут занять Th, TR, Sr, Li, F. Из ореолов многих месторождений возможен вынос Fe с образованием зон осветления, а также элементов группы железа: Ti, V, Cr, Sc и др. («ореолы выноса»).

Геохимически зональность понятие векторное, поэтому в зависимости от направления рассматриваются три основных типа зональности (см. рис. 79). Осевая зональность проявляется в направлении движения рудоносных растворов и в случае крутопадающих рудоносных зон совпадает с вертикальной. Продольная зональность отражает зональное строение рудоносных зон по их простиранию, а поперечная — вкрест простирания. Для рудных тел субгоризонтального залегания осевая и продольная зональности совпадают с горизонтальной, а поперечная — с вертикальной (в случае согласного развития ореолов).

Осевая зональность рудоносных зон наиболее важна как в теоретическом, так и в практическом отношении. Во избежание повторений осевая зональность в дальнейшем изложении называется просто «зональностью», а продольная и поперечная — отмечены специально.

Особого внимания заслуживает геохимическая зональность крутопадающих рудных зон, имеющая решающее значение при оценке уровня эрозионного среза рудопоявлений. Для этой цели служат коэффициенты геохимической зональности, выбор которых производится на основе рядов зонального отложения химических элементов. Наиболее важны в практическом отношении элементы-индикаторы зональности оруденения, максимально удаленные друг от друга в рядах последовательности отложения. Отношения средних содержаний (или продуктивностей) подобных пар элементов характеризуются значительным градиентом по вертикали, а следовательно, высокой надежностью их практического применения.

В табл. 58 приведены ряды зонального отложения элементов-индикаторов, в которых слева направо происходит смена подрудных элементов надрудными. Приведенные данные подтверждают идентичность рядов зональности месторождений близких по составу рудных формаций. Это имеет большое практическое значение, позволяя применять для интерпретации геохимических аномалий единые показатели зональности.

Обращает на себя внимание «необычное» расположение Си в рядах зональности стратиформных месторождений. Здесь, в отличие от остальных месторождений Си занимает более высокие уровни — выше Pb и Ag. В рудах месторождения Сумсар, например, Си в основном содержится в блеклых рудах. На месторождениях, где Си представлена халькопиритом, в ряду зонального отложения элементов она располагается значительно левее (перед Zn).

Таблица 58

Ряды осевой зональности элементов-индикаторов различных рудных месторождений [17]

Тип месторождений	Ряды зонального отложения основных элементов-индикаторов (снизу вверх)
Медно-никелевые Кольского района Норильского района	Co — Ni — Cu — Zn — Pb — (Ag, Ba) Co — Ni — Cu — (Ag, Mo) — Ba — Pb — (Ti, Sn, Zr)
Редкометалльные пегматиты	W — Nb — Na — Sn — Cs — Rb — Li — As
Вольфрамовые скарново-шеелитовые грейзеновые кварц-гюбнеритовые кварц-шеелитовые	W — Ba — Sn — (Bi, Mo) — Zn — (Pb, Ag) Be — Sn — Bi — W — (Zn, Pb, Cu) Bi — (Sn, Be) — Co — W — Zn (W, Mo, Bi) — Be — Sn — Ag
Оловорудные кварц-касситеритовые сульфидно-касситеритовые	(As, Be, W) — B — Sn — Cu — (Zn, Ag, Pb) (W, Mo, As, Co) — (Zn, Cu) — (Zn, Ag, Pb)
Медноколчеданные	Mo — Co — As ₁ — Cu — Zn — Pb — Ag — As ₂ — Ba
Полиметаллические скарновые жильные	Sr — (W, Mo) — Co — Bi — Cu — Zn — Pb — Ag — (Sb, As) — Ba — I W — As ₁ — Sn — Co — Bi — Cu — Zn — Pb — Ag — As ₂ — Ba — I
Золоторудные высокотемпературные среднетемпературные низкотемпературные	(Be, W, Au, As ₁ , Ni, Co) — Cu — Zn — (Pb, Ag, As ₂ , Sb) (Co, W, B) — Bi — (Sn, Mo) — Cu — Au — Zn — Pb — (Ag, As, Sb) (W, Bi, Sn) — Mo — (Cu, Zn) — Pb — Au — Ag — (As, Sb) — Ba — Hg
Медно-порфировые	(B, W, Co, Sn) — (Mo, Cu) — Bi — Au — (Zn, Pb, Ag) — Sb — As — Ba — I
Медные (жильные)	Ni — Co — Bi — Cu — (Sn, Ag) — Zn — Pb — Ag — Ba — I
Урановые (настуран-сульфидной формации)*	Mo — Cu — Zn — Pb — Ag
Стратиформные свинцово-цинковые	Be — Ni — Co — Zn — Pb — Ag — Cu — As — Ba
Ртутные	(Bi, Mo) — Cu — Zn — Pb — Ag — (Hg, As, Sb)
Сурьмяно-ртутные	(Ni, Co, W) — Mo — Cu — Zn — Pb — Sn — Ag — (Sb, As) — Hg

Примечания: 1. Взаимоотношения элементов, заключенных в скобки, в ряду не установлены. 2. На месторождениях, отмеченных знаком *, изучен ограниченный круг элементов-индикаторов.

Эти данные подтверждают существование минеральной зональности, обусловленной сменой в пространстве различных минералов-носителей одних и тех же элементов. Проявлением минеральной зональности объясняется поведение As золоторудных месторождений, где интенсивные ореолы этого элемента выявлены как в верхних частях

рудной зоны, так и на глубоких горизонтах — на уровне выклинивания рудных тел, что связано с появлением на глубине арсенопирита, тогда как на верхних горизонтах As, по-видимому, входит в блеклую руду, а также в галенит и сфалерит, в которых содержание As достигает 0, n %.

В распределении W установлена отчетливая минеральная зональность. Если W шеелита постоянно появляется первым снизу в рядах зонального отложения элементов, то W вольфрамита и гюбнерита обычно развивается на более высоких уровнях рудоносных зон. Дифференциация элементов в пространстве по формам их нахождения не исчерпываются рассмотренными примерами. Моноэлементные контуры первичных ореолов рудного месторождения отчетливо характеризуются тяготением Co и W к нижним, а Mo, Ag и Pb — к верхним горизонтам рудной зоны. Наблюдающееся по скв. 524 (рис. 80) новое возрастание содержаний Ag, Pb и Zn позволяет предполагать существование на глубине второго эшелона оруденения.

Физико-математический анализ эндогенного ореолообразования позволил Р. И. Дубову, В. С. Голубеву и Е. М. Квятковскому предложить ряд аналитических зависимостей для простых физико-химических моделей [14, 20].

При фильтрации рудообразующего раствора вдоль ослабленной зоны при отсутствии диффузии:

$$\frac{\partial C_{ж}}{\partial T} + \frac{u C_{тв}}{\partial z} + \frac{\partial C_{тв}}{\partial T} = 0.$$

При диффузии вещества из раствора в слабопроницаемые боковые породы:

$$\frac{\partial C_{ж}}{\partial T} + \frac{\partial C_{тв}}{\partial T} - D \frac{\partial^2 C_{ж}}{\partial x^2} = 0,$$

где $C_{ж}$, $C_{тв}$ — концентрации рудного вещества соответственно в жидкой и твердой фазах; T — время, u — скорость потока, D — коэффициент диффузии, x — направления по нормали к стенкам рудной зоны, z — направление по падению рудной зоны.

Установлено, что в надрудных и подрудных первичных ореолах изменение содержаний элементов-индикаторов с глубиной (по вертикали) происходит по экспоненциальному закону:

$$C_z = C_0 e^{-\lambda z} + C_{\phi},$$

где C_0 — концентрация металла в точках $z=0$ в начале и в конце зоны насыщения; λ — параметр, характеризующий условия инфильтрационного рудоотложения, C_{ϕ} — фоновое содержание.

Благодаря экспоненциальному закону графики изменения по вертикали содержаний химических элементов в их первичных ореолах в полупологарифмическом масштабе представляют собой прямые линии. На рис. 81 приведены графики изменения по вертикали средних содержаний элементов-индикаторов скарново-полиметаллического месторождения Кансай (ТаджССР). В верхней части рисунка приведены

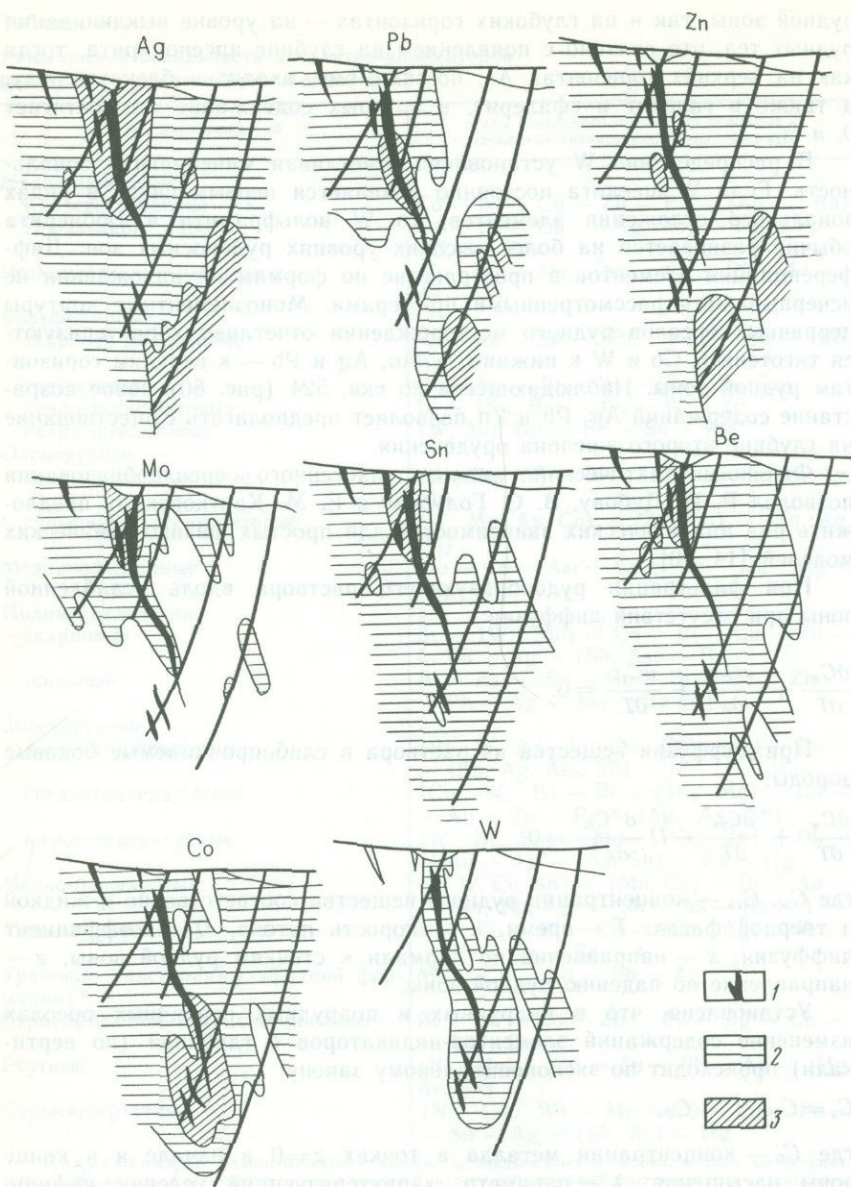


Рис. 80. Первичные ореолы рудного месторождения по данным опробования
 1 — рудное тело; 2—3 — содержания рудных элементов ($2 \geq C_{\phi\epsilon}$, $3 > C_{\phi\epsilon}^3$)

графики изменения содержаний элементов-индикаторов в надрудных ореолах слепого оруденения. Графики нижней части отражают характер изменения содержаний элементов-индикаторов в первичных ореолах, развитых на уровне рудного тела и ниже (подрудных ореолах).

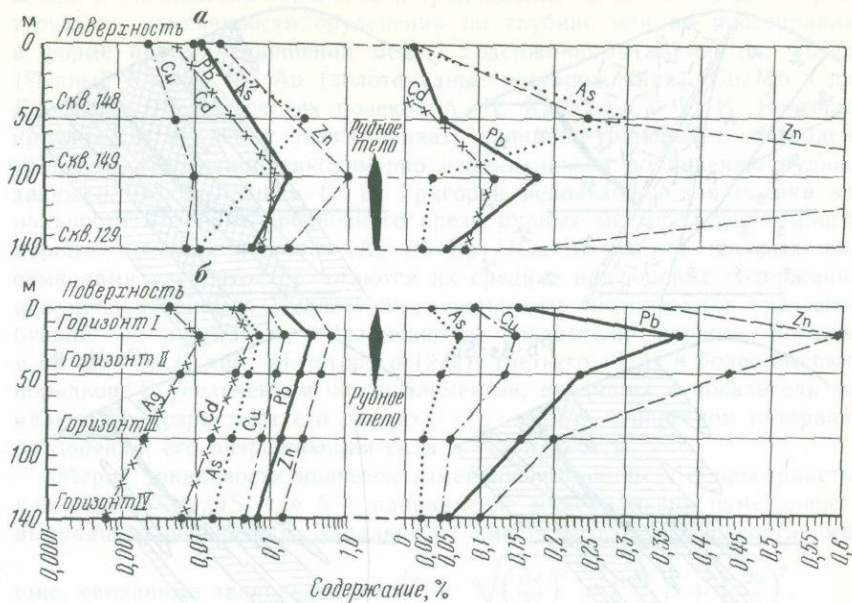


Рис. 81. Графики изменения средних содержаний элементов вокруг слепых и выходящих на поверхность рудных тел

На экспоненциальный характер изменения концентрации металла в околорудном ореоле (по мере удаления в стороны от рудного тела) впервые в 1948 г. обратил внимание Х. Моррис:

$$C_x = C_0 e^{-\lambda x} + C_\phi,$$

где C_0 — концентрация металла в точке $x=0$, λ — параметр, характеризующий диффузионное поступление металла в боковые породы, C_ϕ — фоновое содержание.

А. П. Соловов предложил использовать величину $1/\lambda$ в качестве оценки подвижности химических элементов околорудных ореолов, поскольку этот параметр численно соответствует средней величине пути, пройденного атомами химического элемента в процессе формирования ореола. Удовлетворительная аппроксимация графика распределения химического элемента вокруг рудного тела прямой линией (в полулогарифмической системе координат) представляет возможность определения величины $1/\lambda$. Очевидно, что $\text{ctg} \omega$ пропорционален величине миграционной способности элемента (ω — острый угол между прямой распределения элемента и осью x). Так как угол ω определяется также выбранным масштабом построения графика содержаний элемента, для определения значения подвижности элемента (в м) следует пользоваться формулой:

$$1/\lambda = \frac{Y}{\ln 10} \text{ctg} \omega = 0,434 Y \text{ctg} \omega,$$

где Y — принятый модуль десятичных логарифмов содержаний элементов, выраженный в линейной мере оси x .

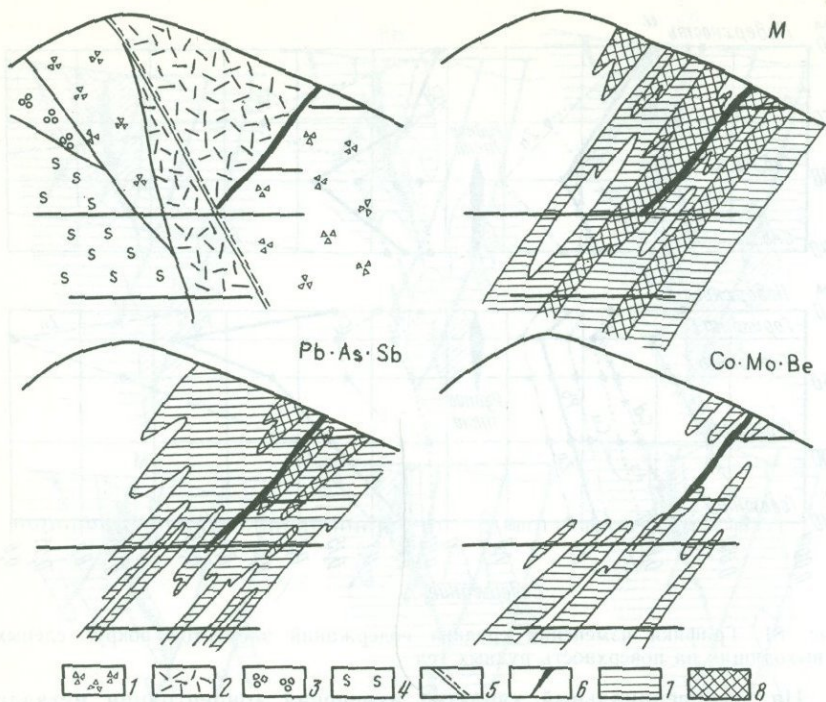


Рис. 82. Первичные геохимические ореолы в разрезе

1 — тектонические брекчи; 2 — дациты; 3 — листвениты; 4 — габброиды; 5 — разрывные нарушения; 6 — рудное тело; 7 — первичные ореолы; 8 — поля повышенных содержаний. М — общие мультипликативные ореолы

Наряду с моноэлементными первичными ореолами при геохимических поисках широко применяются различные модификации полиэлементных ореолов. Одной из разновидностей подобных ореолов являются мультипликативные. Последние оконтуриваются по результатам перемножения (в каждой пробе) содержаний группы элементов-индикаторов. С. В. Григорян предложил построение общих (для всех ассоциаций элементов-индикаторов) и частных (для отдельных групп элементов) мультипликативных ореолов.

На рис. 82 изображены общие и частные мультипликативные ореолы, оконтуренные в разрезе вокруг рудного тела ртутного месторождения Агятаг (АзербСССР). Частные мультипликативные ореолы построены для групп надрудных (Pb·As·Sb) и подрудных (Co·Mo·Be) элементов. Как видно на рис. 82, частные мультипликативные ореолы фиксируют геохимическую зональность оруденения.

5.11. ПОКАЗАТЕЛИ ЗОНАЛЬНОСТИ

Показатели зональности — безразмерные отношения между средними надфоновыми содержаниями (или продуктивностями) двух или нескольких химических элементов, закономерно изменяющиеся в контуре

объекта. Показатели зональности традиционно применялись для характеристики изменчивости оруденения по глубине или по простиранию в форме парных отношений между содержаниями элементов: Pb/Zn (Рудный Алтай), Ag/Au (золоторудные месторождения), Cu/Mo и др. Для целей геохимических поисков А. Д. Каблуков и Г. И. Вертепов предложили в 1960 г. рассматривать свинцово-урановые и молибден-урановые отношения, закономерно изменяющиеся по падению рудных залежей. В дальнейшем С. В. Григорян использовал для оценки зональности и уровня эрозионного среза рудных месторождений многомерные показатели типа $(Ag \cdot Pb \cdot Zn)/(Cu \cdot Bi \cdot Co)$, в которых под символами элементов понимаются их средние надфоновые содержания или продуктивности. Показатели зональности обозначаются греческой буквой ν , иногда K_z . Различаются показатели первого порядка $\nu=1$ хим. эл./1 хим. эл., второго (2/2), третьего (3/3) и более высоких порядков. С увеличением числа элементов, входящих в показатель зональности, возрастают его размах ($\nu_{\max} : \nu_{\min}$) в конкретном интервале оруденения, его разрешающая сила и устойчивость.

Мерой зональности является изменение величины ν в пространстве или $\text{grad } \nu = d\nu/dS$, где S — направление максимальной изменчивости выбранного показателя. Зональность имеет ортогональные составляю-

щие, связанные зависимостью:
$$\frac{d\nu}{dS} = \sqrt{\left(\frac{\partial \nu}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \nu}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \nu}{\partial z}\right)^2}.$$

Для характеристики зональности пригодны отношения между элементами, монотонно (однонаправленно) изменяющиеся по величине вдоль заданного направления. Общепринято показатели зональности представлять в форме, при которой их величина убывает с глубиной. Выбор этих показателей производится с учетом рядов зонального отложения элементов (см. 5.10), в том числе с применением ЭВМ (см. 5.12, 5.13). За пределами рудной зоны показатели зональности оруденения не существуют, приобретая формально значение 0:0.

5.12. ПРОГРАММА «НЮ-2»

Данная программа [36] предназначена для исследования первичной зональности рудных месторождений путем построения рядов зонального отложения химических элементов, автоматического отыскания общих для совокупности геологических разрезов монотонных геохимических показателей зональности ν , вычисления значений этих показателей и построения графиков их изменения по f опробованным уровням (горизонтам, сечениям) рудной зоны. Программа основана на обнаружении зональности оруденения путем анализа численных значений всех отношений между средними содержаниями (или продуктивностями) k рудных элементов от I до III порядка. Необходимость обращения к ЭВМ при этом обусловлена очень большим числом рассматриваемых отношений. Так, для 14 химических элементов число различных отношений между ними $N [(1/1) + (2/2) + (3/3)]$ приближается к 100 тыс. и, следовательно, при 11-12 опробованных уровнях оруденения, превышает 1 млн данных [36].

Входными данными для обработки по программе «НЮ-2» служат величины продуктивностей или средних надфоновых содержаний химических элементов типоморфного комплекса. При исследовании зональности жильных или пластовых залежей обычно используют продуктивности, а при анализе зональности прожилково-вкрапленных и штокверковых месторождений — средние геометрические содержания. Программой предусмотрен анализ одного или одновременно нескольких объектов, которыми считается совокупность упорядоченных в пространстве сечений рудного тела по смежным разведочным линиям или по генетически однотипным месторождениям.

Последовательность зонального отложения химических элементов, характеризующая объект, выявляется путем вычисления центров тяжести графиков парных отношений между содержаниями химических элементов и последующего их упорядочения по убыванию средних центров тяжести. Средние центры тяжести \bar{z} графиков парных отношений $v(i, j)$

вычисляются по формуле:
$$\bar{z}_j = \frac{1}{\kappa - j} \sum_{i=1}^{\kappa-1} \frac{f_i v_i}{\sum_{i=1}^{\kappa-1} v_i},$$

где κ — число химических элементов и f_i — номера опробованных уровней объекта (1, 2, ..., f или в условной метрике 0,0—1,0). Программа вычисляет ранговые коэффициенты корреляции между частными рядами зональности для объектов и его критическое значение на 5%-м пределе значимости. По сумме мест, занимаемых элементами в частных рядах, печатается общий зональный ряд отложения элементов. При неполном охвате рудной зоны уровнями геохимического опробования полученный ряд может существенно отличаться от истинного.

Основное назначение программы «НЮ-2» — выявление общих для изучаемых объектов геохимических показателей зональности v от I до III порядков, изменяющихся монотонно на всех опробованных интервалах оруденения. При большом числе объектов и уровней выявления общих строго монотонных показателей становится маловероятным. Для таких случаев по указанию пользователя программа снижает требования к монотонности, допуская ее нарушение на одном из уровней. Рассмотрение этих «условно монотонных» показателей позволяет корректировать входные данные. Помимо показателей зональности печатаются таблицы встречаемости элементов в числителе и знаменателе убывающих частных и общих показателей, характеризующие участие каждого химического элемента в зональности оруденения.

При исследовании зональности неизбежно появление случайно монотонных показателей, особенно для одиночных объектов с малым числом опробованных уровней. Вероятность случайной монотонности данного показателя при f опробованных уровней объекта определяется из выражения: $P = 2/f!$, где $f!$ — факториал числа уровней. Для композиции из m объектов вероятность появления случайно монотонных показателей снижается согласно зависимости

$$P_{\text{комп.}} = \frac{2}{j_1! \cdot j_2! \cdot j_3! \dots j_m!}$$

Это позволяет оценить ожидаемое общее число случайно монотонных показателей $N \cdot \Pi$, а затем по специальной номограмме (рис. 83) возможную реализацию их числа на 95% доверительном пределе. Можно считать, что зональность изучаемых объектов надежно установлена, если число выявленных монотонных показателей зональности превышает критическое число случайных: $N_{\text{выявл.}} > N_{\text{крит. 95\%}}$.

Итогом обработки геохимических данных по программе «НЮ-2» является выбор 8—10 геохимических показателей зональности (чаще всего I и II порядков), имеющих ясный геохимический смысл и достаточную контрастность. По их значениям производится оценка (таксация) рудных пересечений, встреченных одиночными скважинами или обнаруженных на поверхности. Результаты этой таксации выражаются в метрике хорошо изученных эталонных месторождений. Данные, полученные по программе «НЮ-2», могут служить входными данными для программы «НЮ-3» (см. 5.13).

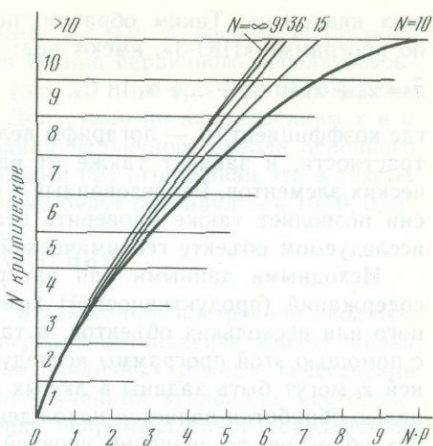


Рис. 83. Программа «НЮ-2»

5.13. ПРОГРАММА «НЮ-3»

Программа «НЮ-3» предназначена для отыскания наилучших показателей геохимической зональности оруденения, отличающихся высокой контрастностью и разрешающей силой. Эти требования эквивалентны условию линейности логарифма величины показателя зональности как функции глубины. На практике не всегда удается найти такие отношения между содержаниями (или продуктивностями) элементов, которые были бы достаточно линейны, особенно при большом числе опробованных уровней. Задачу можно облегчить, если не ограничиваться использованием только целых степеней, в которых содержания (продуктивности) входят в показатели геохимической зональности. Логарифм такого показателя (обобщенный показатель) зональности имеет вид:

$$\ln v = \alpha_1 \ln C_1 + \alpha_2 \ln C_2 + \dots + \alpha_k \ln C_k,$$

где C_j — содержание j -го химического элемента, α_j — соответствующая этому элементу степень (не обязательно целая).

В программе «НЮ-3» (Ю. В. Шваров) для различных сочетаний химических элементов строятся обобщенные показатели геохимической зональности, удовлетворяющие следующим условиям: 1) $\sum \alpha_j = 0$ (условие безразмерности); 2) значение показателя выражено в тех же единицах, что и глубина; 3) обобщенный показатель зональности дает наилучшую линейную аппроксимацию глубины в понимании метода наимень-

ших квадратов. Таким образом, показатели зональности, получаемые по программе «НЮ-3», имеют вид:

$$\tilde{z} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln C_1 + \dots + \alpha_k \ln C_k,$$

где коэффициент α_0 — логарифм величины, обратной коэффициенту контрастности, и зависит также от единиц измерения содержаний химических элементов. Реализованный в программе аппарат условной регрессии позволяет также проверить статистическую гипотезу о наличии в исследуемом объекте геохимической зональности указанного типа.

Исходными данными для программы «НЮ-3» являются значения содержаний (продуктивностей) химических элементов на f уровнях одного или нескольких объектов, а также значения z_i этих уровней. Если с помощью этой программы исследуется один объект, то значения уровней z_i могут быть заданы в любых единицах (например, в м). Если же целью обработки является нахождение показателей, общих для нескольких объектов, то значения уровней должны быть заданы в сопоставимых единицах. Наиболее удобна для этого условная метрика оруденения 0,0—1,0 (см. 5.14), так как значения обобщенных показателей зональности, полученные в этих единицах, не требуют дополнительного таксирования (см. 5.15).

5.14. УСЛОВНАЯ МЕТРИКА ОРУДЕНЕНИЯ

Признание геометрического и геохимического подобия генетически однотипных месторождений различной крупности позволило ввести в употребление условную метрику для обозначения расстояний между одноименными точками рудных тел и месторождений.

Таковыми точками для залежей любой формы и размера являются верхняя и нижняя границы выклинивания руд, центр рудной зоны, точки, ограничивающие рудное тело по простиранию или по мощности, фиксированные точки в контуре первичного ореола и друг. Учитывая постоянный пересмотр бортовых содержаний металлов, изменяющий промышленные размеры рудных залежей, в основу метрики положено расстояние между крайними точками первичного ореола основного (ценного) элемента залежи, принимаемое за единицу. Соответственно верхние выклинки первичных ореолов основного рудного элемента крутопадающих рудных тел обозначаются 0,0, центры залежей — 0,5 и нижние выклинки первичных ореолов — 1,0. Началам интервалов промышленных руд присвоено обозначение 0,2, нижним границам руд — 0,8. Для обозначения этих интервалов по оси z приняты следующие наименования [17]:

надрудный — от 0,00 до 0,20;

верхнерудный — от 0,20 до 0,40;

среднерудный — от 0,40 до 0,60;

нижнерудный — от 0,60 до 0,80;

подрудный — от 0,80 до 1,00.

Необходимо учитывать, что физическое равенство верхнего (0,0—0,2) и нижнего (0,8—1,0) интервала в конкретном месторождении может не соблюдаться.

Контур первичных ореолов легколетучих элементов-спутников в этой

метрике могут приобретать координаты $z < 0,0$, а ореолы подрудных элементов — $z > 1,0$. Для обозначения границ первичного ореола основного рудного элемента по мощности (ось x) и по простиранию залежи (ось y) принимается та же метрика. Допустимо по направлениям x и y принимать условную метрику для границ первичного ореола основного рудного элемента $\pm 0,5$ или $\pm 1,0$, каждый раз оговаривая это в тексте. В этом случае координаты центра залежи будут обозначаться $(0, 0, 0,5)$.

5.15. ТАКСИРОВАНИЕ РУДНЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ

На всех стадиях поисков и разведки, а также при построении сводных, обобщенных разрезов объектов универсальное значение имеет оценка (таксация) по геохимическим данным одиночных рудных пересечений путем их перевода в метрику хорошо изученных эталонных месторождений. Это особенно важно при оценке непромышленного оруденения, когда решается вопрос о его принадлежности к надрудным, убогим центральным или подрудным интервалам рудной зоны.

Не менее ответственной является оценка в метрике эталонного месторождения и промышленного оруденения на горизонте его обнаружения поисковыми скважинами или на современной поверхности, в том числе по вторичным ореолам рассеяния и интервалам окисленных руд. В последнем случае задача сводится к оценке уровня эрозионного среза месторождения, в числе других признаков определяющего его прогнозные ресурсы.

Оценка (таксирование) уровня оруденения проводится по показателям зональности v_z генетически однотипного эталонного месторождения. Для этого выбранные монотонно изменяющиеся показатели зональности изображаются графически в координатах $[\log v, z]$. По этим графикам численные величины v_i таксируемого сечения переводятся в значения z_i . Наиболее удобно величины z эталона выражать в условной метрике оруденения $0,0—1,0$. Если для этого нет достаточных данных, отсчет глубины ведется в относительных или абсолютных отметках или «уровнях» (горизонтах) эталонного месторождения. Те же оценки могут быть получены аналитически по формуле подобия треугольников:

$$z_i = a + (b - a) \frac{\lg(v_a/v_i)}{\lg(v_a/v_b)},$$

где a и b — отметки (или номера) двух уровней эталонного месторождения, между которыми (или вблизи которых) лежит z_i .

Определение уровня оруденения z_i недостаточно проводить по величине одного v , при этом остаются неизвестными сходимость и доверительные пределы оценок. Оценку следует вести по 8—10 различным v с подсчетом среднего арифметического \bar{z} и стандартного отклонения s , определяемого через размах значений: $s = \beta_n(z_{\max} - z_{\min})$, где β_n — табличный множитель, зависящий от числа определений n [17, 37]. Оценки уровней оруденения представляются в значениях $\bar{z} \pm s/\sqrt{n}$, где n — число использованных v . Величины доверительных интервалов $\pm s/\sqrt{n}$ характеризуют надежность оценок и служат одним из критериев генетической близости оцениваемого оруденения к эталонному месторождению. Оцен-

ки признаются удовлетворительными, если они лежат в пределах ± 50 м, при больших доверительных пределах целесообразно пересмотреть выбор эталона.

Для оценки уровня среза по характеристикам вторичных ореолов рассеяния (см. 4.22) абсолютные значения геохимических показателей зональности $v_i = P(M_p)_I / P(M_p)_{II}$ подлежат умножению на поправочный коэффициент

$$k_{v_i} = Pk_{II} / Pk_I,$$

где Pk — произведение соответствующих коэффициентов остаточной продуктивности k для группы элементов, образующих числитель (I) и знаменатель (II) безразмерного показателя зональности v_i .

5.16. ДВУХМЕРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Это один из наиболее простых и наглядных способов графического изображения геохимических характеристик и диагностики сходных объектов обеспечивает рассмотрение близких по составу рудных объектов в координатной плоскости двух геохимических показателей v с одновременным участием до 8 и более химических элементов. Выбор показателей по координатным осям осуществляется на основе представлений о рудно-формационных типах и первичной зональности рассматриваемой группы объектов.

Для сравнительной характеристики эндогенных разведанных месторождений и сходных с ними рудных объектов с неясной оценкой обычно выбираются показатели геохимической зональности v II порядка. Числитель показателей формируют химические элементы низко- и среднетемпературной ассоциаций, знаменатель — средне- и высокотемпературной. В показателях v_x и v_y не должно быть одинаковых элементов. При удачном выборе геохимические показатели в своих численных значениях отражают сумму условий рудообразования и служат чувствительным индикатором той «температуры», при которой формировалось то или иное месторождение. В данном случае под «температурой» процесса понимается общая тенденция в смене условий рудоотложения.

На рис. 84 приведен пример сопоставления полиметаллических месторождений различных рудно-формационных типов в координатной плоскости геохимических показателей $v_x = (\text{Sb} \cdot \text{Hg}) / (\text{Pb} \cdot \text{Zn})$ и $v_y = (\text{Ag} \cdot \text{Ba}) / (\text{Cu} \cdot \text{Mo})$ [24]. При наличии характерных различий рассматриваемые месторождения объединены в контуре эллипса рассеяния в зависимости от численных величин показателей v_x и v_y . Для разведанных месторождений на рисунке показаны положения нескольких пересечений по падению рудной зоны, соединенных в этом случае прямой линией. Одновременное уменьшение с глубиной величин обоих геохимических показателей свидетельствует о зональности объектов. Особенности размещения свинцово-цинковых месторождений на двухмерной диаграмме отражают общую тенденцию к относительному обогащению руд стратиформных месторождений «низкотемпературными» элементами (Hg, Sb, Ag, Ba) по сравнению с вулканогенными колчеданно-полиметаллическими месторождениями (Zn, Cu, Mo).

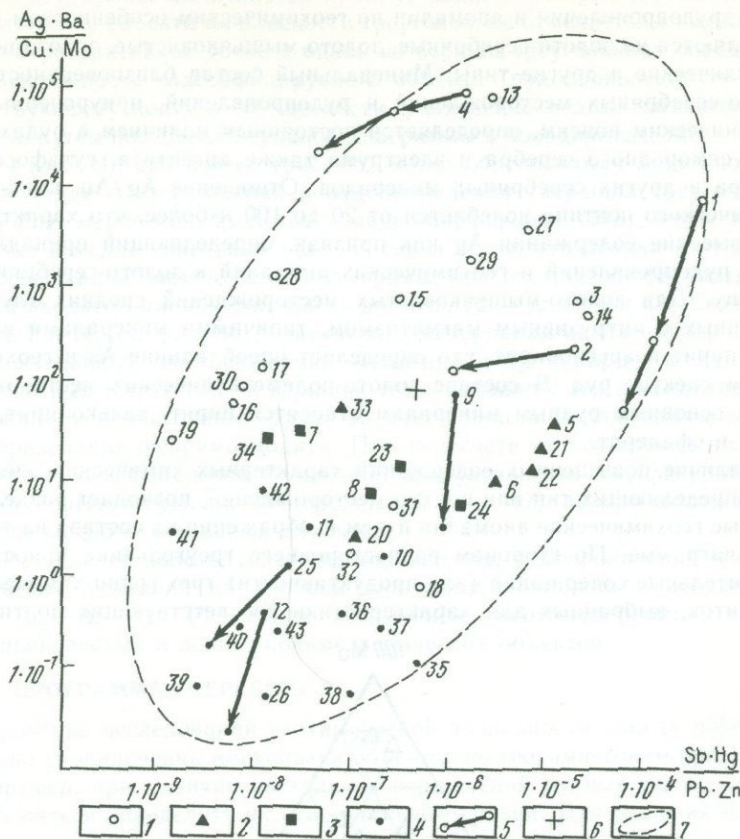


Рис. 84. Геохимическая диаграмма полиметаллических месторождений [24]
 1—4 — месторождения (1 — стратиформиные, 2 — гидротермальные, 3 — скарновые, 4 — колчеданные);
 5 — изменение геохимических показателей с глубиной; 6 — точка среднего состава месторождений;
 7 — эллипс рассеяния

5.17. ТРЕХМЕРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Для геохимической характеристики месторождений, рудопроявлений и связанных с ними литохимических аномалий конкретного металла удастся выбрать элементы-индикаторы, определяющие их принадлежность к конкретным типам или подтипам в данной группе объектов. Среди медных объектов медно-молибденовой и медно-порфировой формаций определяющим элементом является Mo, молибденит относится к основным рудным минералам. Руды медно-полиметаллических месторождений, помимо пирита и халькопирита, содержат галенит и сфалерит, что позволяет отнести Pb и Zn к числу элементов, повышенные содержания которых определяют этот генетический подтип. В составе руд медно-колчеданных и медно-никелевых месторождений заметную роль играют, в первом случае, Zn и Co, во втором — Ni и Co. Золоторудные месторож-

дения, рудопроявления и аномалии по геохимическим особенностям подразделяются на золото-серебряные, золото-мышьяковистые, золото-полиметаллические и другие типы. Минеральный состав близповерхностных золото-серебряных месторождений и рудопоявлений, приуроченных к вулканическому поясам, определяется постоянным наличием в рудах помимо самородного серебра и электрума также аргента, сульфосолей серебра и других серебряных минералов. Отношение Ag/Au для этого генетического подтипа колеблется от 20 до 100 и более, что характеризует высокие содержания Ag как признак, определяющий принадлежность рудопоявлений и геохимических аномалий к золото-серебряному подтипу. Для золото-мышьяковистых месторождений средних глубин, связанных с интрузивным магматизмом, типичными минералами являются пирит и арсенопирит, что определяет преобладание As в геохимическом спектре руд. В составе золото-полиметаллических месторождений к основным рудным минералам относятся пирит, халькопирит, галенит и сфалерит.

Наличие повышенных содержаний характерных химических элементов, определяющих тип или подтип месторождений, позволяет разделять сходные геохимические аномалии путем изображения их состава на тройной диаграмме. По сторонам равностороннего треугольника наносятся относительные содержания (или продуктивности) трех групп химических элементов, выбранных для характеристики соответствующих подтипов.

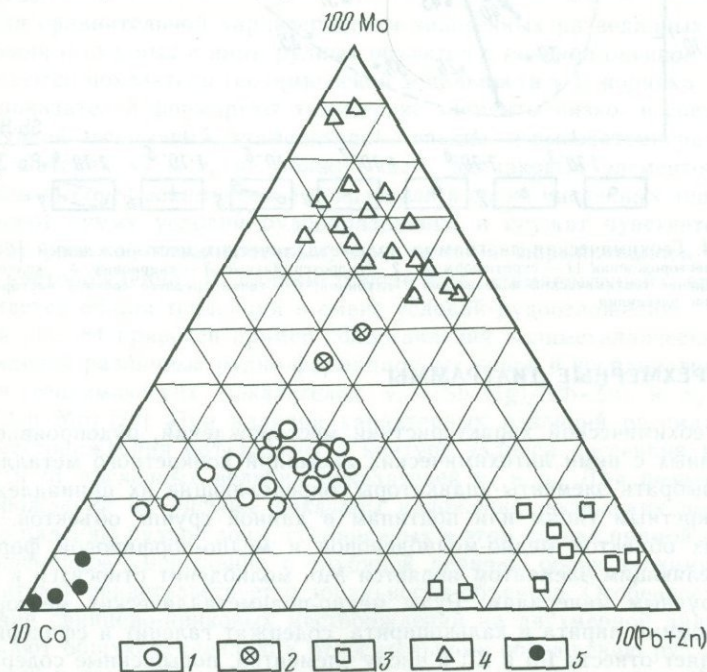


Рис. 85. Трехмерная диаграмма для классификации медных объектов [37]
 1—5 — месторождения (1 — медноколчеданные, 2 — то же, окисленные, 3 — медно-полиметаллические, 4 — медно-молибденовые, 5 — медно-никелевые)

От общей суммы вычисляется процент каждой из трех составляющих, и положение объекта на плоскости треугольника отмечается точкой. Смещение фигуративной точки к одной из вершин треугольника определяет принадлежность классифицируемого объекта (рудопроявления) к соответствующему подтипу. В частности, разделение медных объектов возможно путем построения тройной диаграммы в координатах: $Mo - Co - (Pb + Zn)$. На диаграмме (рис. 85) четко обособляются медно-полиметаллические месторождения и рудопроявления (вершина треугольника $Pb + Zn$); медно-молибденовые и медно-порфиновые (Mo); медно-колчеданные и медно-никелевые (Co). В связи с тем, что кларки взятых для классификации элементов несоизмеримы, при построении фигуративных точек вводятся множители: 100 — для Mo , 10 — для Pb и Co . Смещение точек 7 и 16 (см. рис. 86), отвечающих интервалам окисленных руд медно-колчеданных месторождений Авангард (Мугоджары) и Кусмурун (Восточный Казахстан) к вершине « Mo » связано с его повышенным содержанием в окисленных рудах за счет сорбции гидроксидами железа и образования ферримолибдита. При пересчете относительной доли Mo с учетом коэффициентов остаточной продуктивности k_{Mo} фигуративные точки соответствующих месторождений (8 и 17) заняли положение в группе медно-колчеданных объектов.

Разделение золоторудных месторождений, рудопоявлений и геохимических аномалий на тройной диаграмме возможно в координатах $100 Ag - As - (10 Pb + Zn)$ с выделением золото-серебряных, золото-мышьяковистых и золото-полиметаллических объектов.

5.18. ПРОГРАММА «ПЕРЕБОР»

В практике исследований геохимической зональности иногда возникает задача упорядочения имеющихся объектов по геохимическим признакам. Например, при наличии нескольких пересечений рудных тел может потребоваться определить их относительные уровни. Для решения необходимо применение каких-то геохимических критериев. Один из таких критериев реализован в программе «Перебор».

Предполагается: 1) все имеющиеся объекты принадлежат к одному и тому же геохимическому типу; 2) данный геохимический тип обладает зональностью, которая выражается с помощью геохимических показателей I порядка. В соответствии с этим критерием объекты должны быть ранжированы так, чтобы отношения содержаний (продуктивностей) элементов изменялись монотонно вдоль этого ряда. Поскольку число всевозможных перестановок N объектов очень велико ($N!$), в программе «Перебор» рассматриваются не все возможные перестановки, а только те, для которых хотя бы один показатель I порядка монотонно убывает (таких перестановок всего $k(k-1)/2$, где k — число химических элементов); очевидно, что для всех остальных перестановок объектов это отношение не будет изменяться монотонно.

Исходными данными для программы «Перебор» служат содержания (продуктивности) k химических элементов на N объектах. В программе рассматриваются все парные отношения химических элементов (исключая взаимно обратные) и для каждого из них определяется та последовательность объектов, для которой данное отношение монотонно убывает.

На печать результаты выдаются в другом порядке: печатаются все выявленные последовательности объектов, и для каждой последовательности — все символы монотонно убывающих отношений химических элементов. Интерпретируя результаты расчета, пользователь может руководствоваться как количеством выявленных показателей зональности для каждого из вариантов ранжирования объектов, так и их геохимическим смыслом.

5.19. МНОГОМЕРНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Данная классификация применяется при интерпретации геохимических аномалий в различных математико-статистических и эвристических вариантах [38]. Ниже характеризуются некоторые из них, получившие относительно широкое применение при геохимических поисках. Факторный анализ — один из методов многомерного статистического анализа результатов наблюдений. Предназначен главным образом для сокращения размерности результатов и представления их в более компактной форме.

Исходной информацией для факторного анализа служит ковариационная или корреляционная матрица. Более обосновано использование ковариационных матриц, но на практике обычно используют матрицы корреляций, что дает возможность устранять разномасштабность данных. Разновидность используемой при анализе матрицы ковариаций (корреляций) определяет модификацию факторного анализа. R -модификация факторного анализа исследует структуру матрицы корреляций переменных, а Q -модификация — матрицу корреляций наблюдений. Существуют и другие модификации факторного анализа, но при геохимических исследованиях они используются редко. Поскольку при геохимических поисках число наблюдений обычно во много раз превышает число переменных, то использование Q -модификации вызывает большие вычислительные осложнения. Это приводит к тому, что при геохимических поисках используется исключительно R -модификация факторного анализа.

Сущность R -модификации факторного анализа сводится к замене без существенной потери информации исходного числа зависимых (коррелированных) переменных меньшим числом гипотетических независимых (некоррелированных) переменных, называемых факторами. Эта операция может осуществляться на основании двух принципиально различных моделей:

$$1) x_i = \sum_{j=1}^r l_{ij}f_j; \quad i=1, 2, \dots, m; \quad r \leq m;$$

$$2) x_i = \sum_{j=1}^r l_{ij}f_j + e_i; \quad i=1, 2, \dots, m; \quad r < m,$$

где x_i — исходные переменные, f_j — новые переменные, l_{ij} — факторные нагрузки, e_i — остаток суммарной дисперсии, m — исходное число переменных, r — число факторов. Факторная модель, описываемая первым выражением, определяет метод главных компонент (МГК), а модель, описываемая вторым выражением, — собственно факторный анализ. Мо-

дель МГК объясняет всю изменчивость переменных, а модель собственно факторного анализа оставляет часть этой изменчивости необъясненной в виде остатка e_i . Модели собственно факторного анализа ближе к реальным объектам, однако их реализация требует определенных допущений (например, соответствия выборки многомерному нормальному распределению). При использовании МГК этих допущений не требуется, и МГК достаточно легко реализуется в виде программ.

В результате применения МГК получают 3—4 уравнения, характеризующие главные факторы, ориентированные в многомерном пространстве вдоль направлений с максимальными дисперсиями исходных данных. Бóльший интерес для исследования представляют направления с максимальными факторными нагрузками относительно основных переменных. Такие факторные нагрузки, обладающие более простой для интерпретации структурой, получают с помощью процедуры варимаксного вращения факторов. Некоторым факторам при этом присваиваются мнемонические имена, например, «рудный», «ландшафтный» или «породный».

Матрицу факторных нагрузок, полученную МГК, используют для получения коэффициентов в линейных регрессиях значений факторов. По уравнениям линейных регрессий вычисляются значения факторов в точках наблюдений и строятся карты факторов. В практике геохимических поисков линейная регрессия, отвечающая «рудному» фактору, представляет целевую функцию для выделения комплексных рудных аномалий. Такие функции аналогичны мультипликативным функциям, назначаемым исследователем, но выгодно отличаются от них математико-статистической обоснованностью в выборе весов переменных.

В связи с развитием ЭВМ факторный анализ стал легко доступен, и его использование стало обычным. Однако эта доступность приводит порой к нежелательным последствиям из-за тенденции применять методы ФА без полного понимания логики метода.

Кластерный анализ предназначен для разбиения совокупности наблюдений (объектов) на однородные группы (кластеры) в условиях, когда отсутствуют обучающие выборки (классификация без учителя). В общей (нестрогой) постановке проблема классификации с помощью кластерного анализа заключается в том, чтобы всю анализируемую совокупность объектов разбить на сравнительно небольшое число однородных в определенном смысле групп или классов. Кластерный анализ входит в систему методов распознавания образов, опираясь на один из простейших и наиболее эвристических подходов — использование для классификации функций расстояний.

Выбор метрики, используемой для вычисления расстояния (удаленности) между объектами, играет определяющую роль при решении задач кластерного анализа. Существует три группы метрик, используемых в кластерном анализе. Одна группа определяет расстояния между парами наблюдений. К наиболее употребительным расстояниям из этой группы относятся евклидово расстояние, взвешенное евклидово расстояние, расстояние Махаланобиса, косинусы углов между векторами. Другая группа метрик определяет расстояния между парами объектов. К наиболее употребительным расстояниям из этой группы относятся минимальное локальное расстояние по принципу «ближайшего соседа»,

максимальное локальное расстояние по принципу «дальнего соседа», расстояния центроидного типа и т. д. Третья группа метрик определяет расстояния между группами объектов.

Использование кластерного анализа не является простой задачей и требует от исследователя больших усилий при интерпретации результатов. Успех при этом во многом зависит от той информации, которой обладает исследователь относительно ожидаемого разделения объектов на классы. Для получения содержательно осмысленной классификации (если она вообще возможна) полезно применение к данным нескольких алгоритмов классификации с последующим сравнением результатов; использование различных способов визуализации данных.

При обработке поисковых геохимических данных наиболее часто используются методы иерархической классификации наблюдений и переменных с использованием в качестве метрики расстояний косинусов углов (коэффициентов корреляции). Это связано с тем, что при иерархической классификации не требуется задание априорной информации, результаты классификации наглядно отображаются на дендрограммах, а коэффициенты корреляции хорошо отражают относительную разницу в химическом составе. Как правило, при обработке геохимических данных результаты кластерного анализа являются промежуточными результатами каких-либо более общих методов классификации. Так, иерархическая классификация переменных (содержаний элементов) используется для выделения ассоциаций химических элементов при использовании метода множественного анализа компонент. Иерархическая классификация наблюдений используется при классификации аномальных точек методом построения полиэлементных линейных функций. Использование методов кластерного анализа возможно только на базе быстродействующих ЭВМ.

5.20. ЗОНАЛЬНОСТЬ РУДНЫХ ПОЛЕЙ

Зональность рудных полей проявляется в форме смены состава оруденения по мере удаления от рудоконтролирующих структур и сочетается с различным уровнем эрозионного среза их отдельных участков. Горизонтальная (геохимическая) зональность рудных полей эндогенных месторождений отчетливо проявляется относительно активных интрузий, рудораспределяющих разломов и других элементов геологической структуры, характеризующих удаление от источников рудообразования [18, 35, 45]. Примерами латеральной зональности служит смена высокотемпературного редкометалльного оруденения средне- и низкотемпературным полиметаллическим оруденением с серебром по мере удаления от гранитных массивов. Зональность рудных полей экзогенных месторождений существует относительно береговой линии бассейна седиментации. Зональность, обусловленная различиями в эрозионном срезе участков рудного поля, связана с вертикальной зональностью оруденения. Она может носить постепенный (плавный) характер или определяться границами тектонических блоков. К анализу зональности рудных полей полностью применимы принципы изучения рядов зонального отложения элементов и установления показателей зонально-

сти (см. 5.9—5.13). Разделить горизонтальную (латеральную) и вертикальную зональности рудных полей нередко бывает затруднительно.

Важность и многообразие геологических задач, решаемых в результате исследования зональности рудных полей отдельных месторождений, иллюстрирует рис. 86. Рудопоявление приурочено к штоку гранодиорит-порфиров верхнего мела и по своим минералогическим и геохимическим характеристикам относится к месторождениям медно-порфировой формации. На участке широко проявлена разрывная тектоника с амплитудой вертикальных смещений 100—150 м (по геофизическим данным). Масштаб медно-молибденового оруденения в центральной части участка характеризуют высококонтрастные вторичные ореолы рассеяния Cu и Mo, среди элементов-спутников в гипергенном поле отмечаются Ag, Pb, Zn, As. В восточном тектоническом блоке отмечаются лишь единичные аномальные содержания основных рудных элементов (Cu и Mo) при широком развитии вторичных ореолов Ag, Pb и As. Зональная характеристика участка отчетливо выражена в изолиниях геохимического показателя $v = (Pb \cdot Ag) / (Cu \cdot Mo)$. Низкие значения этого коэффициента однозначно указывают на глубокий эрозионный срез западного блока. Более высокая перспективность оруденения восточного блока определяется высокими численными значениями выбранного v , характерными для надрудных и верхнерудных сечений месторождений медно-порфировой формации.

5.21. ЗОНАЛЬНОСТЬ РУДНЫХ РАЙОНОВ

Геохимические характеристики больших территорий и принадлежность выявляемых гипергенных аномалий к конкретному рудно-формационному типу коренного оруденения определяются с помощью безразмерных показателей геохимической зональности (см. 5.11). Выбор этих показателей проводится с учетом металлогенических особенностей исследуемой территории, наличия в ее пределах известных месторождений и рудопоявлений определенного генетического типа и на основе общих представлений о зональности рудных полей и месторождений. Дополняются эти данные построением геохимических спектров, оценкой взаимоотношений и корреляционных зависимостей между содержаниями рудных элементов, формирующих потоки и ореолы рассеяния на данной территории.

Анализ геохимического сходства коренного оруденения с его вторичными ореолами и потоками рассеяния показывает, что устойчивую связь с коренным источником сохраняют потоки рассеяния в руслах до II порядка включительно. Потоки рассеяния рудных элементов в руслах III и более высоких порядков не могут по геохимическим спектрам надежно характеризовать коренное оруденение вследствие длительной сортировки аллювия, изменяющей соотношения и корреляционные зависимости между содержаниями рудных элементов.

Устойчивые геохимические связи коренного оруденения с вторичными ореолами и потоками рассеяния в руслах I и II порядков позволяют уже на стадии мелкомасштабных литохимических съемок получать первые сведения о зональности рудных районов в целом. В качестве примера выявления зональности рудного района и оценки уровня эро-

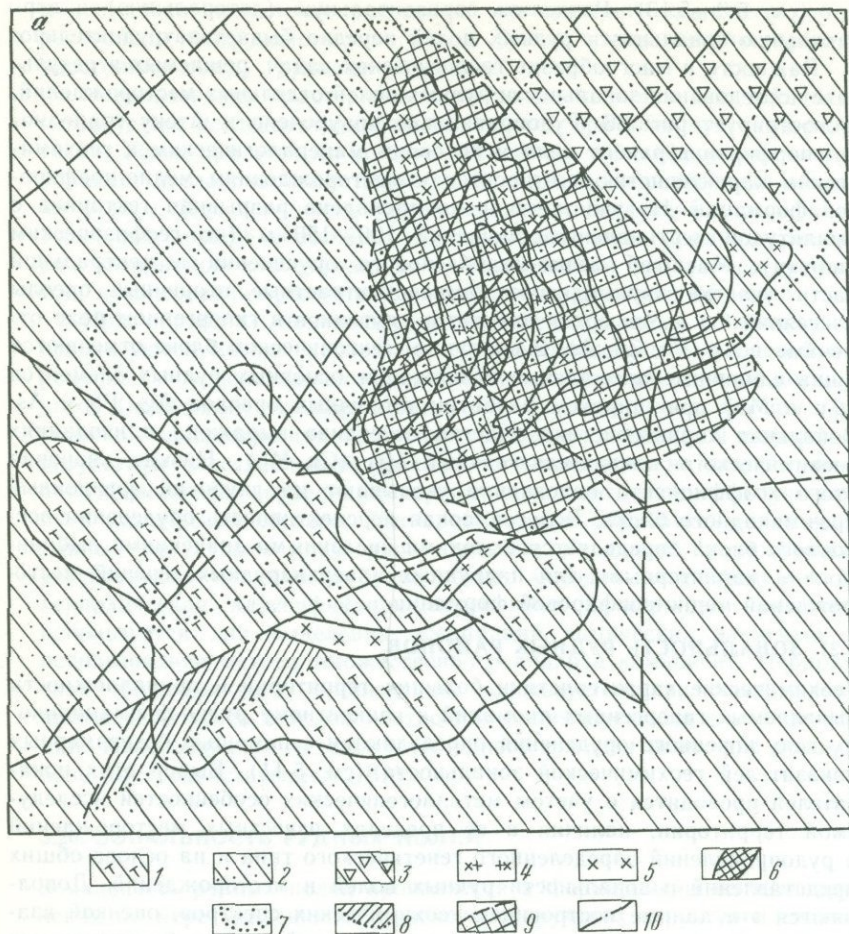
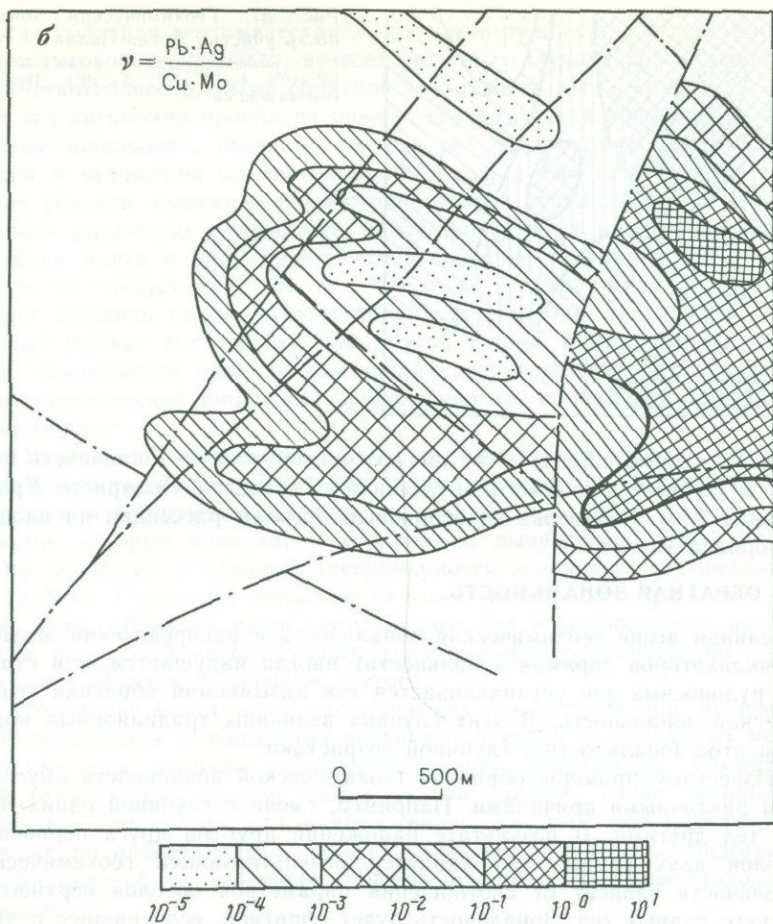


Рис. 86. Геологическая схема (а, по В. П. Торкину) и геохимическая зональность (б) рудного поля

зионного среза оруденения рассмотрим результаты геохимических исследований на участке Аргаа-Салаа (Охотско-Чукотский вулканогенный пояс), выявленном региональными литохимическими съемками по потокам рассеяния масштаба 1:200 000 (рис. 87).

Установление характерных ассоциаций химических элементов и количественных геохимических различий в пределах исследуемой площади проводилось путем анализа корреляционных зависимостей между содержаниями рудных элементов и геохимических спектров отдельных локальных участков. Совокупность геохимических различий между ними выражает показатель третьего порядка $v = (Ag \cdot Pb \cdot Zn) / (W \times \times Bi \cdot Be)$ с размахом численных значений $R = 8,8 \cdot 10^4$. Высокая контрастность выбранного показателя позволила по его величине characterize



1 — туфы и кластолы дацитов; 2 — песчаники; 3 — туфопесчаники; 4 — гранодиорит-порфиры; 5 — диоритовые порфиры; 6 — вторичные кварциты; 7 — процилитизация; 8 — окварцевание; 9 — контур медно-порфирового оруденения; 10 — разломы

вать зональность района в целом. Выявленные различия между ассоциациями химических элементов в пределах исследуемой площади свойственны зональности, характерной для месторождений касситерит-силикатно-сульфидной формации. Зональность подобного рода проявлена на оловорудных месторождениях Восточного Забайкалья, Приморья, Якутии и в других районах.

На участке Аргаа-Салаа отмечается последовательный рост значений ν от более «горячей» восточной части площади ($\nu_{\text{мин.}} = 25$) к более «холодной» западной ($\nu_{\text{макс.}} = 2,2 \cdot 10^6$). Эти изменения обусловлены различиями уровней эрозионного среза оруденения в силу блокового строения участка. Западная часть района оказалась менее эродированной, чем восточная, в связи с чем именно здесь должны быть сосредоточены

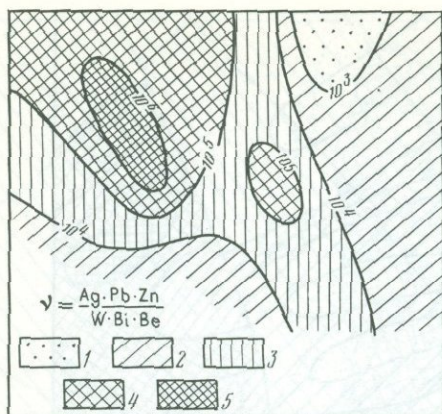


Рис. 87. Геохимическая зональность участка Арга-Салаа
 1—5 — значения γ ($1 > 10^6$, $2 - 10^5 - 10^6$, $3 - 10^4 - 10^5$, $4 - 10^3 - 10^4$, $5 < 10^3$). Площадь участка ≈ 50 км²

более детальные работы. Отчетливую горизонтальную зональность медного и полиметаллического оруденения в пределах Полярного Урала выявила Т. В. Чепкасова по вторичным ореолам рассеяния на площади порядка 40 тыс. км².

5.22. ОБРАТНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ

Описанная выше геохимическая зональность в распределении элементов-индикаторов (прямая зональность) иногда нарушается, и в строении рудоносных зон устанавливается так называемая обратная геохимическая зональность. В этих случаях величины традиционных коэффициентов зональности с глубиной возрастают.

Известные примеры обратной геохимической зональности обусловлены различными причинами. Например, смена с глубиной одних рудных тел другими. В результате наложения друг на друга первичных ореолов двух рудных тел характер результирующей геохимической зональности зависит от соотношений параметров ореолов верхнего и нижнего рудных тел. Зональность будет обратной, если нижнее рудное тело по размерам существенно превосходит верхнее.

Обратная зональность характерна для полиформационного оруденения, образованного путем совмещения в пространстве различных рудных формаций. Такое нарушение зональности было обнаружено на скарново-шеелитовом месторождении Шурале (ТаджССР). Наблюдающаяся здесь прямая геохимическая зональность осложнена второй волной оруденения скарново-полиметаллической формации [12].

Характерная причина кажущейся обратной зональности — пологое склонение рудных зон. В этих условиях часть разведочных профилей оказывается пробуренными в «висячем», а часть — в «лежащем» боку рудной зоны (по отношению к склонению залежи). Именно это привело к выявлению обратной зональности по II разведочному профилю медно-порфирирового месторождения Коксай (Южный Казахстан) [36].

Опыт изучения геохимических особенностей разнообразнейших по составу и условиям формирования рудных месторождений, в том числе и рассмотренные выше примеры показывают, что встречающаяся

иногда обратная геохимическая зональность рудных зон в действительности таковой не является: во всех подобных случаях она кажущаяся. В действительности, такой обратной зональности нет: в каждом из рудных тел автономно проявлена прямая геохимическая зональность и обратная зональность возникает не как результат особых условий миграции и отложения элементов-индикаторов, а как естественное следствие условий залегания и пространственной суперпозиции первичных ореолов различных рудных тел одной или разных рудных формаций.

Если иметь в виду практическое значение геохимической зональности, то следует отметить, что обратная геохимическая зональность может служить геохимическим признаком наличия на глубине новых слепых рудных тел той же или другой рудной формации. Именно в этом заключается один из важнейших аспектов практического значения геохимической зональности рудоносных зон вообще и «обратной» — в частности.

Отсутствие зональности рудных месторождений нередко объясняется многостадийным характером рудоотложения, последующим метаморфизмом оруденения, пологим склонением залежей и другими причинами, которые приводят к отклонению выявленных рядов зональности от общей устойчивой закономерности зонального распределения по глубине. Отсутствие зональности может иметь место при многоэтажном, кулисообразном размещении рудных тел в вертикальном разрезе, когда подрудный ореол рудного тела может пространственно совмещаться с надрудным ореолом другого.

Отсутствие монотонных геохимических показателей при полном охвате оруденения от надрудных первичных ореолов до подрудных можно ожидать при наличии «центриклинальной» зональности, симметричной относительно средней части рудной залежи. Такая зональность наиболее характерна для вулканогенно-осадочных месторождений, а так же по простиранию v_y многих жильных и пластовых эндогенных месторождений, от «горячей» центральной части к обоим «холодным» концам.

5.23. ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В МИНЕРАЛАХ

Обобщение данных о содержаниях элементов-примесей в минералах однозначно подтверждает закон Вернадского о всеобщем рассеянии химических элементов и на минеральном уровне. Любые минералы содержат примеси всех элементов и различаются только количественными уровнями концентраций тех или иных элементов и формами их вхождения в минералы-носители.

Развитие исследований минералов и появление микрондовых анализаторов позволило уточнить представления об их типохимизме. Одновременно было установлено более широкое, чем считалось раньше, наличие весьма тонких механических примесей минеральных соединений химических элементов в минералах-носителях.

По содержанию примесей в минералах могут быть идентифицированы типы рудных формаций и решены некоторые задачи оценки месторождений. Однако, несмотря на очевидные успехи в области позна-

Таблица 59

Ряды зонального отложения элементов-примесей в рудных минералах

Минерал-носитель	Ряды зональности элементов примесей
Пирит	Ti — Ni — Co — Mo — Sn — Cu — Bi — Mn — V — As — Pb — Sb — Zn — Ag
Арсенопирит	Ti — Mn — Mo — Sn — Cu — Bi — Ag — Zn — Pb — Sb
Галенит	Ti — Mn — Bi — Ag — Mo — Sn — As — Cu — Zn — Sb
Сфалерит	Ti — Mn — Ag — As — Bi — Sn — Cu — Pb — Sb

ния типохимизма минералов, эти данные мало привлекались для решения задач геохимических поисков. Причина этого — высокие трудоемкость и стоимость изучения элементов-примесей в минералах. Осложняют применение соответствующих критериев к интерпретации геохимических аномалий сильные флуктации параметров распределения элементов-примесей в минералах, обусловленные механической природой этих примесей. Применение при обработке результатов изучения элементов-примесей в минералах методических приемов поисковой геохимии и, в частности, методов подавления природных флуктуаций и расчета мультипликативных показателей позволяет выявить более выдержанные закономерности распределения элементов-примесей. Применение их в качестве критериев оценки аномалий будет экономически оправдано, поскольку повышенные затраты на эти работы (по сравнению с традиционными экспрессными методами) окупятся благодаря высокой разрешающей способности этих критериев.

Для иллюстрации возможностей анализа элементов-примесей в минералах при изучении геохимической зональности рудных месторождений рассмотрим результаты исследований, выполненных на одном из золоторудных месторождений Забайкалья. Содержания элементов-примесей в мономинеральных пробах определены специально разработанной для этой цели методикой приближенно количественного спектрального анализа. Для характеристики зональности в распределении элементов-примесей были составлены ряды зонального отложения элементов-примесей.

Приведенные в табл. 59 ряды зональности элементов-примесей в рудных минералах этого месторождения имеют принципиальное сходство с обобщенным рядом вертикальной геохимической зональности гидротермальных рудных месторождений (см. 5.10). Для исследованных минералов были рассчитаны значения мультипликативного показателя второго порядка $v = \frac{\text{сурьма, цинк}}{\text{висмут, марганец}}$. Только для сфалерита цинк был заменен свинцом — равноценным элементом-индикатором. Для этих минералов была рассчитана контрастность (размах) вертикальной зональности как частное от деления значений показателя на крайних верхнем v_{\max} и нижнем v_{\min} сечениях исследованного разреза:

пирит	$K_n = n \cdot 10^6$
арсенопирит	$K_a = n \cdot 10^5$
галенит	$K_r = n \cdot 10^5$
сфалерит	$K_c = n \cdot 10^4$

Дальнейшее повышение контрастности геохимической зональности элементов-примесей может быть достигнуто при использовании мульти-минерального показателя $K_m = K_n \cdot K_a \cdot K_r \cdot K_c = m \cdot 10^{20}$.

5.24. «ИСТИННЫЕ» ЗАПАСЫ МЕТАЛЛА В МЕСТОРОЖДЕНИИ

Промышленные запасы Q_H^* и средние содержания металла в рудах \bar{C}_p являются основными характеристиками любого месторождения. Между тем, обе эти величины зависят от субъективного выбора бортового содержания металла C_b , в контуре которого подсчитываются запасы и средние содержания ценных компонентов. Современные требования предусматривают 4—5 (иногда более 20) подсчетов Q_H^* и \bar{C}_p при разных C_b с целью выбора оптимального варианта отработки конкретного месторождения. Непрерывное снижение кондиций на минеральное сырье и рост требований к запасам металла в промышленных месторождениях ведут к постоянному уменьшению C_b . Для действующих ГОК принятые ранее бортовые содержания нередко пересматриваются в сторону снижения, в итоге промышленные запасы месторождений увеличиваются за счет забалансовых руд и первичных ореолов рудных тел. Неустойчивость величин \bar{C}_p и Q_H^* не позволяет рассматривать их в качестве природных геохимических параметров. Положение, при котором наиболее важный показатель геологической оценки месторождений в рудных районах — запасы металла — имеет временную величину, неизвестную точность и ограниченный генетический смысл, осложняет дальнейшее развитие науки. Исправить это положение можно на принципах, принятых в теории геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых.

Первым шагом в этом направлении является, помимо подсчета промышленных запасов, попутная оценка геохимических запасов в контуре минимальных надфоновых содержаний металла, отвечающих условию: $C_b - C_f \rightarrow 0$. Объем рудной залежи в этом контуре, в принципе, стремится к бесконечности. Однако содержания металла по периферии первичного ореола подчиняются быстроубывающей функции и остаточный интеграл за пределами практических подсчетов можно свести к пренебрежительно малой величине. Цифры геохимических запасов $Q_{H_{геох}}$ в контуре околофонового бортового содержания приобретают смысл константы, характеризующей сумму промышленных Q_H^* и «ореольных» $Q_{H_{ореоль}}$ запасов: $Q_{H_{геох}} = Q_H^* + Q_{H_{ореоль}} = const$. Отсюда $Q_H^* = \alpha Q_{H_{геох}}$, где $\alpha < 1,0$ — поправочный множитель учитывающий долю забалансовых руд (см. 4.27).

На практике запасы часто подсчитывают только до фиксированной глубины H , во многих случаях верхние горизонты месторождений срезаны эрозией. Поэтому понятие о полных («истинных») запасах металла в месторождениях требует учета резерва оруденения на глубине и выше современной поверхности.

«Истинными» следует именовать запасы металла в месторождении, имеющие смысл объективного геохимического параметра, способного характеризовать его генетические особенности. Для месторожде-

ний и рудных тел этому условию удовлетворяют надфоновые количества металла, сосредоточенные в замкнутом контуре в процессе рудоотложения. Оценка «истинных» запасов металла не должна зависеть от глубины, достигнутой разведочными работами, от произвольного выбора бортового содержания или от уровня эрозионного среза месторождения, не являющихся его генетическими характеристиками. Соответственно «истинные» запасы металла в месторождении слагаются из геохимических запасов трех классов (рис. 88): I — подсчитанных по данным разведки; II — резервных запасов, ожидаемых на глубине;

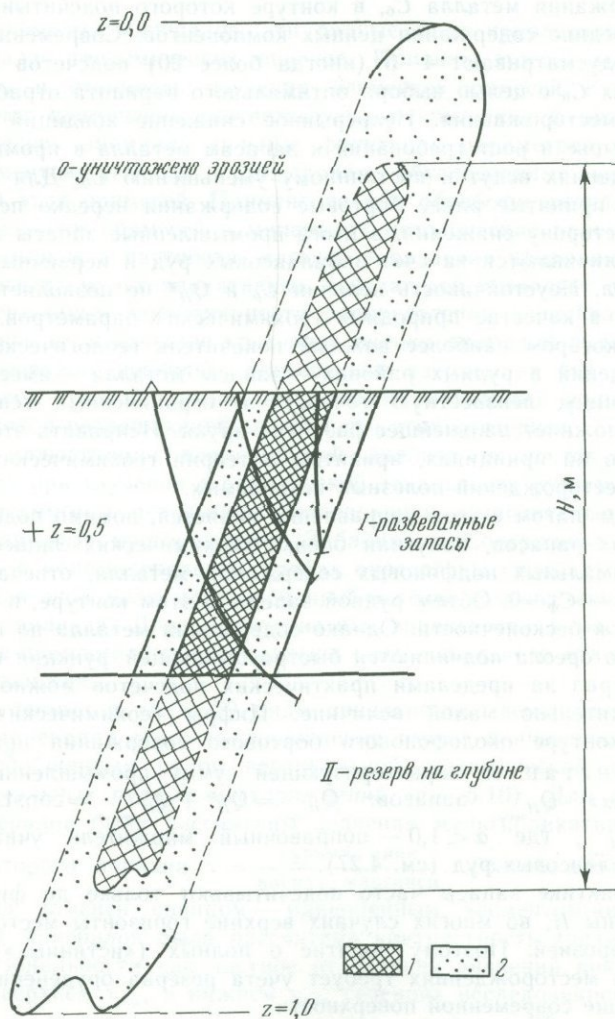


Рис. 88. К подсчету «истинных» запасов металла в месторождении

1 — кондиционные руды; 2 — первичный ореол

запасов металла в интервале оруденения, срезанного эрозией («нулевой» класс). Следовательно

$$Q_{\text{ист.}} = Q_{I_{\text{геох.}}} + Q_{II_{\text{геох.}}} + Q_{0_{\text{геох.}}}$$

«Истинными» могут именоваться запасы металла в том случае, если выход за контур подсчета увеличивает оценку $Q_{\text{ист.}}$ на пренебрежительно малую заданную величину ΔQ , удовлетворяющую условию $\Delta Q/Q_{\text{ист.}} \leq \delta$ (например, 0,05, 0,01 или 0,003 и т. п.).

Оценка полных геохимических запасов $Q_{\text{геох.}}$ I класса при наличии данных разведки не представляет больших трудностей и, в частности, возможна путем экстраполяции 4—5 цифр Q_{II}^* в сторону $C_b - C_{\phi} \rightarrow 0$. Принципы прогноза оруденения на глубину (II класс запасов) и реконструкция эродированной части месторождения (нулевой класс) рассматриваются ниже (см. 5.25, 5.26). Эти задачи решаются на основе детального изучения первичных ореолов, геохимической зональности, морфологии и условий локализации хорошо разведанных месторождений главнейших промышленных типов. К настоящему времени в области геохимического изучения таких эталонных месторождений накоплен обширный коллективный опыт.

Фундаментальное значение для оценки «истинных» запасов металла в месторождениях имеет принцип геометрического и геохимического подобия генетически однотипных месторождений различной крупности (см. 5.2).

5.25. ПРОГНОЗ ОРУДЕНЕНИЯ НА ГЛУБИНУ

Прогноз оруденения на глубину требует учета комплекса признаков, наиболее важными из которых являются коэффициент подобия и вертикальная геохимическая зональность. Каждое месторождение, если оно не залегает строго горизонтально, имеет верхнюю и нижнюю выклинки. Для горизонтальных залежей их аналогами являются выклинки по простиранию. Поэтому последующие рассуждения остаются в силе независимо от условий залегания рудных тел, которые предполагаются крутопадающими.

Построить модель разреза любого рудного месторождения возможно, если иметь минимальные представления о том, как изменяется среднее содержание рудного элемента в интервале промышленных руд. Три варианта построения таких моделей представлены на рис. 89. Очевидно, что для конкретных условий могут быть предложены другие модели промышленного интервала рудной зоны, хотя число их не велико, поскольку рассматриваются генерализованные модели оруденения. При построении моделей за основу принята условная метрика 0,0—1,0, отвечающая верхней и соответственно нижней выклинкам первичного ореола основного (ценного) рудного элемента (см. 5.14).

Знание физического расстояния между любыми двумя точками 0,2—0,5—0,8 эталонного месторождения или реального расстояния между двумя из этих точек на любом разведочном профиле (смежном к обсуждаемому, на котором нижняя выковка руд разведочными выработками не достигнута), достаточно для прогноза оруденения на глу-

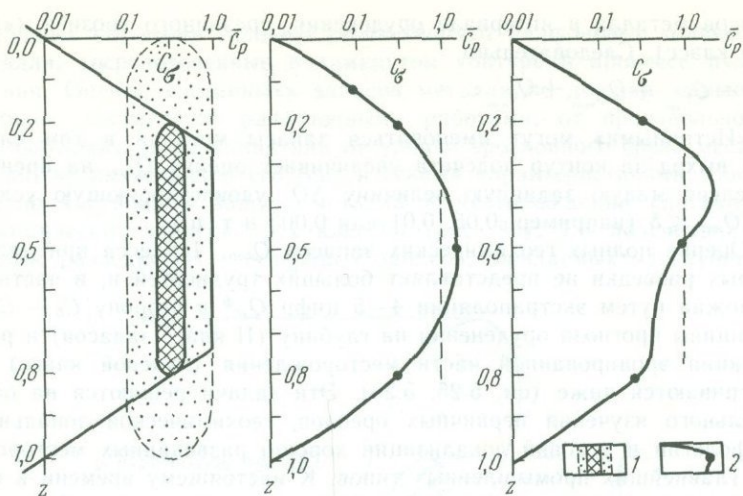


Рис. 89. Модели изменений средних содержаний рудного элемента в рудной зоне

1 — рудное тело, первичный ореол; 2 — графики $C_p = f(z)$

бину. Для этого определяется величина коэффициента линейного подобия, например κ_m , κ_v или κ_p , и по его среднему значению (см. 5.2 и 5.14) для обсуждаемого профиля с учетом его отметки $z_i = f(v_i)$ находят для него точку $z = 0,8$ в линейной мере расстояния (в м).

С. В. Григорян приводит примеры успешного прогноза оруденения на глубину по величинам показателей зональности [12]. Так, на месторождении Тарыжан предсказанное по надрудному первичному ореолу слепое полиметаллическое рудное тело было вскрыто бурением на глубине 100 м (участок Майдантал). На ртутном месторождении Агятаг (АзССР) прогнозная оценка на глубину послужила для отказа в проходке дополнительного горизонта подземных выработок. Примеры подтверждения геохимических прогнозов на глубину с учетом коэффициентов подобия и показателей зональности достаточно многочисленны.

5.26. РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭРОДИРОВАННОЙ ЧАСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Подобные реконструкции необходимы для оценки «истинных» запасов металла в месторождениях (см. 5.24). Реконструкция производится в полной аналогии с прогнозом оруденения на глубину. В отличие от задачи, рассмотренной в разделе 5.25, где прогноз касался точки, обозначаемой в условной метрике «0,8», реконструкция эродированной части рудной зоны связана с определением точки «0,2». Дополнительным отличием является невозможность проверки точности сделанной реконструкции. Можно предполагать, что она в среднем будет не хуже прогноза на глубину.

5.27. ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ПО НАДРУДНОМУ ПЕРВИЧНОМУ ОРЕОЛУ

Впервые метод оценки прогнозных ресурсов металла по параметрам надрудных первичных ореолов предложил В. Л. Барсуков для оловорудных месторождений Дальнего Востока. В основе этого метода лежит чрезвычайно плодотворная идея анализа первичных ореолов аддендов, освобождающихся при распаде гидроксильных комплексов, в форме которых происходит перенос металла при гидротермальном рудообразовании (см. 5.28). Хотя существующая методика еще нуждается в доработке [10, 29], это весьма перспективный метод оценки прогнозных ресурсов Sn, W, Be и некоторых других металлов по надрудным первичным ореолам легколетучих элементов-аддендов — F, J, Br, Cl (?).

Другой метод решения той же задачи основан на определении величины повышающего множителя $\eta > 1,0$ для пересчета продуктивности первичного надрудного ореола основного рудного элемента ($P_{п.о}$) на уровень $z=0,2$. По исправленной величине продуктивности оруденения $P^* = \eta P_{п.о}$ прогнозные ресурсы $Q_{п}^*$ подсчитываются по общим правилам (см. 4.24).

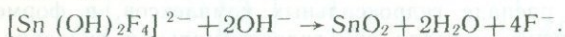
Учитывая неустойчивость значений η при очень малых z рекомендуется ограничиваться интервалом $z \geq 0,02$. Отыскание зависимости $\eta = f(z)$ возможно по величинам монотонно убывающих с глубиной геохимических показателей зональности v первого порядка, в которых числители образованы надрудными элементами-спутниками, а знаменатель — основным (ценным) металлом. Для этой цели следует выбирать такие элементы-спутники, продуктивность которых в надрудном ореоле на всем интервале от $z=0,0$ до $z=0,2$ остается постоянной. Решение этой задачи для оловорудных месторождений Кавалеровского района было дано в 1978 г. [36].

Оценки прогнозных ресурсов слепых месторождений существенно уточняются при наличии данных геохимического опробования на двух и даже трех последовательных горизонтах надрудного первичного ореола. В этих условиях возможности количественной интерпретации геохимических данных расширяются, в частности, путем графической или численной экстраполяции уравнений инфильтрационного рудоотложения на глубину. Однако основной задачей остается оценка ресурсов слепого оруденения при наличии данных опробования на одном горизонте, в том числе по вторичным ореолам рассеяния с учетом местных значений коэффициентов остаточной продуктивности $k \geq 1,0$.

5.28. МЕТОД БАРСУКОВА

На примере оловорудных месторождений В. Л. Барсуков предложил весьма перспективный метод оценки ожидаемых на глубине ресурсов металла по характеристикам надрудных первичных ореолов фтора. Научной основой этой методики является физико-химический анализ процесса рудообразования. Формирование оловорудных месторождений сопровождается развитием околожильных пород кварц-мусковитового, кварц-серицитового и кварц-серицит-хлоритового состава. Фтор в этих

околожильных породах изоморфно замещает гидроксильную группу новообразованных слоистых силикатов и уровень этого замещения определяется уровнем содержания свободных ионов фтора в воздействующем на околорудные породы гидротермальном растворе. Последнее, в свою очередь, определяется количеством гидролизовавшихся фтор-гидроксильных комплексов, находящихся в растворе в соответствии с реакцией:



Очевидно, что между содержанием фтора в измененных околорудных породах и количеством отложившегося на глубине касситерита должна существовать прямая зависимость.

Детальным изучением геохимических особенностей ряда оловорудных месторождений установлена закономерность: на уровне корневых частей оруденения содержания фтора в околожильных породах и жильном выполнении примерно одинаковы. По восстанию рудоносных зон это соотношение отчетливо меняется в пользу содержания фтора в околожильных породах, при этом разница в уровне содержания фтора в околожильных породах и жильном выполнении тем больше, чем больше нижележащие запасы основного рудного компонента — олова. Это зависимость лежит в основе предложенного В. Л. Барсуковым метода оценки прогнозных ресурсов олова по величине отношения средних содержания фтора в жильном выполнении и околожильных породах с помощью соответствующих уравнений регрессии [2, 10, 29].

5.29. МЕТОД БУРАГО — ШВАРОВА

Оценка ресурсов металла в рудном теле, производимая по результатам детального опробования, может быть получена с помощью «эллиптической» модели объекта. Эта модель с некоторыми допущениями пригодна и для первичной оценки залежи уже на ранней стадии геохимических поисков, если имеются точки опробования, попавшие в ее первичный ореол.

Рассматриваемая модель основана на предположении, что пространственное распределение содержания рудного элемента может быть аппроксимировано концентрической системой эллиптических изоконцентрат, таких, что логарифм содержания этого элемента можно описать уравнением второго порядка относительно пространственных координат:

$$\lg \frac{C_{\max}}{C_x} = a_{11}(x-x_0)^2 + a_{12}(x-x_0)(y-y_0) + a_{22}(y-y_0)^2,$$

где C_x — содержание элемента в точке (x, y) ; C_{\max} — содержание того же элемента в центре рудного тела (x_0, y_0) ; a_{11} , a_{12} , a_{22} — параметры, характеризующие форму и ориентацию эллипсов-изоконцентрат. В этой модели параметры a_{11} , a_{12} , a_{22} , x_0 , y_0 и C_{\max} неизвестны и подлежат определению. Для решений этой задачи создана программа «Модель-21» (Ю. В. Шваров), в которой параметры рудного тела находятся методом наименьших квадратов по данным геохимического опробования.

вания. Задача имеет определенное решение, если количество опро-
ванных точек больше 6 и они не лежат на одной прямой. После нахож-
дения параметров рудного тела в программе интегрированием опреде-
ляется площадная продуктивность рассматриваемого элемента в пре-
делах эллипсов с заданными пользователем значениями содержаний
(вплоть до бортового).

Программа «Модель-21» ориентирована на решение «плоских» за-
дач, т. е. на оценку жильных и жилообразных рудных тел (в общем
случае, блоков постоянной мощности). В этих случаях целесообразно
пользоваться значениями средних содержаний (продуктивностей) эле-
ментов в нормальных пересечениях пластинчатых блоков пород.

В целом, когда оцениваемый объект нельзя свести к плоскому слу-
чаю (т. е. нельзя исключить поперечную координату), применяется
программа «Модель-31» (Ю. В. Шваров), являющаяся трехмерным
аналогом описанной программы. В последнем случае подлежащими
определению параметрами являются: C_{\max} — значение содержания в
центре оруденения; x_0, y_0, z_0 — координаты центра; $a_{11}, a_{12}, a_{33}, a_{12},$
 a_{13}, a_{23} — параметры, задающие форму и ориентацию эллипсоидов —
концентрических поверхностей равной концентрации. Объемная задача
имеет решение, если число точек больше 10 и они не лежат в одной
плоскости.

Эллиптическая форма изоконцентрат, принятая в модели, не позво-
ляет описывать геометрию реальных объектов, однако эта модель,
сглаживая значения исследуемого геохимического поля, практически
не изменяет его интегральной характеристики — площадной или объём-
ной продуктивности. Это свойство метода позволяет применять его для
количественной оценки не только хорошо разведанных, но и слабо
изученных рудных объектов. А. И. Бурого развивает этот метод оценки
прогнозных ресурсов на оловорудных месторождениях Приморья.

5.30. ЗОНЫ РАССЕЯННОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Зоны рассеянной минерализации (ЗРМ) представляют собой участки,
в пределах которых в результате воздействия рудообразующих флюидов
на вмещающие породы были образованы зоны повышенных по
сравнению с фоном содержаний элементов-индикаторов данного типа
оруденения, не содержащих концентрированного оруденения, по масш-
табам достаточного для промышленного освоения в данных условиях.

Условность выделения ЗРМ обусловлена неопределенностью поня-
тия «промышленное оруденение». Во многих рудных районах встре-
чаются зоны минерализации слабой интенсивности, развитые по системе
рудоподводящих нарушений и ослабленным зонам вследствие циркуля-
ции по ним рудообразующих растворов. Последние отложили свой
полезный груз в концентрированном виде только в определенных, наи-
более благоприятных для рудоотложения рудовмещающих структурах.

Сравнительное изучение геохимических особенностей ЗРМ и пер-
вичных ореолов промышленного оруденения позволило установить сле-
дующие их геохимические различия, которые могут быть использованы
в качестве критериев идентификации геохимических аномалий, пред-

ставленных ЗРМ. Эти аномалии отличаются от надрудных ореолов концентрированного оруденения постоянным и более широким кругом элементов-индикаторов. Установлено, что в любом срезе ЗРМ присутствуют аномалии всех характерных для данного типа оруденения элементов-индикаторов — как надрудных, так и подрудных. В отличие от этого в надрудных частях околорудного пространства концентрированного оруденения аномалии типичных подрудных элементов могут отсутствовать. В строении ЗРМ не проявлена контрастная осевая зональность. На рис. 90 по одному из разрезов через участок Чальбои (ЗРМ, Кончочское ртутное месторождение, ТаджССР) изображено изменение

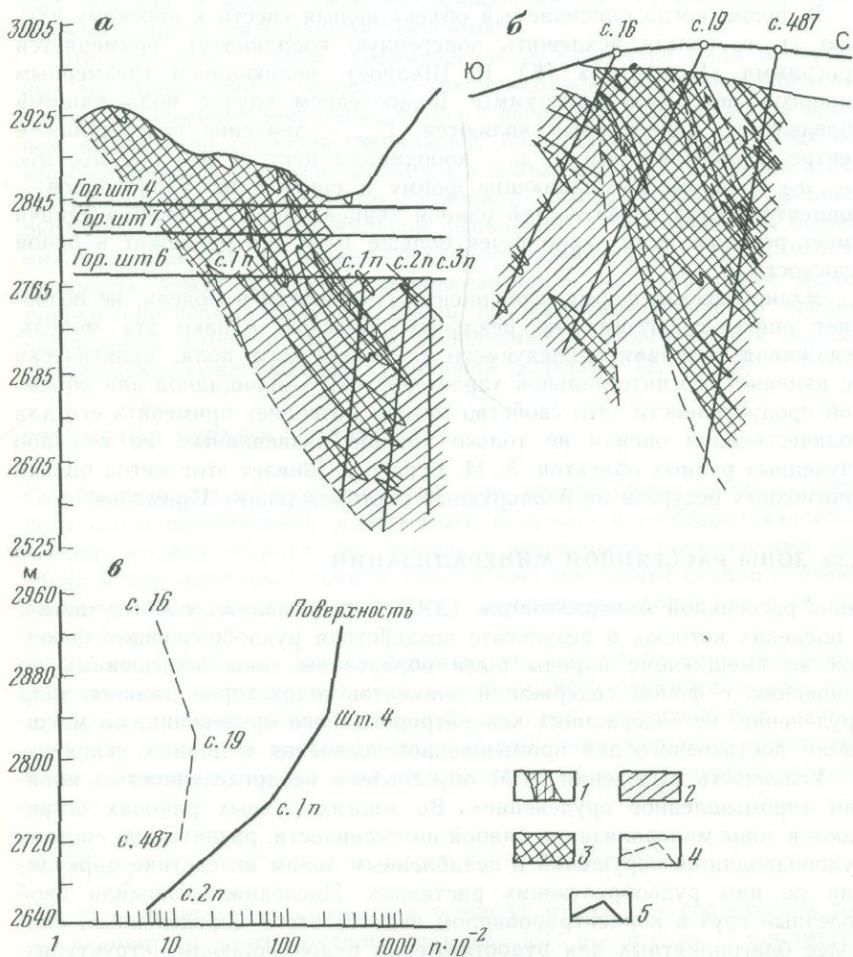


Рис. 90. Изменение величины мультипликативного коэффициента зональности $K = \text{Sb} \cdot \text{Hg} \cdot \text{As} \cdot \text{Ag} / \text{Cu} \cdot \text{Bi} \cdot \text{W} \cdot \text{Zn}$ по разрезам через слепое оруденение (а), ЗРМ (б) и с глубиной (в): 1 — рудные тела; 2, 3 — значения K : 2 — 1–100(а), 0,0001–0,1(б); 3 — > 100(а), > 1(б); 4 — ЗРМ; 5 — промышленное оруденение

Таблица 60
Геохимическая зональность ЗРМ

Зоны рассеянной минерализации	Гипсометрические отметки м	Коэффициент зональности
Кызылташ	1490	1,2
	1400	1,3
	1330	0,9
Оперяющее	1450	1,7
	1380	2,2

величин мультипликативного показателя геохимической зональности, рассчитанного по каждой пробе. Как видно, отчетливой зональности не установлено, тогда как ореолы промышленного слепого оруденения характеризуются контрастной зональностью.

Возможность отличия ЗРМ от ореолов промышленного оруденения по характеру геохимической зональности подтверждается соответствующими данными (табл. 60); изменения величин коэффициентов зональности в интервале глубин 160 м для ЗРМ не выходят за пределы погрешностей анализа.

По величине коэффициента геохимической зональности любые ЗРМ соответствуют ореолам, развитым на уровне нижних частей промышленного оруденения. Благодаря отсутствию отчетливой зональности, вариации величин коэффициента геохимической зональности в пределах ЗРМ укладываются в сравнительно узкий интервал значений, который соответствует средним и нижним горизонтам промышленного оруденения. Это положение иллюстрирует рис. 90, на котором графики изменения с глубиной величин коэффициента зональности промышленного оруденения и ЗРМ пересекаются на уровне нижних горизонтов промышленного оруденения. Это означает, что величина коэффициента геохимической зональности может служить критерием идентификации ЗРМ; если значение этого коэффициента отвечает горизонтам промышленного оруденения, то выявленная аномалия может быть отнесена в разряд ЗРМ в том случае, если в ее пределах отсутствуют промышленные руды. При этом величины индикаторного отношения сравниваются со значениями, табулированными для месторождений данной рудной формации.

ГЛАВА 6

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

Поиски и разведка нефти и газа — важнейших энергетических и химических видов минерального сырья — занимают в нашей стране и за рубежом ведущее место по объему затрат. В их составе, наряду с комплексом геологических и геофизических методов все большее значение приобретают геохимические поисковые методы, основанные на

выявлении прямых признаков нефтегазоносности недр. Основоположником этих методов является В. А. Соколов, предложивший в начале 1930-х годов газовую съемку, основанную на представлениях о диффузионно-фильтрационном массопереносе углеводородов из залежи к поверхности осадочного чехла. Позднее работы этого направления развивались в различных геологических организациях.

В нефтяной геологии существуют различные представления о генезисе нефти и газа. Сторонники неорганического происхождения нефти полагают, что углеводороды имеют мантийное происхождение и затем мигрируют в отложения осадочного чехла по глубинным разломам. Представления о неорганическом образовании нефти и газа впервые сформулировал Д. И. Менделеев, позже они развивались в работах Н. А. Кудрявцева, В. Б. Порфирьева и др.

Большинство геологов-нефтяников считают, что нефть и газ образуются за счет рассеянного в осадочных породах органического вещества. Основы этой осадочно-миграционной теории были заложены В. И. Вернадским, А. Д. Архангельским, Г. Потонье, И. М. Губкиным. Представления об органическом происхождении нефти и газа служат теоретической базой геохимических методов поисков [42].

6.1. ОСАДОЧНО-МИГРАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОИСХОЖДЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА

Нефтегазообразование — сложный, многоступенчатый процесс преобразования органического вещества (ОВ) осадочных пород, выполняющих области длительного и устойчивого прогибания земной коры. И. О. Брод назвал такие области, сохранившиеся в современной структуре коры, нефтегазоносными бассейнами, в которых происходит генерация углеводородов (УВ), их миграция, формирование месторождений нефти и газа, их изменения, определяемые историей геологического развития бассейна.

Процесс преобразования ОВ, накапливающегося в осадках на стадии седиментогенеза в рассеянной или концентрированной формах, тесно связан с последующими стадиями литогенеза (рис. 91). Состав образующихся УВ определяется в значительной мере составом и структурой исходного ОВ: гумусовым (арконовым) с преобладанием конденсированных ареновых структур молекул ОВ; сапропелевым (алиновым), с преобладанием алифатических и алициклических структур, обогащенных водородом ($H/C > 1,0$); смешанным, наиболее распространенным типом ОВ, в котором присутствуют в различных соотношениях те и другие молекулы ОВ. Особенности состава определяют преимущественное газообразование из арконового вещества и значительного количества жидких УВ из алинового вещества на стадии мезокатагенеза.

Основным фактором преобразования ОВ на стадии седиментогенеза и диагенеза является биохимический — деятельность микроорганизмов, приводящая к широкому развитию процессов газообразования (CH_4 , CO_2 , H_2S , NH_3 и др.) с рассеянием образующихся газов в водной среде и атмосфере. Значительная часть ОВ расходуется на восстано-

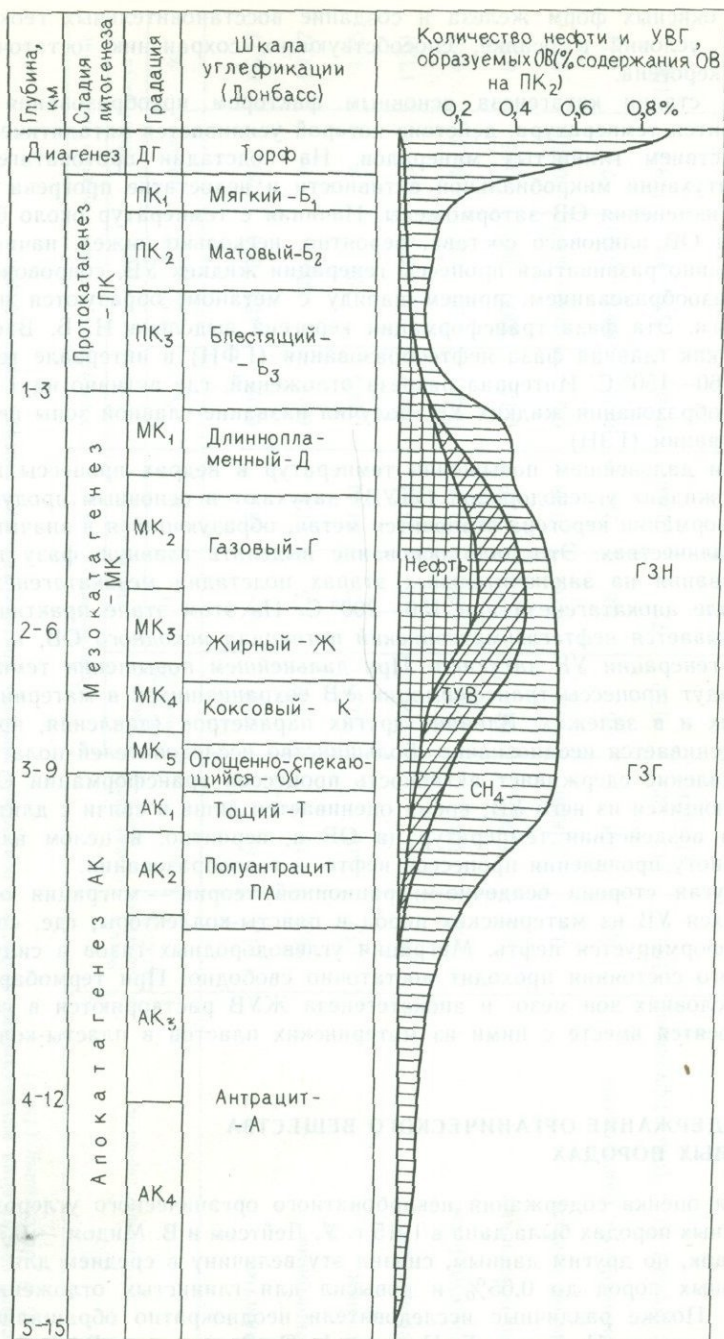


Рис. 91. Стадийность процессов нефтегазообразования

ление окисных форм железа и создание восстановительных геохимических условий в осадке, способствующих сохранению остаточного ОВ — керогена.

На стадии катагенеза основным фактором преобразования ОВ становится температура, действие которой усиливается каталитическим воздействием глинистых минералов. На подстадии протокатагенеза при затухании микробиальной активности и недостатке прогрева процессы изменения ОВ заторможены. Начиная с температур около 60° С (а для ОВ алинового состава, вероятно, несколько ниже), начинают интенсивно развиваться процессы генерации жидких УВ, сопровождаемые газообразованием, причем наряду с метаном, образуются и его гомологи. Эта фаза трансформации керогена выделена Н. Б. Вассоевичем как главная фаза нефтеобразования (ГФН) в интервале температур 60—150° С. Интервал разреза отложений, где активно идут процессы образования жидких УВ, получил название главной зоны нефтеобразования (ГЗН).

При дальнейшем повышении температур в недрах процессы генерации жидких углеводородов (ЖУВ) затухают и основным продуктом трансформации керогена становится метан, образующийся в значительных количествах. Это дало основание выделить главную фазу газообразования на заключительных этапах подстадии мезокатагенеза и в начале апокатагенеза при 150—200° С. На этом этапе практически исчерпывается нефтегазоматеринский потенциал исходного ОВ, и процессы генерации УВ затухают. При дальнейшем повышении температуры идут процессы трансформации УВ сохранившихся в материнских породах и в залежах. Влияние других параметров (давления, времени) оценивается неоднозначно. Большинство исследователей полагают, что давление сдерживает активность процессов трансформации ОВ и образующихся из него УВ; время оценивается лишь в связи с длительностью воздействия температур на ОВ и, вероятно, в целом влияет на полноту проявления процессов нефте- и газообразования.

Другая сторона осадочно-миграционной теории — миграция образующихся УВ из материнских пород в пласты-коллекторы, где, собственно формируется нефть. Миграция углеводородных газов в силу их фазового состояния проходит достаточно свободно. При термобарических условиях зон мезо- и апокатагенеза ЖУВ растворяются в газах и выносятся вместе с ними из материнских пластов в пласты-коллекторы.

6.2. СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Первая оценка содержания некарбонатного органического углерода в осадочных породах была дана в 1915 г. У. Лейтсом и В. Мидом — 0,72%. Ф. Кларк, по другим данным, снизил эту величину в среднем для всех осадочных пород до 0,65% и повысил для глинистых отложений — 0,80%. Позже различные исследователи неоднократно обращались к этому вопросу (П. Траск, Г. Патнод, А. П. Виноградов, В. А. Успенский, А. Б. Ронов, Н. М. Страхов, А. А. Ярошевский, Дж. Хант и др.).

Таблица 61

Средние содержания органических веществ в осадочных породах континентального сектора стратисферы.

По Н. Б. Вассоевичу (1979)

Осадочные породы КСС	Роль в сложении КСС, %	Общая масса, 10^{16} т	Органический углерод			Углеводороды (твердые и жидкие) автохтонные			
			Содержа- ние в по- роде, %	Общая масса		Содержание в породе		Общая масса	
				10^{14} т	%	%	в $г/м^3$, или $1000 т/км^3$	10^{12} т	%
Глинистые	51,4	60	0,9	54	75,0	0,02	450—500	120	66,77
Алевритовые	16,3	19	0,45	8,5	11,8	0,01	250	19	10,57
Песчаные	13,7	16	0,2	3,2	4,44	0,005	120	8	4,45
Карбонатные	18	21	0,2	4,2	5,83	0,012	300—350	25	13,91
Соли, сульфаты	0,3	0,4	0,1	0,04	0,06	0,003	50—70	0,12	0,07
Угли ископаемые	0,3	0,003	67	0,2	0,28	0,15	2000—3000	0,05	0,03
Горючие сланцы	0,3	0,0036	16,5	0,06	0,08	0,2	4000—5000	0,075	0,04
Доманиковиты, баженовиты	0,3	0,3	6	1,8	2,5	0,25	5000—6000	7,5	4,17
Все породы КСС (без эффузивов)	100	115—120 (116,7)	0,62	72	0,045	0,015	350—400	179,7	100

Таблица 62

Поправочные коэффициенты

Возраст осадков	Глины	Карбонатные породы
Кайнозойский	1,5	1,75
Мезозойский	1,0	1,0
Палеозойский	0,75	0,5
Протерозойский	0,5	0,25

Детальный анализ их работ провел в 1972 г. Н. Б. Вассоевич. Объем осадочных образований континентального сектора стратисферы (КСС) Н. Б. Вассоевич [6] (табл. 61) определил в $470 \cdot 10^6 \text{ км}^3$ общую их массу — в $1,15\text{—}1,20 \cdot 10^{18}$ т, среднее содержание в них $C_{\text{орг}}$ — 0,62%.

А. Б. Ронов и А. А. Мигдисов отметили, что среднее содержание $C_{\text{орг}}$ в основных типах осадочных пород увеличивалось от древнейших комплексов Восточно-Европейской и Северо-Американских платформ к более молодым осадкам. Для глинистых пород средние содержания $C_{\text{орг}}$ в PR₃ составили 0,35%, для PZ — 0,7%; для MZ + KZ — 0,94%. Аналогичная картина наблюдается для песчаных и алевритовых пород (соответственно — 0,08—0,23—0,36%) и карбонатных отложений (0,06—0,26—0,47%). Это изменение содержаний $C_{\text{орг}}$ во времени Н. Б. Вассоевич предложил учитывать в виде ориентировочных поправочных коэффициентов для пород разного возраста, находящихся на одном и том же этапе катагенеза (табл. 62).

Общее содержание автохтонных углеводородов (твердых и жидких) в осадочных породах Н. Б. Вассоевич определил в среднем в 350—400 г/м³ (в глинах — 450—500 г/м³), или в 0,015% на породу (для глин 0,02%). Общая масса рассеянных в КСС жидких углеводородов составляет $1,80 \cdot 10^{14}$ т. По расчетам Дж. Ханта [42], количество УВ в осадочных породах-неколлекторах составляет $2,38 \cdot 10^{14}$ т.

Расчеты содержания рассеянных углеводородных газов были проведены Л. М. Зорькиным в 1984 г. для нефтегазоносных бассейнов Русской плиты. По этим данным суммарное количество УВГ в осадочных породах составляет не менее $1,33 \cdot 10^{14}$ м³, однако это лишь незначительная доля общей массы углеводородных газов, генерированных органическим веществом осадочных пород.

6.3. ФОНОВЫЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

Фоновые содержания УВ определяются условиями накопления и преобразования ОВ, возможностями сохранения генерируемых УВ в материнских отложениях. Свыше 90% биомассы океана сосредоточено в прибрежных областях, однако определяющим фактором фоссилизации ОВ является содержание растворенного в воде кислорода, (Дж. Хант, 1980), В. А. Успенский отмечал, что в осадках в среднем фоссилируется 0,8% первичной массы ОВ: на шельфе — 1,04%, на континентальном склоне — 0,37%, в абиссальных участках океана — 0,06%. Уровень сохранения органического вещества, продуцируемого на кон-

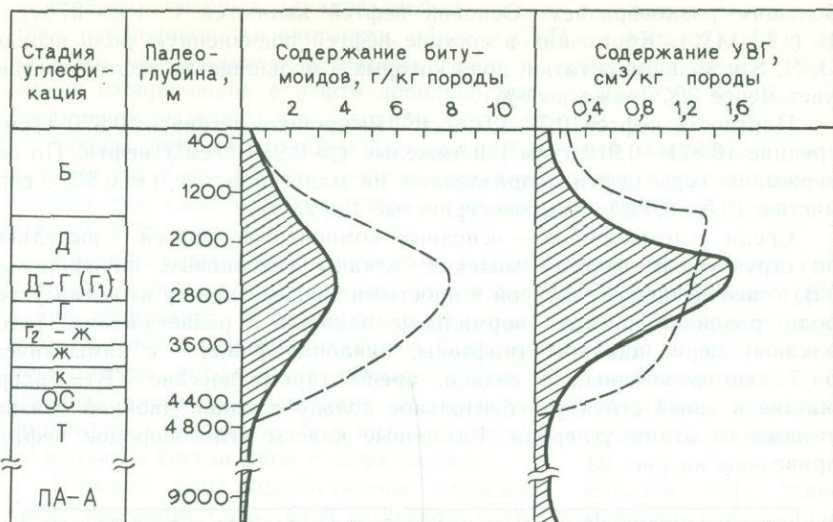


Рис. 92. Изменение УВГ в открытых (пунктир) и закрытых породах

тинентальной окраине Южной Калифорнии оценен К. Эмери в 0,6%; такой же коэффициент fossilization ОВ определен В. Г. Дацко для Каспийского моря. Такие же величины концентрации $C_{орг.}$ в океанических осадках приводятся Дж. Хантом для западной континентальной окраины США, для Мексиканского залива, Аравийского моря.

Содержание ОВ и продуктов его преобразования в породах определяется степенью катагенетического преобразования (см. рис. 91). Максимальные концентрации УВГ отмечаются на этапах среднего и позднего мезокатагенеза; затем на стадии апокатагенеза генерация УВГ и, соответственно, их содержание в породах резко снижается. С глубиной, по мере развития катагенетических процессов происходит рост концентрации УВГ, в том числе на этапах раннего и среднего мезокатагенеза, гомологов метана (в главной зоне нефтеобразования). По данным Е. В. Стадника, фоновые концентрации УВГ в восточной части Прикаспийской впадины колеблются от 0,002 до 0,89 см³ на кг породы, увеличиваясь с глубиной. Такова же тенденция и у гомологов метана, содержание которых с глубиной увеличивается от $1,10^{-3}$ см³/кг до $16,10^{-3}$ см³/кг в надсолевых отложениях и до 0,26 см³/кг в подсолевом комплексе палеозоя.

Аналогичная картина наблюдается и в распределении жидких УВ (битумоидов), извлекаемых из породы хлороформом, либо другими мягкими нейтральными растворителями (рис. 92). Максимальные фоновые концентрации битумоида отмечаются на этапах раннего и среднего мезокатагенеза, а затем резко снижаются.

6.4. СОСТАВ НЕФТЕЙ И ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Нефти — сложные природные растворы, состоящие из углеводородов и неуглеводородных органических соединений, отличающиеся весьма

большим разнообразием. Основой нефтей являются С (83—87%) и Н (12—14%). Кроме них в составе нефтей подчиненную роль играют О, N, S и зольные остатки, доля которых в большинстве нефтей составляет менее 3% (реже до 8%).

Плотность нефтей 0,7—1,0 г/см³. Различают легкие (<0,870 г/см³, средние (0,871—0,910 г/см³) и тяжелые (>0,910 г/см³) нефти. По содержанию серы нефти подразделяют на малосернистые (<0,5%), сернистые (0,5—2,0%) и высокосернистые (>2,0%).

Среди углеводородов — основных компонентов нефтей — выделяют по структурным формам молекул: алканы (метановые, парафиновые УВ) с цепочечной структурой и простыми связями между атомами углерода, различая прямые (нормальные алканы) и разветвленные (изоалканы) цепи; цикланы (нафтенy, циклопарафины) — с замыканием 5—7 атомов углерода в кольцо; арены (ароматические УВ), содержащие в своей структуре бензольное кольцо с одной двойной связью у каждого атома углерода. Различные классы углеводородов нефтей приведены на рис. 93.








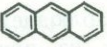
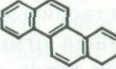

Класс УВ	Гомологический ряд	Структура	Основные компоненты (1—3%)
Нормальные парафины (n-алканы)	$C_n H_{2n+2}$		Пентан, гексан, гептан, октан, нонан, декан
Парафины изостроения (i-алканы)	$C_n H_{2n+2}$		2,3-метилпентан, 2,3-метилгексан, 2-метилгептан, пристан (изопреноид)
Нафтенy моноциклические	$C_n H_{2n}$		Метилциклопентан, циклогексан, метилциклогексан, 1,2-диметилциклопентан, 1-3-диметилциклопентан, 1-3-диметилциклогексан
Нафтенy бициклические	$C_n H_{2n-2}$		—
Нафтенy три- и полициклические	$C_n H_{2n-4(6,8)}$		Бензол, толуол, этилбензол, м-ксилол
Арены моноциклические	$C_n H_{2n-6}$		—
Арены бициклические	$C_n H_{2n-12(14)}$		—
Арены трициклические	$C_n H_{2n-14(16)}$		—
Арены полициклические	$C_n H_{2n-24}$		—
Нафтенo-ароматические	$C_n H_{2n-8}$ и др.		—

Рис. 93. Состав и структура УВ нефтей

Среди изомерных алканов особый интерес для геохимии представляют изопrenoиды (в частности, пристан $C_{19}H_{40}$ и фитан $C_{20}H_{42}$ с правильным чередованием метильных групп в углеродной цепи). Содержание изопrenoидов в нефти довольно высокое (иногда до 9%). Эти соединения выделены и в исходном для нефти ОВ.

Среди неуглеводородных соединений нефтей выделяют смолы, асфальтены и другие кислородные, сернистые и азотистые соединения. Содержание смол и асфальтенов в тяжелых высоковязких нефтях достигает 40% и более.

Кислородсодержащие соединения (кроме смол и асфальтенов) представлены в нефтях нафтеновыми кислотами (до 3% в нефти месторождения Нафталан). В значительно меньших количествах отмечены фенолы, кетоны и другие соединения. Сера присутствует в нефтях в виде меркаптанов, тиофенов, сульфидов и иногда в свободном виде (коллоидный раствор), содержание которых может достигать нескольких процентов. Содержание N в нефтях обычно составляет доли процента, он входит в состав смол и асфальтенов.

Горючие газы представлены алканами — метаном CH_4 , этаном C_2H_6 , пропаном C_3H_8 , *n*- и *i*-бутаном C_4H_{10} . В природных рассеянных газах преобладают CO_2 и N_2 , содержание углеводородных газов составляет обычно первые проценты. В нефтяных и газовых месторождениях УВГ преобладают, в газовых залежах содержание метана достигает 98%. Количество гомологов метана заметно растет в газоконденсатных и газонефтяных залежах. Значительную долю в залежах газа могут составлять CO_2 и H_2S (до 20% на Астраханском месторождении).

6.5. УСЛОВИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗАЛЕЖЕЙ

Нефть и газ, заключенные в пористых или трещиноватых породах-коллекторах, под действием гравитации занимают наиболее приподнятое в гипсометрическом плане положение в ловушках, являющихся частью природного резервуара, сложенного породами-коллекторами и перекрытого относительно непроницаемыми породами — покрышками (флюидоупорами): глинами, солями и т. д. Залежь представляет собой единичное скопление нефти и (или) газа в ловушке и одним из признаков классификации залежей является условие формирования ловушек. Наиболее распространена классификация природных резервуаров, ловушек и залежей, предложенная в 1951 г. И. О. Бродом, впоследствии развитая и детализированная в работах других геологов-нефтяников.

По типу природного резервуара выделяют пластовые ограниченные в кровле и подошве непроницаемыми породами, и массивные залежи, когда природный резервуар ограничен перекрывающим его флюидоупором (рис. 94). По форме среди пластовых ловушек выделяют сводовые, тектонически и литологически экранированные. Стратиграфически экранированные ловушки приурочены к зонам стратиграфических несогласий. Тектонически экранированные ловушки связаны с дизъюнктивными нарушениями. Литологическое экранирование возникает при литофациальных замещениях пород-коллекторов непроницаемыми отложениями, либо при ухудшении коллектор-

Залежи нефти и газа		Схема ловушек и залежей
по типу природных резервуаров	по геологическим условиям	
Массивные	Приуроченные к рифовым массивам	
	Приуроченные к эрозионным выступам	
	Приуроченные к структурным выступам	
Пластовые	Сводные	
	Тектонически экранированные	
	Литологически экранированные	
	Выклинивание пласта коллектора - а литологическое замещение - б	
Экранирование соляным штоком - в		

ских свойств пород. Литологические экраны могут возникать в случае протыкания пластов-коллекторов соляными или глиняными диапирами. В ряде случаев экран для пластовых ловушек может возникнуть при запечатывании головных частей пластов на моноклинали или в своде складки асфальтом, образующимся при гипергенном изменении нефтей залежи.

Особую группу образуют залежи, приуроченные к литологически

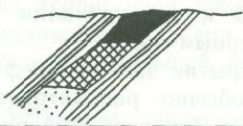
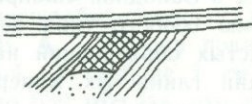
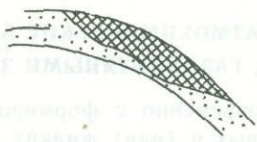
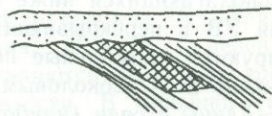
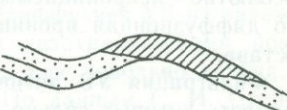
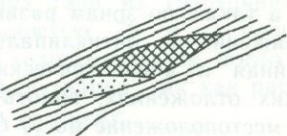
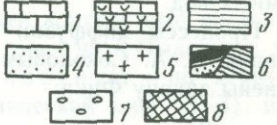
Залежи нефти и газа		Схема ловушек и залежей
по типу природных резервуаров	по геологическим условиям	
Пластовые	Запечатанные асфальтом - г	г 
	Стратиграфически экранированные	
	Гидродинамические собственно гидро- динамические - а	а 
	Экранно-гидродина- мические - б	б 
	Сводово-гидродина- мические - в	в 
Литологически ограниченные	Линзовидные	
		

Рис. 94. Классификация залежей нефти и газа

1 — известняки; 2 — рифовые известняки; 3 — глины; 4 — песчаники; 5 — галиты; 6 — разрывные нарушения; 7 — газ; 8 — нефть

ограниченным пластам-коллекторам — линзам песчаников среди глинистых пород. Массивные залежи приурочены к структурным или эрозионным выступам отложений. Большое практическое значение имеют залежи в рифовых массивах карбонатных пород. В качестве самостоятельного класса выделяют гидродинамические ловушки, в кото-

рых положение залежей нефти или газа обуславливается направлением и напором движущегося водного потока, создающего экран, и плотностью нефти (или газа), определяющей силу всплывания, противостоящую движению воды. Такие залежи, как правило, приурочены к моноклиналям и осложняющим их флексурам, террасам, структурным носам.

Открытие залежей нефти и газа, приуроченных к глинистым толщам, обычно рассматриваемым как флюидоупоры (месторождения Салым в Западной Сибири, Журавское в Ставрополье) привело к выделению особого типа залежей, связанных с зонами разуплотнения глинистых образований на этапе мезокатагенеза в результате дегидратации глинистых минералов и усиления генерации углеводородов из рассеянного ОВ.

6.6. АТМОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ НАД ГАЗОНЕФТЯНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ

Одновременно с формированием залежи за счет притока в ловушку газовых и (или) жидких УВ из очагов генерации УВ или из залежей, располагающихся ниже по разрезу, происходит диффузия и фильтрация УВ в перекрывающие отложения. При этом над залежами формируются аномальные поля концентрации УВ. Это явление было положено В. А. Соколовым в основу газовой съемки.

→ Глины и соли (наиболее распространенные покрывки) не являются абсолютно непроницаемыми. Экспериментальные данные показали, что диффузионная проницаемость глин меняется в зависимости от их состава.

Фильтрация УВ активно идет по разрывным нарушениям, проницаемость которых сильно возрастает при сейсмостектонических подвижках, а также по зонам развития трещиноватости в местах наибольших напряжений на антиклинальных структурах. Этим часто объясняется линейная и концентрически-зональная форма аномалий в вышележащих отложениях, вплоть до поверхностных зон. Форма аномалии и ее местоположение могут быть осложнены структурными особенностями зоны нефтегазонакопления или направленностью движения подземных вод.

Процессы диффузии газов в породах различного состава исследованы В. А. Соколовым, П. Л. Антоновым и др. Эти процессы подчинены закону Фика:

$$Q = S \frac{dC}{dz} T,$$

где Q — количество вещества, диффундирующего за время T через площадь S при градиенте концентрации dC/dz . Процесс диффузии, обусловленный молекулярным перемещением вещества в сторону его меньшей концентрации, более интенсивно протекает при повышенных температурах и при уменьшении давления. Диффузионная проницаемость пород зависит от их литологического состава, плотности, наличия примеси другого материала, влажности, их сорбционных свойств.

По данным И. С. Старобинца для глинистых пород коэффициент диффузии D колеблется в пределах $n \cdot 10^{-6} \dots n \cdot 10^{-7}$ см²/с. D снижается при повышении влажности глин; примесь терригенного материала в глинах повышает их диффузионную проницаемость. Даже соли диффузионно проницаемы, а при наличии в них терригенной примеси D значительно возрастает. Диффузионная подвижность метана выше, чем его гомологов. Нормальные алканы обладают большей подвижностью, чем их изомеры.

При общей ограниченности диффузии УВ через перекрывающие залежи породы, за геологическое время масштабы потерь газа из залежи могут быть значительны. Расчеты В. А. Соколова показали, что с 1 м² площади залежи, расположенной на глубине 1 км, при $D=10^{-5}$ см²/с за 10 млн лет будет рассеяно 630 м³ газа, что может привести к полному разрушению залежей, сформировавшихся, например, в мезозойскую эру.

Фильтрация УВ подчиняется закону Дарси:

$$Q = \frac{K_{\text{пр}}(P_1 - P_2) S}{\mu h},$$

где Q — объем газа, проходящий через слой породы площадью S , $K_{\text{пр}}$ — коэффициент проницаемости, μ — вязкость флюида, h — длина (или высота) слоя в направлении движения, $(P_1 - P_2)$ — перепад давления. Пути миграции УВ из залежи являются зоны дюзьюнктивных нарушений и повышенной трещиноватости. В меньшей степени фильтрация протекает непосредственно через перекрывающие залежи породы. Фильтрация сопровождается диффузией УВ из залежи.

Образование аномалий над подземными газохранилищами показывает, что интенсивность рассеяния УВГ из них довольно велика, и возникающие аномалии весьма контрастны. По данным С. И. Стражгородского, менее чем за два года утечка газа из газохранилища через глинисто-карбонатную толщу мощностью 78 м с площади 1 км² составила более 11 млн. м³. Такое количество газа могло рассеяться за короткий срок только за счет фильтрации, так как расчеты диффузии газа дают значительно меньшую величину.

Опытно-методические газовые съемки показали, что аномалии над залежами УВ формируются на разных уровнях от залежи, вплоть до поверхности и даже в атмосфере. Наиболее контрастные аномалии выявлены по мере приближения к залежи (рис. 95). Выделяют два вида съемок в осадочном чехле: поверхностную — по керну и шламу неглубоких скважин в верхней геохимической зоне (ВГЗ), располагающейся выше первого регионального водоупора, и по водоисточникам этой зоны; глубинную съемку по опорным горизонтам нижней геохимической зоны (НГЗ) затрудненного водогазообмена, располагающейся ниже первого регионального водоупора. В качестве опорных горизонтов выбираются разновозрастные слои с выдержанным литологическим составом пород (карбонатные, песчано-алевритовые), содержащие незначительное количество ОВ, что определяет низкие фоновые концентрации сингенетичных УВ. Съемка ведется по керну, шламу и пробам промывочной жидкости (ПЖ) относительно неглу-

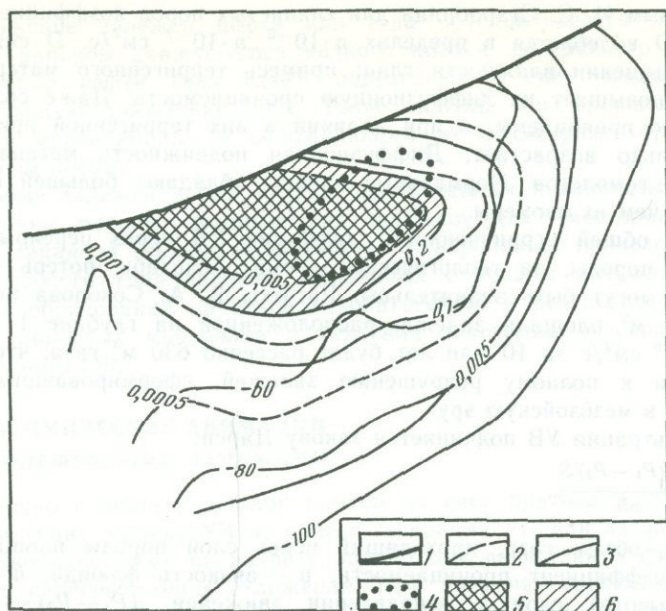


Рис. 95. Распределение УВ в сенонском опорном горизонте

1—2 — изолинии концентраций, в $\text{см}^3/\text{кг}$ (1 — CH_4 , 2 — ТУВ); 3 — изогипсы подошвы карашорской свиты; 4 — аномальные зоны; 5—6 — области повышенных концентраций (5 — ТУВ, 6 — CH_4)

боких структурных или специальных геохимических скважин. Целесообразно также исследования проводить и при бурении глубоких параметрических и поисково-разведочных скважин.

Данные газометрии керна (шлама, промывочной жидкости, вод) представляются в виде карт распределения концентрации УВГ по площади на основе структурных карт различного вида и масштаба (рис. 96): геохимических разрезов скважин, схем их сопоставления по профилям с учетом структурного фактора; геолого-геохимических разрезов; в виде различных корреляционных графиков.

В настоящее время установлен ряд поисковых критериев для оценки газонефтеносности территорий [9]:

1. Аномальные концентрации УВГ в пластах-коллекторах, в сводах и присводовых участках антиклинальных структур, в зонах тектонических нарушений и их контрастность по отношению к фоновым концентрациям смежных участков (районов).

2. Связь концентраций ОВ и УВГ. Для сингенетичных УВГ (особенно газов закрытых пор) выявляется прямая связь с концентрацией ОВ в породах; для эпигенетичных миграционных газов такой связи нет. Для непрелельных УВ прямая связь с содержанием ОВ отмечается в породах, находящихся на стадии диагенеза.

3. Выявление связи УВГ с составом пород. Обычно концентрация газов больше в глинах и уменьшается в ряду глины — песчаники — известняки. Чем больше пелитовой фракции, тем выше содержание

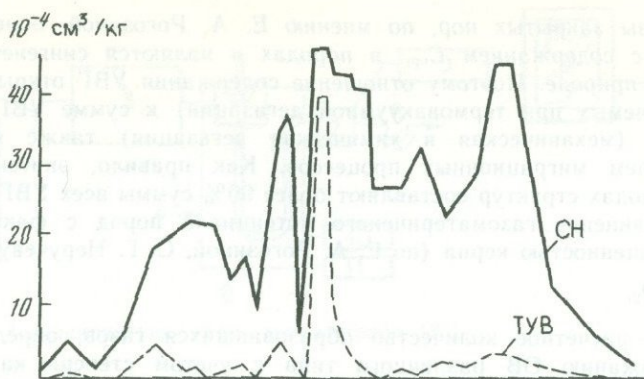


Рис. 96. Распределение УВГ в сеноманских отложениях

газов в породах. Нарушение этой связи говорит об эпигенетичном характере УВГ (рис. 97).

4. Соотношения метана и его гомологов ($\text{CH}_4/\Sigma \text{ТУВ}$). В зоне диагенеза поступление эпигенетичных гомологов метана в аномальных зонах значительно снижает это отношение (например в донных осадках акваторий). Примером поступления эпигенетичных УВГ может служить площадь Восточная Бектурлы (Мангышлак), где, по данным А. В. Архангельского, на крыльях структуры это соотношение составляет 0,48—0,61, а в своде снижается до 0,27—0,32. По газам закрытых пор на площади Северный Кусайник в своде складки это отношение равно 0,5—0,6, на крыльях — 0,8—0,9.

5. Соотношения предельных и непредельных УВГ — $\text{CH}_4/(\text{C}_2\text{H}_4 + \text{высшие})$; $\text{ТУВ}/(\text{C}_2\text{H}_4 + \text{высшие})$. Отсутствие непредельных УВГ в залежах приводит к тому, что в эпигенетичных газах первое соотношение > 700 —900, для сингенетичных газов < 50 —70. Второе отношение для эпигенетичных газов > 30 —40, для сингенетичных < 5 —7.

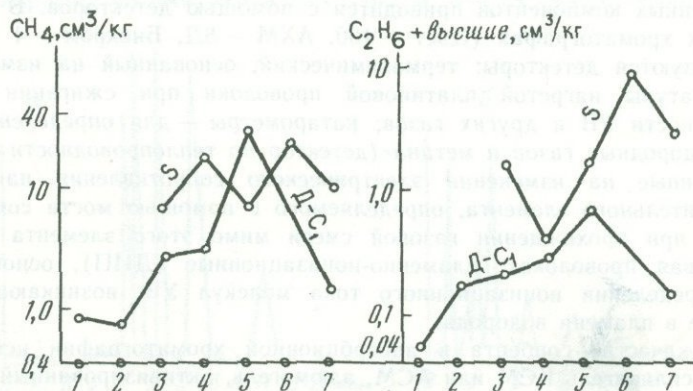


Рис. 97. Эпигенетические УВГ. По И. С. Старобинцу

6. Газы закрытых пор, по мнению Е. А. Рогозиной, более тесно связаны с содержанием $C_{орг.}$ в породах и являются сингенетичными по своей природе. Поэтому отношение содержания УВГ открытых пор (определяемых при термовакуумной дегазации) к сумме УВГ закрытых пор (механическая и химическая дегазация) также является показателем миграционных процессов. Как правило, эпигенетичные газы в сводах структур составляют более 90% суммы всех УВГ.

7. Сравнение газоматеринского потенциала пород с фактической газонасыщенностью керна (по Е. А. Рогозиной, С. Г. Неручеву):

$$K = Q_1 / Q_2,$$

где Q_1 — расчетное количество образовавшихся газов, определяемое по содержанию ОВ различного типа с учетом степени катагенеза пород; Q_2 — газонасыщенность пород, определяемая всеми видами дегазации.

Для сингенетичных УВГ $K > 1,5$, для эпигенетичных ≤ 1 .

Используются и другие показатели, в частности, соотношение изотопов углерода $^{12}C/^{13}C$. Примесь термokatалитического метана уменьшает это соотношение, но метод изотопного анализа не является массовым, поэтому использование этого показателя ограничено.

Косвенными показателями миграции УВГ из залежи в перекрывающие отложения могут быть высокие концентрации CO_2 , как продукта окисления УВ, H_2S — за счет сульфат-редукции УВГ, различные литохимические показатели.

6.7. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ГАЗОВЫХ ПРОБ

Основным методом анализа газовых смесей, выделяемых из ПЖ или керна при ГПНГ является газовая хроматография, основанная на разделении смеси газов на отдельные компоненты в хроматографической колонке. Колонка заполняется твердым сорбентом (адсорбционная) или твердой фазой с нанесенной на нее жидким сорбентом (газожидкостная хроматография). Определение состава и концентрации выделенных компонентов приводится с помощью детекторов. В современных хроматографах (Цвет — 100, АХМ — 8Д, Биохром — 1 и др.) используются детекторы: термохимический, основанный на изменении температуры нагретой платиновой проволоки при сжигании у ее поверхности УВ и других газов; катарометры — для определения неуглеводородных газов и метана (детектор по теплопроводности ДТП), основанные на изменении электрического сопротивления нагретого чувствительного элемента, определяемого с помощью моста сопротивлений при прохождении газовой смеси мимо этого элемента (вольфрамовая проволока); пламенно-ионизационные (ДИП), основанные на определении ионизационного тока молекул УВ, возникающего в камере в пламени водорода.

В качестве сорбента в адсорбционной хроматографии используются: силикагель КСМ или АСМ, алюмогель, активизированный уголь, искусственные молекулярные сита (цеолиты). При газожидкостной хроматографии на твердую фазу наносятся сорбенты: гексадекан,

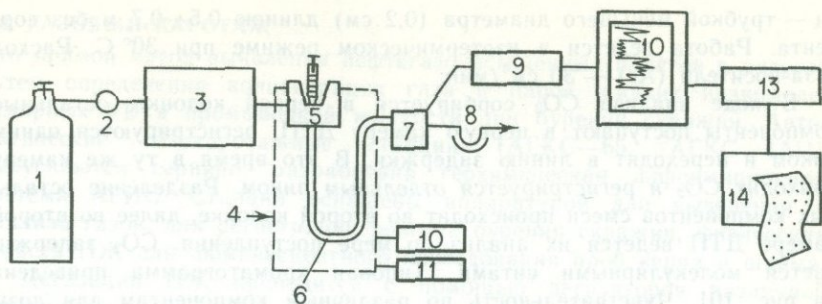


Рис. 98. Принципиальная схема хроматографа [26]

гептадекан, сквалан, апиэзон и др. Для перемещения смеси газов и ее компонентов применяют несорбирующиеся («инертные») газы-носители N_2 , Ar.

Основные элементы конструкции газовых хроматографов представлены на рис. 98.

При объеме анализируемой смеси 25 мл и шкале потенциометра 2,4 мв чувствительность ДИП составляет $2 \cdot 10^{-6}$; при концентрации УВГ более $2 \cdot 10^{-3}\%$ для анализа достаточно 5 мл смеси; при $n \cdot 10^{-1}\%$ — 0,5 мл.

По методике анализа, разработанной во ВНИИЯГГ [26], определение метана, его гомологов C_2-C_6 и непредельных УВГ проводят на хроматографе с ДИП. Разделительная колонка ($l=4$ м, $d=0,4$ см) заполнена зернами (0,25—0,5 мм) алюмогеля, обработанными 3% NaOH. В качестве газа-носителя используют N_2 , расход его 50 $см^3/мин$. Режим работы хроматографа изотермический (108—110° С). Время анализа 13—17 мин. Типовая хроматограмма приведена на рис. 99.

Неуглеводородные газы и метан определяют с помощью катарометров, используя один хроматограф с двумя рабочими камерами ДТП. Разделительная линия состоит из двух колонок, одна из которых заполнена силикагелем АСМ ($l=1$ м, $d=0,4$ см), другая — молекулярными ситами марки 13Х ($l=2$ м, $d=0,4$ см), и линии задерж-

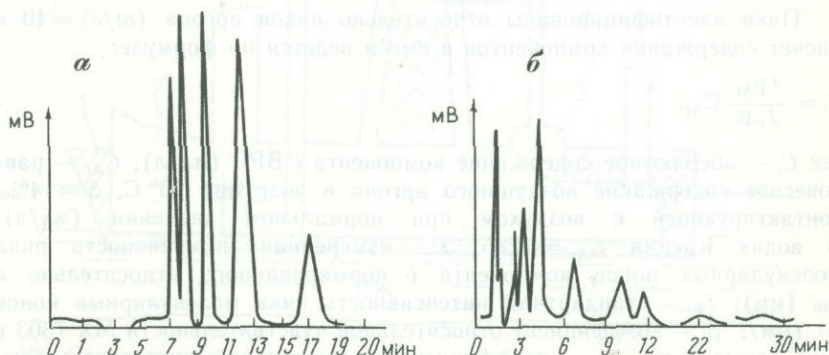


Рис. 99. Хроматограмма неуглеводородных компонентов (а) и УВГ (б)

ки — трубкой меньшего диаметра (0,2 см) длиной 0,5—0,7 м без сорбента. Работа ведется в изотермическом режиме при 30° С. Расход газа-носителя (Аг) — 30 см³/мин.

В ходе анализа СО₂ сорбируется в первой колонке, остальные компоненты поступают в первую камеру ДТП, регистрируются одним пиком и переходят в линию задержки. В это время в ту же камеру приходит СО₂ и регистрируется отдельным пиком. Разделение остальных компонентов смеси происходит во второй колонке, далее во второй камере ДТП ведется их анализ по мере поступления. СО₂ задерживается молекулярными ситами. Типовая хроматограмма приведена на рис. 101. Чувствительность по различным компонентам для дозы смеси 2 см³ составляет (доля объема, %): СН₄, С₂Н₆, С₂Н₄ — 2 · 10⁻⁵; С₃—С₆ — 3 · 10⁻⁵; Не и Н₂ — 2 · 10⁻³; СО₂, О₂, N₂ — 0,1.

Для регенерации свойств сорбентов их периодически прогревают в потоке газа-носителя: молекулярные сита — 8—12 часов при 360° С; алюмогель — 6 часов при 150—170° С; силикагель, активированный уголь — 4—6 часов при 150° С.

При геохимических поисках для определения содержаний метана и других компонентов газовой смеси применяются методы масс-спектрометрии и лазерные газоанализаторы (см. 6.12). ВНИГРИ и НПО «Севморгео» разработана газоаналитическая установка МАГМАСС-2 для непрерывного анализа водорастворенных газов (ВРГ) при работе на акваториях, в которой используется масс-спектрометр типа МХ 7303. Масс-спектрометр работает в циклическом режиме. При цикле от 1 до 44 атомных единиц масс (а.е.м.) длительностью 240 сек. можно выделить 12 компонентов ВРГ: Н₂, Не, СН₄, N₂, О₂, Аг, СО₂, С₂Н₄, С₂Н₆, С₃Н₆, С₃Н₈, С₄Н₁₀; в пределах цикла 1—20 а.е.м. (75 сек.) — первые семь из указанных компонентов. Кроме того, при анализе всегда появляются на масс-спектре пики ионного тока с массовым числом m/e где m — масса иона, e — заряд иона) = 18 (¹Н₂¹⁶О), указывающие на наличие в смеси паров воды. Ионизация молекул газа \bar{e} с энергией 70 эв дает и осколочные ионы (¹²С₂¹Н₃ и др.) Так, сумма ТУВ идентифицируется по (m/e) = 27 (¹²С₂¹Н₃). Трудно выделить метан (m/e) = 16, так как в области этого пика суммируются ионы ¹⁶О⁺ кислорода и воды.

Пики идентифицированы относительно пиков аргона (m/e) = 40 и расчет содержания компонентов в смеси ведется по формуле:

$$C_i = \frac{J_i \beta_{Ar}}{J_{40} \beta_i} C_{Ar},$$

где C_i — абсолютное содержание компонента i ВРГ (мл/л); C_{Ar} — равновесное содержание воздушного аргона в воде при 20° С, $S = 14\%$, контактирующей с воздухом при нормальном давлении (мл/л). В водах Каспия $C_{Ar} = 0,285$; J_i — измеренная интенсивность пика молекулярных ионов компонента i нормированного относительно с J_{40} (мм); J_{40} — стандартная интенсивность пика молекулярных ионов Аг (мм); β_i — коэффициент относительной чувствительности МХ 7303 к i -му компоненту; β_{Ar} — коэффициент относительной чувствительности МХ 7303 к Аг.

6.8. ГАЗОВЫЙ КАРОТАЖ

Это прямой метод выявления нефтегазонасыщенных пластов в разрезе путем определения концентрации газа и паров жидких низкомолекулярных УВ в промывочной жидкости при бурении скважин. Автоматические газокаротажные станции (АГКС—65, АГКС—4АЦ) выпускаются серийно, разработана геохимическая информационная система АГИС. Станции оснащены аппаратурой для выделения и анализа газов, для регистрации режима бурения скважин, физических свойств ПЖ для люминесцентного обследования проб керна и шлама.

Дегазация ПЖ проводится с помощью дегазаторов различной конструкции (поплавковый, шнековый, ДИК-дегазатор непрерывного действия с интегрирующим контуром (рис. 100).

Для повышения степени дегазации ПЖ в ДИК применено барботирование ПЖ с помощью аэратора. В интегрирующем контуре воздух, подаваемый компрессором, обогащается при неоднократной циркуляции через аэратор газами из ПЖ. Часть газовой смеси через параллельный контур и газовоздушную линию подается на станцию на анализ. Степень извлечения газа из ПЖ с помощью ДИК удалось поднять до 40%.

Другие способы дегазации ПЖ, связанные с нагревом проб ПЖ до высоких температур, нарушают в целом принцип непрерывности процесса дегазации, оперируют с ограниченными объемами ПЖ, а применяемые высокие температуры могут внести существенные искажения в содержание и состав исследуемых газов за счет новообразований.

Подробнее с устройством газокаротажных станций можно ознакомиться в работе [26].

Качественная интерпретация газокаротажных диаграмм и приближенное определение фазового состава УВ во вскрытых пластах обычно не вызывают затруднений и пласты, отличающиеся высокими аномальными показателями после анализа данных геохимических и геофизических исследований скважин (ГИС) рекомендуются к последующему

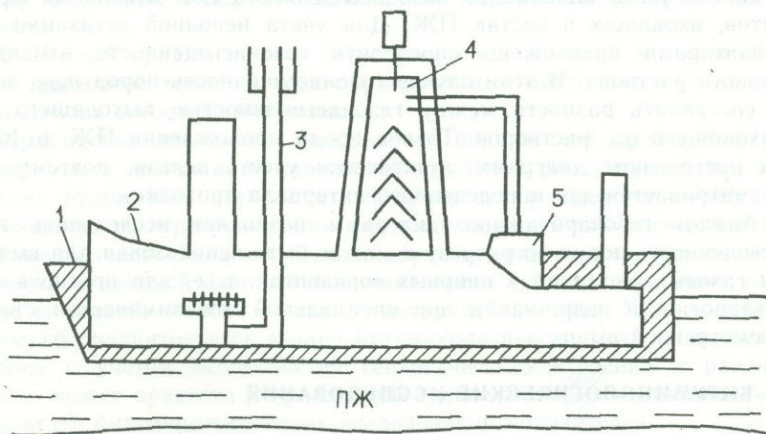


Рис. 100. Схема дегазатора с интегрирующим контуром
1 — поплавки; 2 — камера дегазатора; 3 — аэратор; 4 — конус с брызгоотражателем; 5 — гидравлический затвор

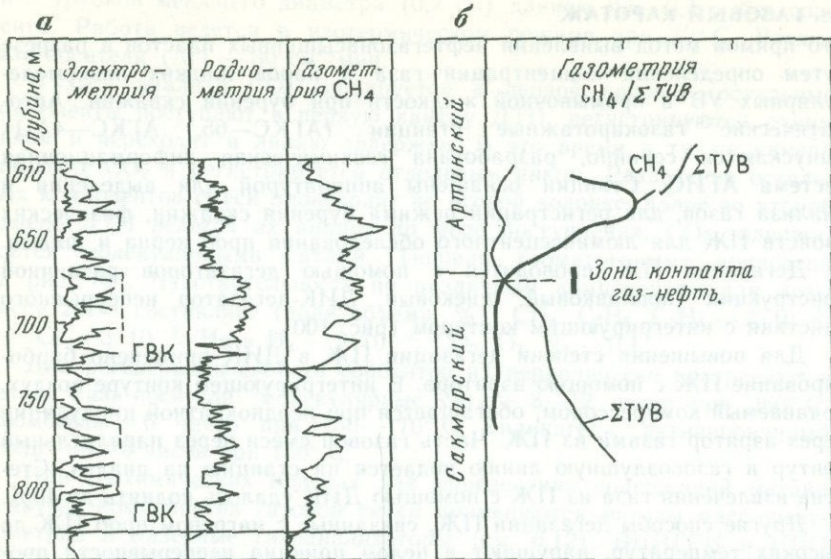


Рис. 101. Выделение контактов (а — газо-водяной, б — газ-нефть)

испытанию (рис. 101). Количественная оценка же газонасыщенности пластов пока весьма приближенна, так как на газонасыщенность ПЖ влияет значительное число факторов, результат действия которых трудно оценить. В число таких факторов входит разбавление газа промывочной жидкостью, сложный характер перемещения ПЖ и растворенного в ней газа от забоя к устью скважины, где происходит дегазация ПЖ, явление опережающей фильтрации ПЖ под долотом, приводящее к вытеснению части газа открытых пор породы еще до разрушения ее, трудности учета влияния на газонасыщенность ПЖ отдельных компонентов, входящих в состав ПЖ. Для учета неполной дегазации ПЖ дегазаторами предложено определять газонасыщенность входящего бурового раствора. В этом случае газонасыщенность пород $q_{эфф.}$ должна составлять разность между газонасыщенностью выходящего $q_{вых.}$ и входящего $q_{вх.}$ растворов. Точное время прохождения ПЖ до забоя при построениях диаграмм практически учесть нельзя, поэтому $q_{эфф.}$ рассматривается для определенного интервала проходки.

Анализ газокаротажных диаграмм позволяет исследовать газонасыщенность пород по разрезу и может быть использован для выявления газовых аномалий в опорных горизонтах, т. е. для прогноза нефтегазонасыщенности недр, как и при специальной атмосферической съемке, рассмотренной выше.

6.9. БИТУМИНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача битуминологических исследований — выявление аномалий жидких УВ и обоснование их генетической связи с нефтяными залежами.

Комплекс рекомендуемых битуминологических исследований [3]

предусматривает использование физических и химических методов изучения ОВ пород и экстрактов, получаемых при обработке образцов пород различными органическими соединениями, селективно растворяющими отдельные компоненты ОВ. В число этих методов входят различные модификации люминесцентного анализа и люминесцентная микроскопия, электронно-парамагнитный и ядерно-магнитный резонанс, инфракрасная спектроскопия, газожидкостная хроматография и др.

На связь битуминологических аномалий с залежами нефти указывают следующие показатели:

1. Повышенное содержание битумоидов в составе ОВ. Эпигенетичные битумоиды, мигрирующие из залежи в вышележащие отложения, представлены наиболее легкими компонентами и приводят к резкому увеличению битумоидного коэффициента $\beta = (ХБА/С_{орг.}) 100\%$ до 50% и более в аномальных участках по сравнению с низкими содержаниями битумоида (несколько процентов) в пределах фона.

В карбонатных породах насыщение битумоидом неравномерное, связано со структурой порового пространства и трещиноватостью.

2. В составе ХБА эпигенетичных битумоидов содержание масел увеличивается до 50% и более, содержание асфальтенов низкое, что определяется повышенной миграционной способностью масляной фракции УВ нефтей.

3. Высокое содержание в ХБА углеводородных структур и низкая концентрация кислородсодержащих соединений.

4. В составе масел отмечается высокое содержание n-алканов и изопреноидов, преобладают алканы до C_{16} , отношение НЧ/Ч (нечетных алканов к четным) близко к единице. Структура компонентов ХБА и характер распределения алканов сходен с таковыми в соответствующих фракциях нефтей, выявленных в районе залежей.

5. Наличие на спектрах ЯМР пород сигналов с амплитудой 50—80 мм и более при минимальной ширине (до 1—1,5 э) за счет обогащения ОВ пород водородом и жидкими водородсодержащими соединениями.

6. Низкий парамагнетизм ОВ пород, определяемый методом ЭПР, из-за невысокой концентрации парамагнитных центров в маслах, преобладающих в составе битумоида.

При оценке значимости выделенных показателей необходимо учитывать тип и содержание сингенетичного ОВ в рассматриваемых комплексах отложений, степень их превращения в процессе литогенеза. Обогащенность перекрывающих залежи отложений ОВ преимущественно сапропелевого типа на соответствующих этапах катагенеза может привести к высокой фоновой битуминозности пород, к созданию «ложных» аномалий, не связанных с миграцией жидких УВ из залежи. И только сравнительный анализ битуминологических данных аномалий и фона с учетом особенностей геологического строения и развития района может привести к правильной оценке значимости выявленных в результате битуминологических исследований показателей.

6.10. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

Пластовые воды нефтегазоносных бассейнов находятся в тесной взаимосвязи с ОВ, рассеянными УВ, нефтью и газом на протяжении всей истории развития НГБ. Сложные физико-химические процессы взаимодействия пород — вод — УВ в различных термобарических условиях в различных зонах НГБ оказывают значительное влияние на динамику и состав флюидов, заполняющих поровое пространство пород, на формирование и разрушение залежей нефти и газа.

В пластовых водах НГБ СССР до глубин 3—4 км ресурсы растворенных УВ газов превышают $4 \cdot 10^3$ трлн м^3 [15], что на несколько порядков выше промышленных запасов УВГ. Есть все основания полагать, что ресурсы растворенных газов более глубоких горизонтов осадочного чехла сопоставимы или превышают ресурсы газа в верхней части осадочных бассейнов.

Значительно хуже растворяются в водах соединения, входящие в состав нефтей, за исключением некоторых ароматических УВ (бензола, толуола). Тем не менее, в пластовых водах наряду с ароматическими УВ отмечаются фенолы и нафтеновые кислоты, которые можно рассматривать как косвенные показатели наличия залежей нефти. По данным ряда исследователей концентрация этих соединений увеличивается по направлению к залежам на один-два порядка.

Присутствие в пластовых водах повышенных содержаний J и Vg не всегда является показателем наличия залежей, хотя источником их является ОВ. По данным А. В. Кудельского, условия накопления J и Vg не совпадают с этапами массовой эмиграции УВ из материнских пород в породы-коллекторы и формирования их залежей.

подавляющее большинство нефтяных и газовых залежей связано с водами высокой минерализации (преимущественно хлор-кальциевого, реже гидрокарбонатно-натриевого типов), характерными для глубин, на которых располагаются залежи УВ. Связь скоплений УВ с водами других типов — исключительно редка.

Для оценки перспектив нефтегазоносности наиболее показательны данные по составу и концентрации УВГ, растворенных в водах. Общая газонасыщенность пластовых вод, близкая к предельной, указывает на перспективность обнаружения залежей газа в достаточно четко выраженных ловушках.

Упругость водорастворенных УВГ (общая и парциальная) характеризуется величиной давления растворенного газа в водонасыщенной системе, определяемой по закону Генри — Дальтона делением газонасыщенности l л пластовой воды (приведенной к нормальным условиям) на коэффициент растворимости газа при пластовых условиях. Общая упругость газа равна сумме парциальных упругостей компонентов, входящих в состав газа. При давлениях насыщения более 5 кПа расчеты, выполненные по закону Генри — Дальтона, значительно отклоняются от фактических величин. В этом случае рекомендуется использовать методику расчета, предложенную Ю. А. Намиотом и М. М. Бондаревой (1963). Упругость УВГ возрастает по мере приближения к

залежи. При отношении упругости газа к пластовому давлению $> 1,0$ все ловушки будут заполнены газом.

Качественный состав растворенных УВГ дает возможность судить о составе залежей. Повышенное количество гомологов метана C_2-C_4 , увеличение концентрации бензола, толуола, аммония, фосфора в водах по направлению к своду структуры или к ловушке другой формы указывает на наличие в ней газоконденсатной или газо-нефтяной залежи.

Недонасыщенность пластовых вод сульфатами служит косвенным показателем наличия залежи нефти и (или) газа. При прохождении потока через залежь, за ее пределами значительно снижается концентрация аниона SO_4^{2-} (тыловой эффект). Взаимодействие водорастворенных сульфатов с УВ приводит к обогащению газовой фазы сероводородом и углекислым газом.

Степень недонасыщенности вод сульфатами определяют по разности между теоретически возможным содержанием аниона SO_4^{2-} в водах определенной минерализации (можно воспользоваться графиками Э. В. Лондон) и фактическим содержанием этого иона в пластовых водах. Содержание аниона SO_4^{2-} рассчитывается по формуле Озолина — Шустера:

$$SO_4 = 108/d^2Ca,$$

где d — плотность воды $г/см^3$, а содержание SO_4 и Ca дается в мг-экв/100 г. Е. В. Стадник упростил формулу: $SO_4 = 10800/Ca$ (для содержаний ионов в мг-экв/л).

6.11. ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ НАД ГАЗОНЕФТЯНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ

УВГ, мигрирующие от залежи в перекрывающие отложения, приводят к изменению их химического состава, к появлению минеральных новообразований, перераспределению химических элементов. Возникающие в результате этого длительного процесса локальные литохимические аномалии можно рассматривать как косвенные показатели наличия залежей нефти и (или) газа.

Исследования продуктивных пластов-коллекторов показали, что присутствие нефти приводит к затуханию процессов преобразования минералов, к большей сохранности кварца, полевых шпатов, других минералов. В то же время на контакте нефтяных залежей с подстилающими водами идет активное новообразование вторичных карбонатов, сульфидов железа, обогащение пород ураном, снижение содержания сульфатов.

Менее изучены процессы в породах, перекрывающих залежи УВ. Сведения о результатах взаимодействия пород и УВГ пока немногочисленны и разрознены, однако позволяют сделать определенные выводы о важности этого направления геохимических поисков нефти и газа [1, 16] и выделить ряд поисковых показателей нефтегазоносности недр:

УВГ, мигрирующие из залежи, изменяют окислительно-восстановительный потенциал Eh и щелочно-кислотный показатель pH вышележа-

щих отложений. Исследования по разрезу скважин показали, что на фоне общего снижения значений Eh с глубиной, в зонах газоносных пластов Eh уменьшается очень резко. На площади Северный Варьеган в перекрывающих залежь песчано-глинистых отложениях Eh в контуре залежи составляет 166—171 мВ, за пределами контура Eh увеличивается до 203—240 мВ [42]. Аналогичная картина отмечена на площади Каражанбас (Мангышлак), где Eh в контуре залежи составляет 120—160 мВ, а за ее пределами возрастает до 250 мВ. УВ создают также щелочную обстановку ($pH > 7$), определяющую поведение химических элементов. Таким образом, изменение величин Eh и pH в контуре залежи и за ее пределами является косвенным поисковым признаком.

В отложениях, залегающих над продуктивным комплексом и в зоне водонефтяного контакта, отмечались повышенные содержания V, Ni, Co, Mn, Cu, Fe, Th, U, Ra. Однако последние исследования на различных месторождениях не подтвердили эту закономерность, концентрации элементов оказались сходными. Лишь концентрация титано-содержащих минералов в отложениях эоцена-олигоцена Северо-Варьеганского нефтяного месторождения над залежью оказались заметно выше, чем за контуром залежи. Таким образом, решение этого вопроса зависит от дальнейших исследований.

Исследования в Саратовском Поволжье показали, что концентрации редкоземельных элементов в отложениях над нефтяными залежами увеличиваются в несколько раз.

Изменения минерального состава пород и появление новообразований, связанные с влиянием эпигенетических УВ, зависят от литолого-фациальных особенностей отложений, типа формаций, структурных условий залегания пластов. Давно известен факт перехода окисных

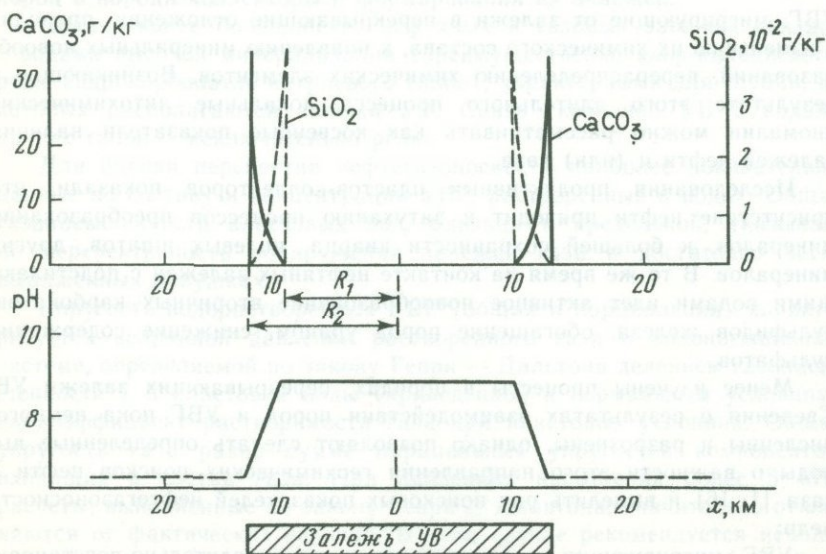


Рис. 102. Графики изменения pH в надпродуктивных залежах

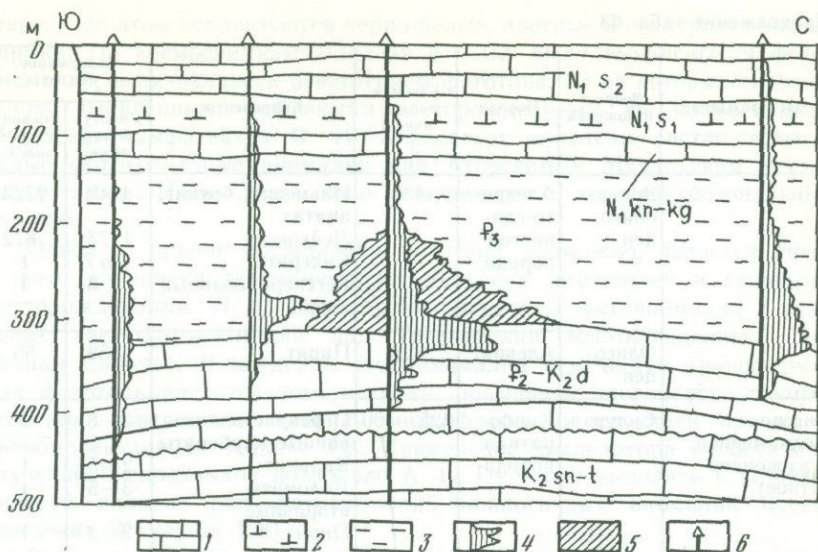


Рис. 103. Изменение состава глин под влиянием УВГ. По Л. С. Кондратову:
 1 — известняки; 2, 3 — глины (2 — известковистые, 3 — гидрослюдистые); 4 — УВГ; 5 — монтмориллонитизация; 6 — скважины

соединений железа в закисные под влиянием УВ. При этом красноцветная окраска пород изменяется на сероцветную.

Над залежами УВ нередко отмечаются вторичные кальциты, доломиты, сидериты, окварцевание. При взаимодействии УВ с сульфатионом пластовых вод или содержащихся в породах сульфатов (гипс, ангидрит) наряду с H_2S образуется углекислота, которая приводит к образованию этих минералов (рис. 102).

Сероводород в терригенных образованиях связывает железо с образованием вторичного пирита. Сероводород может мигрировать к поверхности, где в зоне гипергенеза идет его окисление до свободной

Таблица 63

Изменения состава пород над газонефтяными залежами [40]

Месторождение	Возраст отложений	Порода	Глубина залегания, м	Компоненты	Содержание, отв. ед.	
					в контуре залежи	за контуром залежи
Северный Варьеган (нефтяное)	Средний эоцен	Глина	345—440	Ильменит, анатаз, брукит	1487	9,6
				Лейкоксен	150	37,5
				Пирит	3	1
				Глауконит	1	2—6
				Окремнение	4	1
				Регенерированный кварц	2	1
				Полевые шпаты	21,8	29,9
Сидерит	До 10	1				

Продолжение табл. 63

Месторождение	Возраст отложений	Порода	Глубина залега-ния, м	Компоненты	Содержание, отн. ед.	
					в конту-ре за-лежи	за кон-туром залежи
	Эоцен-олигоцен	Алеврито-глинистая порода	430	Ильменит, брукит, анатаз Лейкоксен Сидерит Регенерированный кварц	4949 1173 До 7 3	2723 872 1 1
	Олигоцен	Алеврит	328	Пирит	352	55
Сигово-Подкаменное (газоконденсатное)	Силур	Карбонатная порода	325—400	Перекристаллизо-ванные карбонаты	5—8	1
				Кальцит	2—5	1
				Доломиты	3—5	1
				вторичные Пирит	2—3	1
				Окремненные образования	3—4	1
Ванаварское (нефтяное)	Венд	Песчаник	3150	Пирит Кальцит	3—5 2—3	— —
Кочевненское (нефтяное)	Неоген	Терригенные породы	50—100	Пирит Сульфиды в целом	3—35 8—80	1—9 5—15

серы, формирующей иногда промышленные скопления (Шорсу в Фергане, Серный завод, Гаурдак в Туркменской ССР).

Примеры изменения минерального состава пород над залежами УВ приведены в табл. 63.

На ряде месторождений над залежами отмечается развитие монтмориллонитовых глин, тогда как за их контуром преобладают гидрослюды (рис. 103). Литохимические поисковые показатели нефтеносности нуждаются в дальнейшем уточнении.

6.12. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ГПНГ

Космические исследования

Исследования поверхности Земли с искусственных спутников и орбитальных станций дали возможность использовать полученные данные в практике поисковых работ на нефть и газ. Анализ космоснимков в комплексе с аэрофотосъемкой и наземными геолого-геохимическими исследованиями позволили уточнить строение НГБ, выявить возможные зоны нефтегазоаккумуляции и нефтегазоносные структуры в их пределах. Такие исследования проводятся в различных районах земного

шара. При этом используются черно-белые, цветные и спектрзональные снимки. По космоснимкам Ландсат в США были выявлены 59 фотоаномалий, отличающиеся осветлением фототона, 33 из которых связаны с уже выявленными нефтяными месторождениями. На космоснимках Иркутского амфитеатра О. И. Карасевым выявлены светло-серые и белые фототональные аномалии над Атовским и Марковским месторождениями. Посветление тона отмечается и на спектрзональных снимках.

Одной из причин посветления фототона, возможно, является лито- и фито изменения геохимического поля над нефтяными и газовыми месторождениями. Л. Г. Когогоровой отмечены фитоаномалии в пределах космофотоаномалии над Тарасовским месторождением (Западная Сибирь). В пределах этой аномалии отмечается трансформация фототона растительного покрова, повышение щелочности грунтовых вод, контрастные колонии микрофлоры, окисляющей пропан и низкомолекулярные жидкие УВ. Применение анализатора яркости при изучении космоснимков позволило А. В. Петухову выделить в Прикаспийской впадине ряд фотоаномалий аналогичных аномалий месторождения Жанажол [28].

Проверка таких аномалий должна вестись комплексом наземных геологических, геохимических и геофизических исследований.

Аэрогеохимические исследования. В настоящее время в различных странах предпринимаются попытки использовать дистанционные физические методы при геохимических поисках месторождений нефти и газа. Один из таких методов — применение лазерных газоанализаторов для определения УВГ в воздушном пространстве с использованием авиации.

Действия газоанализаторов основано на поглощение лазерного излучения определенной длины волны в анализируемом газе. В настоящее время разработан ряд анализаторов («Искатель-1,2»; «Луч» — для изучения содержания метана, «Флюорит» — для CO_2 и др.). Порог чувствительности определения метана составляет $10^{-5} - 10^{-6}\%$ при фоновых содержаниях его в воздухе $n \cdot 10^{-4}\%$. Время анализа (1—15 с.) зависит от длины пробозаборного шланга. Принципиальная схема газоанализатора изображена на рис. 104.

Лазерное излучение с помощью полупрозрачного зеркала делится на два равных световых потока, один из которых направляется в кювету, где продувается азот, в другой кювете — атмосферный воздух на высоте полета. Появление в воздухе CH_4 приводит к пропорциональному поглощению лазерного излучения, которое регистрируется оптикомерительным устройством.

В табл. 64 приведены данные о фоновых концентрациях метана на высотах от 50 до 5000 м в различных геотектонических областях.

Полеты над нефтегазоносными районами показали, что аномальные зоны довольно устойчивы. Примерно в 73% маршрутов аномалии были подтверждены и лишь в 23% случаев при повторной съемке аномалии не были отмечены. Аномалия в Прибалханской зоне нефтегазоаккумуляции была подтверждена в 9 случаях из 10; кратность ее по отношению к фону составляет 2,9.

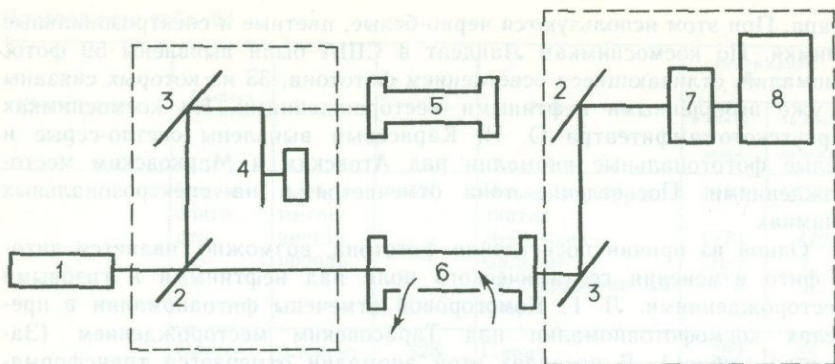


Рис. 104. Блок-схема лазерного газоанализатора

1 — источник лазерного излучения; 2 — полупрозрачное зеркало; 3 — отражающее зеркало; 4 — вращающийся полудиск; 5 — сравнительная кювета; 6 — измерительная кювета; 7 — фотоприемник; 8 — запись сигнала

На концентрацию CH_4 в атмосфере влияют геоструктурные условия. Дегазация пород активнее проходит в областях с более напряженной тектонической обстановкой. В пределах геосинклинальных областей среднее содержание метана составило $3,62 \cdot 10^{-4}\%$ (67 замеров), в передовых прогибах — $2,56 \cdot 10^{-4}\%$ (143), на древних платформах — $1,70 \cdot 10^{-4}\%$ (13).

Данные приведенные в табл. 65 показывают, что в целом, с увеличением высоты опробования концентрация CH_4 в атмосфере уменьшается. Однако в геосинклинальных областях (Южно-Каспийская впадина) содержания метана выше, на всех уровнях и темпы снижения контрастности аномалий ниже, чем в платформенных районах.

Исследования атмосферного воздуха в районе Подмосквовного угольного бассейна также выявили устойчивую аномалию по метану с кратностью к фону 1,9.

Другим видом воздушных геохимических исследований при поисках нефтяных и газовых месторождений является, по данным Б. Кочека, комплексирование геолого-структурного дешифрирования космоснимков с воздушной тепловой съемкой с использованием инфракрасного сканера.

Таблица 64

Средние содержания метана в атмосфере. Данные Е. В. Стадника и др. (1986)

Район	Число замеров	Содержание $\text{CH}_4 \cdot 10^{-4}\%$
Туркменская ССР	103	$2,90 \pm 0,11$
Азербайджанская ССР	7	$2,45 \pm 0,14$
Западный Казахстан	21	$2,70 \pm 0,13$
Краснодарский край	18	$1,67 \pm 0,08$
Узбекская ССР	94	$2,17 \pm 0,03$
Каспийское море	10	$2,62 \pm 0,23$
Донецкая область	8	$1,67 \pm 0,03$
Ростовская область	5	$1,75 \pm 0,07$
Грузинская ССР	2	$2,19 \pm 0,86$

Таблица 65

Средние содержания CH_4 (в $10^{-4}\%$)

Геотектоническая обстановка	Высота замеров, м				
	50—150	300—800	2000—2100	2300—2500	2700—3000
Платформа	2,47	2,93	1,33	1,03	1,45
Геосинклиналь	3,58	3,53	2,55	2,44	1,66

Такая тепловая съемка была проведена на акватории Северной Адриатики с использованием теплового ИК-сканера Д-1230 (США). Ртутно-кадмиево-теллуrowый детектор в интервале спектра 8—14 мкм позволяет выявлять тепловые различия на поверхности моря с высоты 1000—1800 м с точностью до $0,2^\circ \text{C}$. В основу метода положен принцип охлаждения воды на поверхности моря в зонах газопроявлений под влиянием различных факторов (при расширении газа из-за разности давления на дне моря и у поверхности, подъем холодных придонных вод вместе с газом на поверхность и др.). Выявленные «холодные» аномалии затем проверялись эхолотированием с судна, фиксировавшим положение газопроявлений по наличию газовых пузырьков в водяном столбе.

Результаты тепловой съемки позволяют рекомендовать ее для выбора направления поисковых работ на нефть и газ в шельфовых зонах.

Наземная лазерная геохимическая съемка. Лазерные адсорбционные газоанализаторы, смонтированные на автомобилях, успешно применяются в ряде случаев для поисков утечки газа в подземных газопроводах («Искатель-1,2», «Луч»). Подобные автолаборатории могут быть использованы для выявления газовых аномалий в приземной атмосфере при ГПНГ. Опытные работы с газоанализатором «Луч-2» на Анастасиевско-Троицком месторождении в Западно-Кубанском прогибе установили повышение метанового фона на месторождении на 15—25% по сравнению со средним фоном на местности (рис. 105).

Увеличение концентрации CH_4 и его гомологов в подпочвенном воздухе отмечалось при землетрясениях (рис. 106). Для исследования явления был проведен эксперимент по созданию искусственной «встряски» на непродуктивной площади и в пределах месторождения с непрерывным наблюдением за содержанием метана с помощью лазерного



Рис. 105. Аномалия метана в приземном воздухе



Рис. 106. Увеличение фильтрации при искусственном землетрясении

газоанализатора. Было установлено, что над непродуктивной структурой фоновые значения CH_4 повысились с $4,6 \cdot 10^{-4}\%$ до $5,9 \cdot 10^{-4}\%$, т. е. эффект «встряски» был незначителен. На продуктивной структуре через 2 часа после «встряски» концентрация метана стала увеличиваться и через час достигла пятикратных значений фона, после чего снова установились фоновые концентрации метана. Эксперимент показал, что для выявления аномальных участков с помощью лазерных газоанализаторов можно использовать локальные искусственные «землетрясения».

Автомобильные лазерные съемки по метану и его гомологам могут быть применены для обследования значительных участков территорий. Ограничивающим фактором является заболоченность и условия проходимости автотранспорта в исследуемом районе.

6.13. СТАДИЙНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ГПНГ

Геохимические поиски нефтяных и газовых месторождений проводятся совместно с геологическими и геофизическими работами. Принятый в СССР единый геологоразведочный процесс включает в себя региональные, поисковые и разведочные работы. Разработаны и совершенствуются принципы четырехстадийного проведения геохимических поисковых исследований на нефть и газ, отвечающие стадиям геологоразведочных работ (рис. 107, табл. 66).

Региональные геохимические исследования. Региональные работы проводятся в недостаточно изученных областях нефтегазоносных или возможно нефтегазоносных бассейнов одновременно с общей оценкой перспектив нефтегазоносности территории на основе региональных геолого-геофизических работ, бурения первых опорных и параметрических скважин. Основная задача этой стадии ГПНГ — выявление геохимических аномалий, связанных с крупными геоструктурными элементами бассейна (зонами нефтегазоаккумуляции), определение комплекса геохимических методов, которые позволят эффективно

Таблица 66

Виды и масштабы геохимических съемок

Стадия работ	Виды съемок	Число проб на точке	Глубина отбора проб	Масштаб работ	Плотность проб на км ²
Региональная	Маршрутные исследования	1—2	Поверхностный слой	1:1 000 000— 1:500 000	0,05—0,3
Прогнозно-рекогносцировочная	Площадная и профильная съемки	2—5	До 30 м	1:200 000 1:100 000	0,3—0,6
Поисково-оценочная	Площадная съемка	10—60	До 600 м	1:100 000 1:50 000	0,6—2,4
Детальная	Площадная съемка	20—60	600 м и более	1:25 000 и крупнее	2,4—5

вести поиски нефти и газа в пределах бассейна или его крупных структурных элементов, прогноз нефтегазоносности с оценкой ресурсов по категориям $D_3 - D_2$.

Основные методы этой стадии работ — маршрутные атмосферические и гидрогазгеохимические исследования естественных и искусственных водоисточников, придонных вод крупных рек и их притоков. При проведении в районе сейсмических работ необходимо комплексовать с ними газгеохимическое исследование керна и шлама неглубоких геофизических скважин. Маршруты выбирают по возможности вкрест простирания структурных элементов. Рекомендуемые расстояния между маршрутами — не более 10 км, а между пунктами опробования — до 2 км (т. е. густота точек наблюдения должна составлять не менее 5 пунктов на 100 км^2). Все эти наблюдения ведутся в верхней геохимической зоне.

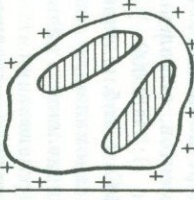


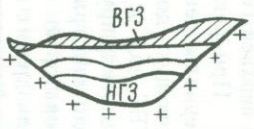
При региональных исследованиях целесообразно использовать материалы дешифрирования КС и АФС и аэролазерную съемку, позволяющую достаточно быстро получить информацию о распределении УВГ над основными структурными элементами и организовать наземные маршруты с учетом этой информации. В районах, проходимых для автотранспорта, желательно использовать геохимическую автолабораторию с лазерным газоанализатором и комплектом аппаратуры для других видов геохимических исследований.

Конечным результатом региональных ГПНГ должна быть карта основных структурных элементов, выявленных геолого-геофизическими исследованиями масштаба $1:1\,000\,000 - 1:500\,000$, с результатами дешифрирования КС и АФС и наблюдений в пунктах опробования с выделением геохимических аномальных зон. Такая картина дает возможность определить направление дальнейших поисковых работ, включая и геохимические исследования.

Прогнозно-рекогносцировочная стадия ГПНГ. Данная стадия включает комплекс геохимических исследований осадочных отложений, водоисточников и водотоков верхней геохимической зоны в пределах крупных структурных элементов или площадей, характеризующихся аномальными показателями по результатам региональных исследований. Такими районами в пределах НГБ могут быть возможные зоны нефтегазоаккумуляции или отдельные поднятия в их пределах. Эти исследования комплексуются с геолого-геофизическими работами по выявлению и подготовке объектов поискового бурения.

На этой стадии наземные ГПНГ заключаются в гидрогазобиогеохимическом опробовании вод ВГЗ, литохимическом и другом исследовании керна неглубоких картировочных, геофизических и структурных скважин. Наряду с маршрутными исследованиями по рекам и их притокам должны проводиться площадные работы в районах с благоприятными ландшафтными условиями. Возможность проведения площадных работ в зонах интенсивного развития болот и многолетнемерзлых отложений еще недостаточно изучена.

Густота пунктов геохимического опробования на этой стадии должна составлять от 5 до 30 на 100 км^2 , с отбором 1—2 проб в каждой точке. При использовании мелких скважин плотность точек увеличивается

Стадии геолого-разведочных работ на нефть и газ и их задачи	Стадии ГПНГ и их задачи	Масштаб геохимических исследований	Объекты исследований ГПНГ		Комплекс геохимических методов
			в плане	в разрезе	
<i>Региональная</i> Оценка перспектив нефтегазонакопления, выделение возможных зон нефтегазонакопления	<i>Региональная</i> Выделение региональных геохимических аномалий, определение направлений дальнейших работ и первоочередных объектов исследования	1 : 1 000 000 1 : 500 000	НГБ или его крупные структурные элементы 	Верхняя часть осадочного чехла в пределах НГБ, приземная атмосфера, гидро- и биосфера 	Анализ КС, аэрогеохимические исследования, маршрутные атмосферно-гидрохимические, биогеохимические исследования в ВГЗ. Комплексные геохимические исследования опорных и параметрических скважин
<i>Поисковая</i> Выявление и подготовка объектов к поисковому бурению. Бурение с целью открытия залежей нефти и или газа	<i>Прогнозно-рекогносцировочная</i> Выявление локальных геохимических аномалий. Выбор первоочередных объектов поискового бурения	1 : 200 000 1 : 100 000	Зоны возможного нефтегазонакопления 	Отложения и воды ВГЗ, приземная атмосфера, биосфера 	То же, что на первой стадии. Сгущение точек опробования в пределах исследуемой площади, комплексирование геохимических исследований с бурением мелких картировочных и геофизических скважин на сейсмопрофилях, геохимические исследования при бурении структурных скважин


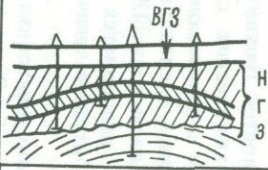
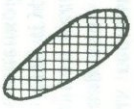
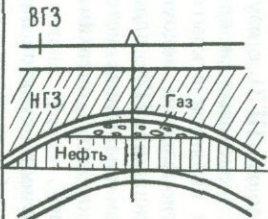
<i>Поисково-оценочная</i>	<i>Поисково-оценочная</i> Оценка природы выявляемых аномалий, определение очередности ввода локальных структур в поисковое бурение	1 : 100 000 1 : 50 000	Локальные поднятия, зоны возможного развития ловушек неструктурного типа Зона выклинивания 	Отложения и пластовые воды НГЗ, опорные геохимические горизонты 	Газовая съемка по опорным горизонтам НГЗ, по разрезу поисковых и специальных геохимических скважин, газовый каротаж, битуминологическая, гидро- и литохимическая съемки по скважинам в комплексе с гравиметрической, сейсмо- и электрогеофизической разведкой
<i>Разведочная</i>	<i>Детальная</i> Выявление геохимических особенностей разреза, связей аномалий с залежами нефти или газа, выбор критериев ГПНГ, особенностей формирования аномалий УВ, выделение продуктивных горизонтов в разрезе. Уточнение местоположения последующих скважин	1 : 25 000 немасштабные исследования	Продуктивные площади 	Отложения и пластовые воды НГЗ. Нефти, газы, конденсаты вскрытых залежей 	Комплексные геохимические, битуминологические, гидро- и литохимические исследования в НГЗ при бурении скважин и детальных геофизических работах; исследование химического и фазового составов УВ залежей

Рис. 107. Схема проведения геохимических поисков

двое, число проб в каждом пункте наблюдения увеличивается до 2—5.

Конечный результат прогнозно-рекогносцировочных работ — оценка геохимического поля исследуемой зоны и отдельных локальных поднятий (площадей) в ее пределах, выработка рекомендаций к постановке поискового бурения с оценкой прогнозных ресурсов по категориям D_2 и D_1 . Результаты геохимических наблюдений представляются в виде карт среднего масштаба с выделением геохимических аномалий по степени их контрастности и объяснительной записки к ним с обоснованием рекомендаций по проведению дальнейших поисковых работ, в том числе и более детальных ГПНГ.

Поисково-оценочные геохимические исследования. Поисково-оценочные работы проводятся по опорным горизонтам нижней геохимической зоны (НГЗ) с изучением особенностей геохимического поля по разрезу поисковых и специальных геохимических скважин, задачей которых является вскрытие как минимум верхнего опорного горизонта под региональным водоупором. Объектами исследования — керн глубоких скважин, ПЖ, пластовые воды. Газометрия ПЖ и керна с применением различных методов дегазации дополняется газовым каротажем скважин, литохимическими и битуминологическими исследованиями.

Плотность пунктов опробования увеличивается до 6—24 на 10 км², число проб в каждом пункте должно быть 5—20 в зависимости от особенности вскрываемого скважинами разреза.

Результаты геохимических исследований представляют в виде крупномасштабных геохимических карт (1:50 000—1:25 000), геолого-геохимических разрезов скважин, профилей и других графических материалов. Конечная цель этих исследований — прогноз нефтегазоносности локальных структур и участков возможного развития неструктурных ловушек с оценкой ресурсов (запасов) по категориям D_1 и C_2 ; выявление природы и детализация строения геохимических аномалий, выработка рекомендаций по очередности ввода в поисковое бурение локальных объектов.

Детальные геохимические исследования. Детальные исследования призваны уточнить размещение глубоких поисково-разведочных скважин на площадях с установленной нефтегазоносностью, оценить запасы по категориям C_2 и C_1 , усовершенствовать методику ГПНГ для данного района и районов со сходными чертами строения и развития. Плотность опробования увеличивается до 2,4—5 точек на 1 км², а число проб на точке до 20—60. Проводятся комплексные исследования состава нефтей и газов вскрытых залежей, выявляются особенности формирования аномалий в перекрывающих отложениях с учетом геологических данных. Комплекс исследований включает в себя газометрию керна и ПЖ, битуминологические, литохимические и гидрохимические наблюдения.

6.14. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА АКВАТОРИЯХ

Развитие морских нефтегазопроисловых работ на акваториях, в пределах которых открытые месторождения обеспечивают примерно 1/3 мировой

добычи нефти, требуют совершенствования различных методов поисков, в том числе геохимических. К настоящему времени опытно-методические работы проведены на акваториях Балтийского, Охотского, Черного, Азовского и Каспийского морей.

Геохимические поисковые работы на море можно разделить на площадную съемку и газовый каротаж по разрезу поисковых и разведочных скважин. Техника и методика каротажа аналогична рассмотренной в разделе 6.8.

Площадные исследования по способу проведения делятся на дискретные (отбор проб грунта, вод на разных глубинах, в том числе придонных, на станциях наблюдений) и непрерывные, направленные на определение водорастворенных газов (ВРГ) с движущегося судна, оснащенного аппаратурой для отбора вод и анализа газовой смеси. Целью этих исследований является выявление газопроявлений на дне акваторий, формирующих аномальные концентрации УВГ в перекрывающих водах.

Непосредственно в осадках, находящихся на стадии диagenеза, широко развиты процессы водо- и газообмена, интенсивного газообразования за счет ОВ осадков с активным участием микроорганизмов. Наряду с биогенным метаном этой зоны в ней находят непредельные УВГ. Содержание гомологов метана незначительно. Такая обстановка приводит к формированию высоких фоновых концентраций CH_4 ; выявить аномалии в осадках трудно, но, тем не менее, проведенные исследования показали, что в донных осадках наряду с CO_2 , N_2 , O_2 , H_2 , He и CH_4 , присутствуют гомологи метана, концентрация которых в основном составляет $n \cdot 10^{-4} \%$. Геохимическими съемками по сети $1,5 \times 2$ км выделяются зоны с повышенными концентрациями УВГ, связанные с линейными структурами, выявленными геофизическими методами. Аномальные содержания УВГ в осадках и придонных водах с характерным зонально-кольцевым распределением отмечены над продуктивными структурами (табл. 67).

Изотопные исследования углерода показали, что в метане над продуктивными структурами $\delta^{13}\text{C} = -54,4 \pm 0,6\%$, что соответствует

Таблица 67

Содержание углеводородных газов.

По В. П. Астафьеву и др. (1985 г.)

Участок	Газонасыщенность, см ³ /кг (л)	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	Количество образцов
Осадок						
Фоновый	45	15	0,01	0,05	0,05	380
Над газоконденсатной залежью	60	25	0,10	0,15	0,08	36
Вода						
Фоновый	22	0,03	0,015	0,05	0,020	350
Над газоконденсатной залежью	25	0,05	0,05	0,05	0,075	36

метану, образующемуся на более высокой стадии литогенеза, чем диагенез (в значительной мере этот метан эпигенетичный).

Более распространены методы непрерывной дегазации вод и анализа состава ВРГ методами хроматографии. В конце 50-х годов в США разработан газовый детектор «Sniffer» для обнаружения газопроявлений. Принцип работы детектора основан на всасывании через приемную линию морской воды с определенной глубины, ее дегазации и определении состава выделенной смеси газов методами газовой хроматографии. Результаты проведенных в Мексиканском заливе исследований были достаточно успешными.

В практике поисковых работ в нашей стране используется морская геохимическая автоматическая станция «Прогноз» (Южморгео), в конструкцию которой входит водозаборное устройство, размещенное в днище судна (производительностью 8—12 л/мин), блок подготовки анализа (фильтр очистки воды, дегазатор, мерный сосуд, генератор водорода для ДИП хроматографа) и блок газового анализа. Анализ газовой смеси проводится на хроматографе.

Применяется газоаналитическая установка МАГМАСС, в которой

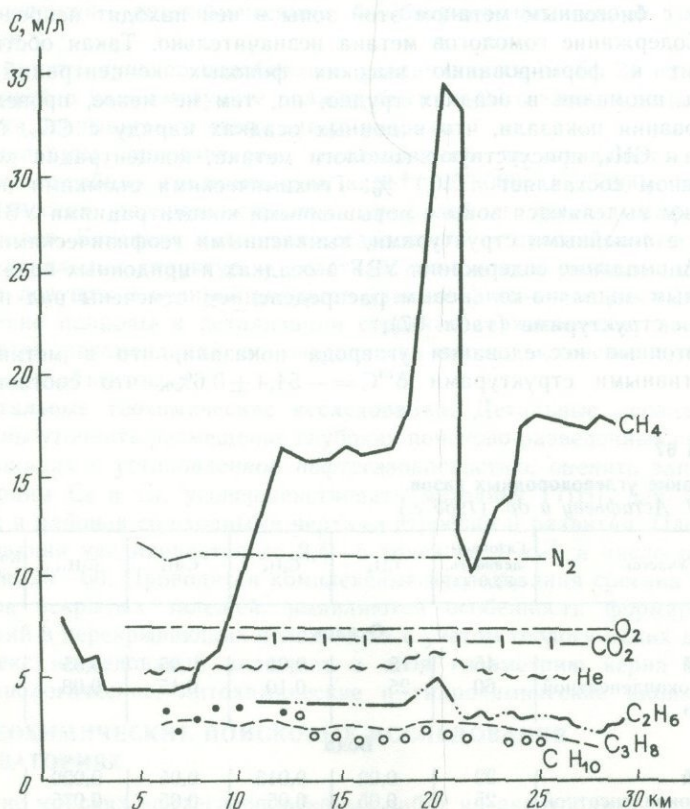


Рис. 108. Распределение газов на месторождении Бахар

исследование газовой смеси проводится на масс-спектрометре. Преимущества этого анализатора — быстрое действие и высокая плотность измерений (см. 6.7). Показательны исследования проведенные с МАГМАСС-2 на акватории Южного Каспия в районе газового месторождения Бахар. Газовая залежь располагается на глубине 3764—4218 м. В составе газа преобладает метан — 93%, гомологов C_2 — C_4 — 5,3%. Остальной объем приходится на N_2 , CO_2 . Содержание He равно $2 \cdot 10^{-3}\%$.

Распределение УВ и других газов в придонных водах над этой структурой показано на рис. 108. Содержание N_2 , O_2 , CO_2 отвечает равновесной растворимости воздуха при нормальных условиях. При средних для района фоновых концентрация CH_4 (0,02 мл/л) над месторождением Бахар выявлена очень контрастная аномалия, в пределах которой средние содержания УВГ на порядок выше фоновых.

В целом анализ ВРГ при исследованиях акваторий открывает весьма перспективное направление работ по повышению эффективности геохимических поисков нефти и газа.

6.15. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ГПНГ НА ЭВМ

При обработке материалов нефтегазопонсковой геохимии в различных организациях применяют статистические методы (для установления характера распределения УВ в области фоновых полей), методы ранговой, парной и множественной корреляции (для выявления природы полей концентраций УВ); тренд-анализ, дискриминантный анализ, методы распознавания образов и другие (для выявления полей нормальных и аномальных концентраций по площади и разрезу, для оценки перспектив нефтегазоносности различных элементов районирования НГБ).

Обработка данных при ГПНГ производится на двух уровнях: оперативном и итоговом. Первый входит в систему оперативной обработки данных (СООД) — ГПНГ и включает статистическую обработку результатов анализов, выявление корреляционных связей, определение нижних аномальных концентраций УВ, выделение аномалий. Решение этих задач осуществляется с использованием малых ЭВМ. Задачей итогового уровня обработки данных является комплексный анализ геолого-геофизических и геохимических данных для оценки перспектив нефтегазоносности зон и площадей НГБ в цифрах прогнозных запасов на различных стадиях ГПНГ.

В задачи обработки данных ГПНГ входит на основе координат пунктов отбора проб исключение влияния природных неоднородностей среды на распределение УВ в исследуемом горизонте путем нормирования исходных концентраций, исключение влияния закономерных изменений (тренда) в распределении исходных концентраций, компонентов УВ с глубиной определение граничных значений нормального поля путем аппроксимации региональной составляющей поля концентрации детерминированными функциями координат или методами тренд-анализа и других анализов, выделение полей аномальных концентраций с оценкой их достоверности; выявление природы аномалий на основе корреля-

ционного анализа связей между различными факторами, определяющими механизм и динамику формирования поля концентраций; прогноз нефтегазоносности локальных объектов с аномальными характеристиками полей концентрации УВ. Для решения этих задач разработаны вычислительные программы для ЭВМ ЕС-1022.

Методологической основой обработки геохимических данных математическими методами являются формализованные представления о геохимических полях и комплексный подход к решению задач ГПНГ, реализуемый в автоматизированной системе обработки данных — АСОД — ГПНГ, применительно к различным стадиям геохимических исследований (см. 6.13).

АСОД — ГПНГ включает в себя систему сбора, хранения, обработки и картографирования геолого-геохимических данных с помощью ЭВМ и предусматривает взаимосвязанную организационную структуру проведения исследований, а также стандартизацию полевых и лабораторных работ, комплексирование их с геолого-геофизическими работами на нефть и газ. Подробное изложение принципов и метода АСОД — ГПНГ дано в работе [28].

6.16. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО ЗАПАСАМ. МИРОВЫЕ ЗАПАСЫ И ДОБЫЧА

Месторождения нефти и газа могут состоять из одной или нескольких промышленных залежей (скопления) углеводородного сырья, размещенных по глубине или в плане в пределах единой пространственно ограниченной геологической структуры. Принятая классификация месторождений нефти по запасам разделяет их на мелкие (менее 10 млн. т), средние (10—30 млн. т) и крупные (30—300 млн. т). Сходное деление по масштабу запасов (в млрд. м³) принято для месторождений природного газа. В этих классификациях нет постоянного модуля, определяющего принцип их построения и не соблюдены требования равенства ширины классов. Это исключает реализацию на их основе преимуществ, вытекающих из равенства запасов в классах и принципа геометричес-

Таблица 68

Классификация месторождений нефти и газа по запасам (1988 г.)

Полезное ископаемое	Тип классификации	Запасы в месторождениях			
		мелкие	средние	крупные	уникальные
В млн т					
Нефть	Принятая Десятичная (средина класса)	< 10	10—30	30—300	> 300
		1	10	100	1000
В млрд м³					
Газ	Принятая Десятичная (средина класса)	< 10	10—30	30—500	> 500
		3	30	300	3000

Таблица 69

Мировые запасы и добыча нефти и газа в основных нефтегазодобывающих странах в 1984—85 гг.

Страна	Суммарные извлекаемые запасы нефти и газа на 1.01.86 г.		Добыча	
	Нефть, млрд т	Газ, трлн м ³	Нефть и газо-конденсат, млн т	Газ, млрд м ³
Всего (без социалистических стран)	78	54	2777	2112
СССР			595 (615**)	646 (686**)
США	3,6	5,5	495,6	494
Саудовская Аравия	23,4	3,4	168,7	7*
Мексика	6,7	2,2	150,9	29
КНР			128**	18**
Великобритания	1,7	0,9	127,1	44
Иран	5,3	13,3	109,9	14*
Венесуэла	4,1	0,3	88,7	3,5
Канада	0,9	2,8	84,4	11
Нигерия	2,2	1,3	73,3	2,7*
Ирак	5,9	0,8	69,9	0,7*
Индонезия	1,1	1,0	61,0	30
Объединенные Арабские эмираты	4,4	0,9	59,2	9,8
Кувейт	12,8	1,0	51,3	4,0
СНАЛД (Ливия)	1,8	0,6	50,5	5,0*
Нидерланды	0,03	1,4	38,0	25,4
Алжир	1,1	3,0	29,4	39,0*

* — данные 1984 г., ** — данные 1986 г.

кого подобия однотипных фигур различной крупности (см. 1.24). Такие классификации затрудняют расчетное обоснование методики поисков и неприемлемы для практики геохимических работ. Между тем принятые деления месторождений нефти и газа по запасам без больших отступлений укладываются в десятичные классификации (табл. 68).

Крупнейшее в мире нефтяное месторождение Гавар в Саудовской Аравии с начальными запасами 10 млрд т, согласно десятичной классификации отвечает середине класса феноменальных месторождений на границах 3,0—30,0 млрд т нефти. Месторождение открыто в 1948 г. на глубине 1,5—2,0 км, оно входит в нефтегазоносный бассейн Персидского залива. Наряду с десятичной возможно построение двоичной, троичной, восьмиричной и других рациональных классификаций, удовлетворяющих требованиям поисковой практики.

Мировые запасы и ежегодная добыча нефти и газа охарактеризованы в табл. 69.

ПРОИЗВОДСТВО ПОЛЕВЫХ, ЛАБОРАТОРНЫХ И КАМЕРАЛЬНЫХ РАБОТ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

7.1. ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ОСНОВА ГЕОХИМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Поисковые геохимические съемки масштаба 1:200 000 и мельче в наземных пешеходном и автомобильном вариантах выполняются без предварительной или попутной геодезической подготовки, путем опознавания маршрутов и точек измерений (пробоотбора) по топографическим картам ближайшего более крупного масштаба. Одновременно с нанесением маршрута на топографическую карту исполнитель геохимической съемки ведет в полевом журнале абрис, отмечая на нем характерные ориентиры, определяющие привязку маршрута к местности. При точечных наблюдениях на карту и в абрис наносятся каждая 5-я — 10-я точка из числа надежно опознаваемых на местности.

Аэрогеохимические съемки любых масштабов над сушей сопровождаются радиолокационной, радиогеодезической или фотопривязкой с последующим перенесением маршрутов на карты рабочего масштаба. При недостатке местных ориентиров (песчаная пустыня, тайга и т. п.), а также над акваториями взамен пассивной привязки маршрутов применяются радионавигационные системы активного самолетовождения.

Наземные геохимические съемки масштаба 1:50 000 и крупнее выполняются на основе топографических карт того же или более крупного масштаба с предварительной инструментальной прокладкой опорных магистралей через каждые 10 см в масштабе отчетной карты. Направление магистралей выбирается параллельно господствующему простиранию геологических структур с опорой на пункты триангуляции III класса. По нормали к магистральям прокладываются профили геохимической съемки в масштабах 1:25 000—1:50 000 по буссоли с измерением расстояний шнуром и пикетажем через 40—50 м. Съемки масштаба 1:10 000 и крупнее производятся по заранее подготовленной или попутно разбиваемой сети профилей с пикетажем через 20—25 м с измерением горизонтального проложения линий.

При геохимических съемках любых видов для полевого пробоотбора и последующей геологической интерпретации выявленных аномалий необходимо пользоваться контактными отпечатками аэрофотосъемки. Отчетные карты геохимических съемок должны составляться в соответствии с номенклатурой и разграфкой топографических карт соответствующего масштаба (см. 1.28).

7.2. ОТБОР ПРОБ ПРИ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

Отбор проб производится главным образом из современных или более древних продуктов выветривания горных пород: из аллювиальных отло-

жений гидросети — при поисках по литохимическим потокам рассеяния, из элювиоделювиальных образований — при наземных поисках по вторичным остаточным или наложенным ореолам рассеяния, из древних кор выветривания — при глубинных литохимических съемках.

Попытки механизации полевых работ путем создания самоходных агрегатов для автоматизированного пробоотбора из рыхлых образований с заданным шагом делались в Казахстане еще в начале 60-х годов. Хотя возможности в этом направлении существуют именно в условиях степных районов со сглаженным рельефом, производственного применения эти агрегаты не получили. При редкой сети пробоотбора для переездов между точками применяются различные транспортные средства, до вертолетов включительно. Однако основные объемы поисковых и детальных литохимических съемок выполняются с шагом пробоотбора 20—50 м и только региональные съемки на первой стадии — с шагом 250—500 м. В итоге, полевой пробоотбор при литохимических съемках до сих пор ведется средствами ручного труда, по правилам, сложившимся еще в начале 30-х годов.

Бригада в составе ст. техника (мл. геолога) и двух-трех рабочих за летний полевой день при съемках по потокам рассеяния отбирает от 20 до 40 проб, при съемках по вторичным ореолам рассеяния с шагом 50—20 м — от 120 до 150 проб. Нормы выработки на отбор литохимических проб зависят от характера местности, масштаба съемки, глубины взятия проб и определяются действующими сметными справочниками (СУСН).

Пробы литохимической съемки отбираются точечным («горстьевым») способом при гомогенном песчано-глинистом характере рыхлых отложений ниже растительного слоя, с глубины 15—20 см. При щебенистом характере элювиоделювиальных образований или каменистом аллювии в пробу отбирается «мелкозем» — из песчано-глинистой или соответственно илисто-глинистой фракции отложений. При наличии торфяников глубина пробоотбора может увеличиваться до 0,5—0,6 м, редко больше. Во всех случаях отбор проб целесообразен с минимальной глубины, обеспечивающей надежное выявление объектов поисков. В широком диапазоне геологических и ландшафтно-геохимических условий таким «представительным горизонтом» для литохимических поисков служат ближайшие к поверхности почвенные горизонты А, А+В, В. Увеличение глубины пробоотбора без специальной необходимости лишь удорожает литохимические поиски. В недавно перемытом аллювии почвенные горизонты не развиты и пробы отбираются с 10—15 см, при глубинных литохимических съемках представительными для опробования являются верхние горизонты пестроцветной коры выветривания или базальный горизонт чехла. В других случаях глубина пробоотбора выбирается по результатам опытных работ.

Для отбора проб служат заранее нумерованные мешочки из светлой материи с завязками, размером 10—12×18—20 см. Начальная масса пробы составляет около 200 г, после сокращения масса пробы уменьшается до 50 г.

Полевая документация пробоотбора ведется в полевых журналах единого образца [17] с указанием номеров профилей (маршрутов),

точек, мешочков и ведением абриса. В абрис заносятся геологические и геоморфологические наблюдения, сведения о рельефе местности, характере растительности, типе опробуемых отложений, особо отмечаются местные ориентиры, старые горные выработки и находки рудных свалов. Точки пробоотбора необходимо четко обозначать, особенно в местах слияния рек (рис. 109). Пройденные за день маршруты (профили) в тот же день выносятся на сводную схему обработки трапеции с указанием исполнителей работ.

В районах Крайнего Севера при литохимической съемке на участках сплошного развития грубообломочного материала (курумов) для отыскания мелкозема допускаются отступления от точек съемочной сети ($\pm 10\%$ расстояний между профилями и пикетами). В мерзлотнотундровых ландшафтах при поисках по вторичным ореолам рассеяния хорошие результаты могут быть получены при опробовании глинистого материала криогенных медальонов.

Выбор гранулометрической фракции, направленной на анализ, также можно отнести к операции пробоотбора. В практике литохимических поисков принято направлять на анализ мелкую фракцию пробы, поскольку при небольшой массе пробы наличие крупных обломков неизбежно ухудшает воспроизводимость опробования. Основные количества рудных элементов нередко сосредоточены в различных гранулометрических фракциях пробы, что ставит под сомнение полезность их фракционирования.

В некоторых случаях неравномерность распределения рудных элементов в различных фракциях проб проявлена весьма отчетливо. Так, в одном из районов Индии, где известны оловоносные пегматиты с крупнокристаллическим касситеритом, более 90% Sn обнаруживается во фракции крупнее 0,2 мм (+70 меш) (рис. 110), а в районе оловянных месторождений Малайзии основное количество олова сосредоточено во фракции —80 меш.

В пустынных районах с эоловым разубоживанием потоков рассеяния в аллювии сухих русел и ореолов рассеяния в элювиоделювии хорошие результаты дает анализ фракции $-1+0,25$ мм, поскольку от 70 до 100% материала эолового происхождения имеет размер частиц менее 0,25 мм и при просеивании удаляется в отвал.

В практике зарубежных исследований в районах влажных тропиков при литохимических поисках успешно используется фракция —80 меш ($-0,177$ мм) аллювия и почв. В этой фракции в силу высокой степени дезинтеграции пород и руд при химическом выветривании,

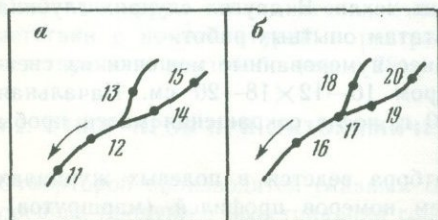


Рис. 109. Документация пробоотбора при съемках по потокам рассеяния

a — правильное размещение проб; *b* — неправильное

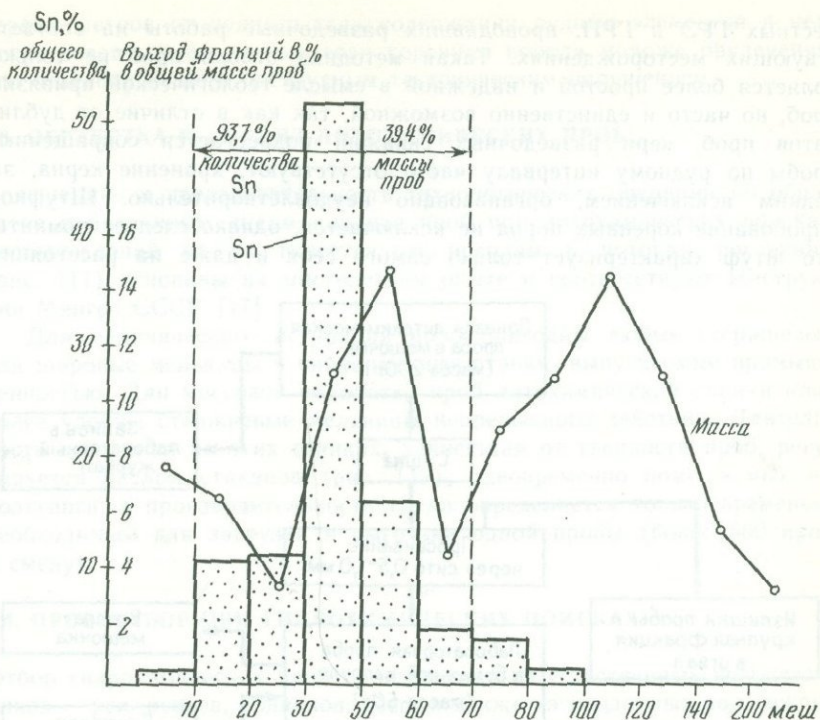


Рис. 110. Распределение олова по фракциям элювиоделювия

а также высоких сорбционных свойств глинистых частиц концентрируются многие металлы.

Геохимическое опробование горных выработок, керн разведочных скважин и коренных пород в обнажениях проводится при литохимических поисках по первичным ореолам на стадии детальных или разведочных работ в масштабах 1:10 000 и крупнее, до 1:200 включительно. Полноценное поисковое значение опробование коренных (рудовмещающих) пород приобретает только при условии его непрерывности. Это достигается опробованием горных выработок и керн скважин методом «пунктирной борозды» путем объединения в одну пробу 8—10 сколов породы с заданного интервала. Длина интервала опробования в пределах рудной зоны составляет обычно 1—2—5 м, на периферии рудного поля до 20 м, масса пробы 300—400 г. После дробления, сокращения и истирания масса пробы составляет 50—100 г. Рудное тело и его первичный ореол представляют собой единую, сложно построенную литохимическую аномалию (см. 2.2), поэтому изолированное (в отрыве от рудного тела) опробование и изучение геохимических характеристик первичных ореолов недопустимо и способно привести только к неустойчивым выводам. Для исследования первичных ореолов и зональных характеристик рудных пересечений производится отсыпка навесок массой 20—50 г из дубликатов проб, хранящихся в архивах

местных ГРЭ и ГРП, проводивших разведочные работы на соответствующих месторождениях. Такая методика отбора проб не только является более простой и надежной в смысле геологической привязки проб, но часто и единственно возможной, так как в отличие от дубликатов проб, керн разведочных скважин подвергается сокращению, пробы по рудному интервалу часто отсутствуют, хранение керна, за редким исключением, организовано неудовлетворительно. Штуфное опробование коренных пород не исключается, однако следует помнить, что штуф характеризует только самого себя и даже на расстоянии

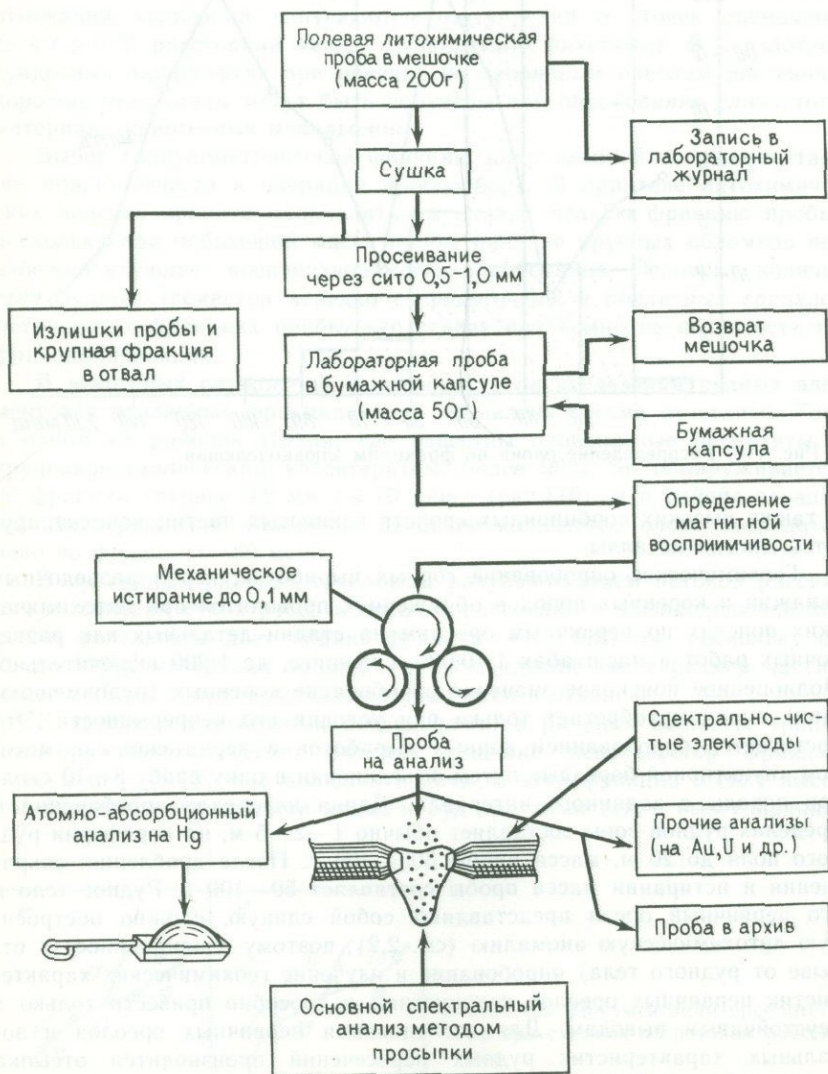


Рис. 111. Схема обработки и анализа литохимических проб

первых метров от рудного тела содержания рудных элементов в нем могут оказаться фоновыми, если коренная порода моложе оруденения или отделена от него пострудным тектоническим нарушением.

7.3. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ПРОБ

Содержание и последовательность технологических операций по обработке и различным видам анализа проб при литохимических поисках месторождений по их гипергенным ореолам и потокам рассеяния (рис. 111) основаны на многолетнем опыте и соответствуют Инструкции Мингео СССР [17].

Для механического истирания проб пригодны любые стержневые или шаровые мельницы и вибрационные станки, выпускаемые промышленностью. Для массовой обработки проб литохимической съемки наиболее удобны стержневые мельницы непрерывного действия. Длительность истирания на этих станках, зависящая от твердости проб, регулируется числом стаканов (рис. 112), одновременно помещаемых на рольганги, а производительность труда определяется только временем, необходимым для загрузки и выгрузки одной пробы (более 500 проб в смену).

7.4. ПРОБООТБОР ПРИ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

Отбор гидрохимических проб производится из естественных водоисточников — рек, ручьев, родников, озер, а также из подземных вод, вскрываемых горными выработками и скважинами. Ультрамалые концентрации микроэлементов, на которые ориентированы гидрохимические поис-

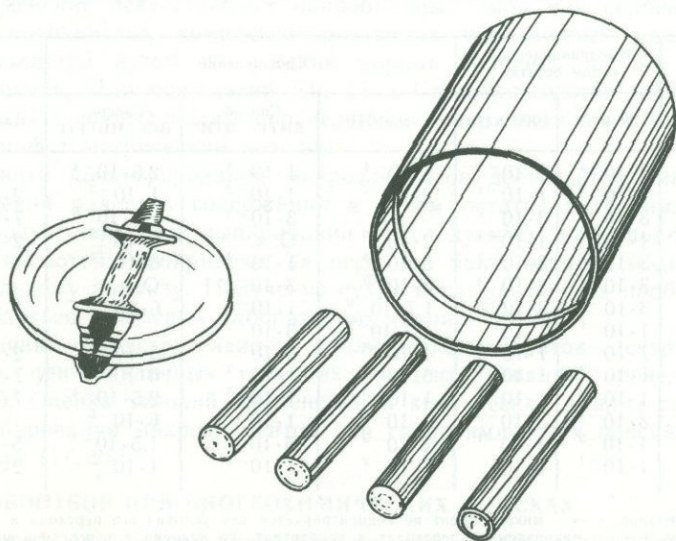


Рис. 112. Стакан стержневой мельницы для растирки проб

ки, требуют высокой чистоты посуды и затрудняют хранение проб вследствие микробиологических и химических реакций, протекающих в воде, осаждения металлов взвесями и на стенках сосуда. Наиболее перспективными (особенно при мелкоасштабных работах) являются методы концентрирования растворенных микрокомпонентов путем их перевода в твердую фазу непосредственно у водоисточников и последующего анализа концентратов (см. 7.5). Пробу в объеме 0,5—1,0 л рекомендуется отбирать в полиэтиленовую посуду, которая в меньшей степени взаимодействует с водой. После определения рН воду для консервации подкисляют безметалльной соляной или серной кислотами [25]. Мутные воды требуют отстоя и фильтрации. Опробование подземных водоносных горизонтов производится специальными прободборниками после предварительной промывки скважин и откачки воды.

7.5. МЕТОДЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОДЫ

Для перевода рудных элементов из раствора в осадок непосредственно у водопунктов предложены различные способы (табл. 70).

Способ ТПИ (Томского политехнического института) основан на соосаждении микроэлементов с гидроксидом алюминия в присутствии сульфида натрия. Основные компоненты минерализации воды при этом в осадок не переходят. В пробу объемом 1 л вводят 2 мл 0,5 нормального раствора сернистого натрия и через 5 минут — 1 мл 2,5 нормального раствора сернокислого алюминия в 0,5 нормальной серной

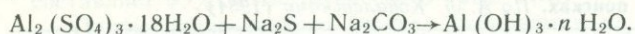
Таблица 70

Чувствительность спектрального анализа концентратов природных вод (мг/л) [25]

Элемент	Выпаривание при сухом остатке		Соосаждение			Сорбция
	100 мг/л	1000 мг/л	Способ ТПИ	Способ ВИТР—ЛТИ	Способ ВСЕГИНГЕО	Способ АК
Bi	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	—
W	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Au	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	—	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Cd	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	О. н.	$6 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Co	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	+
Cu	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	О. н.	+
Mo	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
As	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^0$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	—	—
Ni	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Sn	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Pb	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Ag	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$	+
Sb	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Zn	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Примечание. «—» — микроэлемент не концентрируется или условия его перехода в концентрат не изучены; «+» — микроэлемент переходит в концентрат, но условия его перехода не изучены; «О. н.» — определение невозможно из-за наличия этого элемента во вносимых реактивах.

кислоте, а затем добавляют несколько миллилитров 1 нормального раствора соды. Реакция идет по следующей схеме:



Через 25—30 мин гидроксид алюминия осаждается на дне сосуда вместе с сульфидами и гидратами оксидов металлов.

Способ ВИТР—ЛТИ (Всесоюзного института методики и техники разведки и Ленинградского технологического института) основан на соосаждении микроэлементов с CdS в присутствии FeCl₃. В 1 л исследуемой воды вводят 2 мл раствора FeCl₃, содержащего 2,5 мг/мл Fe³⁺, добавляют 11 мл 0,4 нормального раствора CdCl₂, а затем 10 мл 0,4 нормального раствора Na₂S. Через 5—6 мин осаждается CdS совместно с сульфидами микроэлементов. Осадки отфильтровывают, сушат и направляют на спектральный анализ.

Способ АК (адсорбционно-комплексобразовательный) разработан во ВСЕГИНГЕО. Микроэлементы сорбируются групповым реактивом, состоящим из спектрально-чистого углерода с органическими комплексобразователями. К 1 л исследуемой воды с pH 5,0—5,5 добавляется порошок тиоацетамида, после его растворения — групповой реактив. Через 15—20 мин осадок отделяется, сушится, озольется и анализируется спектральным методом в присутствии буфера, содержащего сернокислый калий и диоксид германия.

Способ ВСЕГИНГЕО основан на осаждении микроэлементов органическими коллекторами (сульфанил-оксином и родамином 6 Ж) при pH 6 в присутствии гидроксида алюминия.

При некоторых различиях в перечне концентрируемых элементов рассмотренными методами извлекаются в осадок более 20 химических элементов.

Применение искусственных ионообменных смол или сорбентов на основе волокнистых комплексообразующих производных целлюлозы осуществляется путем погружения порции сорбента на 3-4 дня в водоисточник. Для осаждения Rb, Li и Cs используются ионообменные смолы с последующим определением содержания этих элементов пламенно-фотометрическим методом.

Полнота концентрирования микроэлементов достигается лишь при определении валового содержания в сухом остатке гидрохимических проб, полученном при выпаривании. Исследуемую воду подкисляют серной кислотой, выпаривают на песчаной бане, остаток подвергают спектральному анализу. Получение сухих остатков водных проб может производиться в полевых лабораториях (типа ГХЛ-2).

Сведения о чувствительности анализов концентратов спектральным методом при различных способах концентрирования приведены в табл. 70. Оценка условий применения и критический анализ способов концентрирования микроэлементов при гидрохимических поисках даны в работах [17, 25].

7.6. ПРОБООТБОР ПРИ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

Отбор проб при биогеохимических поисках требует стандартизации: постоянства вида, органа и фенологической фазы опробуемых расте-

Таблица 71

Характеристики растений, рекомендуемых для опробования при биогеохимических поисках. По А. Л. Ковалевскому (1984)

Виды растений	Части растений	Наиболее информативные микроэлементы
<i>Глубина корневой системы 5—20 м</i>		
Сосна обыкновенная	Шишки	Li, Rb, Cs, Ag, Au, Be, Ra, Zn, Hg, Pb, As, Sb, Bi, Cr, Mo, W, Ni
	Внешние слои корки стволов	Li, Au, Be, Sr, Ba, Ra, Zn, Hg, Sn, Pb, As, Sb, Bi, W, Mn
Полынь	Надземные части	Rb, Be, Ra, Zn, As, Mo
<i>Глубина корневой системы 1—5 м</i>		
Береза бородавчатая и плосколистная	Корка стволов	Rb, Cu, Ag, Au, Be, Sr, Ba, Ra, Zn, Hg, B, Tl, Pb, As, Sb, Bi, W, F
Лиственница даурская и сибирская	Внешние слои корки стволов	Cu, Au, Be, Sr, Ba, Ra, Zn, Hg, Tl, Pb, As, Bi, W, Mn
Кедр сибирский	То же	Rb, Ag, Au, Sr, Ra, Zn, Hg, Pb, Bi, Mo, W
Ель сибирская	Корка стволов	Rb, Au, Sr, Ba, Ra, Hg
Пихта сибирская	То же	Rb, Au, Sr, Ba, Ra, Zn
Осина дрожащая	То же	Rb, Cs, Au, Sr, Ba, Ra, Zn, Pb

ний. Опробуются части многолетних растений, «безбарьерных» к содержаниям рудных элементов в корнеобитаемом слое, из числа наиболее распространенных видов с глубокой корневой системой (табл. 71). При нарушении стандартных условий биогеохимических съемок (вследствие смены растительных ассоциаций или большого разрыва во времени) необходим двукратный перекрывающий пробоотбор в объеме не менее 30—50 точек [17].

Наиболее благоприятным временем опробования растений является осенний и осенне-зимний период после окончания вегетации. Масса отбираемых проб растительности обычно составляет около 50 г, что достаточно для выполнения спектрального анализа золы. Зольность сухого вещества растений колеблется от 0,2 до 35%, в среднем 2,5—3%. Пробоотбор документируется в полевых журналах, где приводится характеристика опробованных растений, растительных ассоциаций, составляется абрис местности, отмечается время дождей и другие сведения. Оценка качества биогеохимических съемок осуществляется путем повторно-контрольного пробоотбора в объеме не менее 5% [17].

7.7. ПРОБООТБОР ПРИ АТМОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

Отбор проб свободных и сорбированных газов ведется ниже зоны интенсивного газообмена пород с атмосферой. Рост содержаний газов

с глубиной имеет асимптотический характер, поэтому за нижнюю границу этой зоны принимается глубина, на которой содержание газов составляет 95% асимптотического (рис. 113).

Пробы подпочвенного воздуха отбираются из призабойных частей скважин, шпуров и т. п. Обязательное условие пробоотбора — изоляция газозаборной камеры от атмосферы. Глубина скважин должна быть не менее суммы мощностей зоны активного газообмена и слоя породы, из которого отбирается газ. Камера герметизируется вплоть до устья скважины.

Объем откачки должен обеспечить получение проб, отличающихся от состава подземной атмосферы не более, чем на ошибку анализа. Зависимость ошибки опробования δ от объема выкаченного газа K , отношения объемов камеры и газосборной системы $A = v_k/v_s$ и степени различия состава газа, заполняющего камеру до откачки и в подземной атмосфере $n = C_k/C_a$, определяются (табл. 72) из выражения

$$\delta = 1 - \frac{|n-1|}{A-1} \left[\exp(-k) - A \exp\left(-\frac{k}{A}\right) \right].$$

При натекании в камеру атмосферного воздуха после подъема бурового снаряда n равно 0, при разогреве стенок скважины во время бурения больше или равно 10.

В съемках по сорбированным газам отбираются пробы грунта. Порода помещается в широкогорлые банки объемом 0,5 л или в алюминиевые трубки диаметром 40—50 мм. Отбор в трубки производится задавливанием их в породу, что уменьшает соприкосновение проб

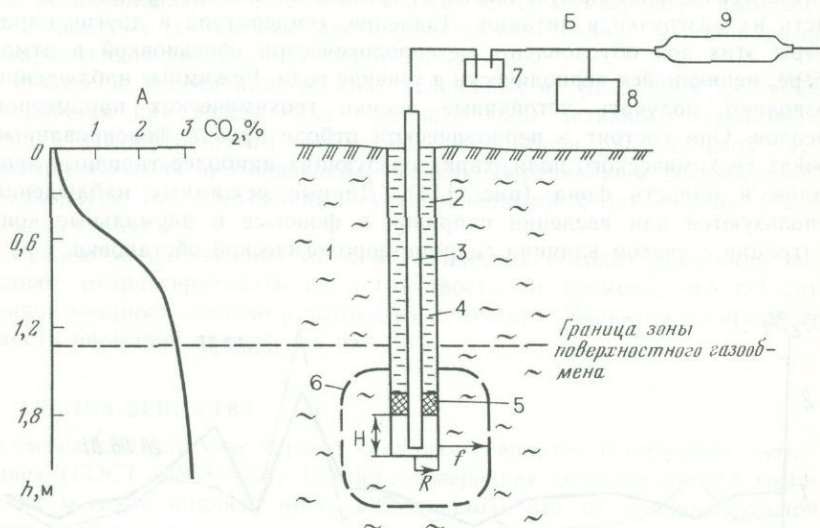


Рис. 113. Схема опробования подпочвенного воздуха

А — распределение газовых компонентов, Б — схема опробования. 1 — породы; 2 — ствол скважины; 3 — пробоотборник; 4 — глинистый раствор; 5 — пакер; 6 — контур зоны извлечения газа; 7 — фильтр-осушитель; 8 — газоанализатор; 9 — газовая ампула

Таблица 72

Зависимость ошибки пробоотбора от объема откачки

Кратность откачки К	Отношение объема камеры к объему системы			
	n=0		n=10	
	A=0	A=1	A=0	A=1
1	1,37	1,74	4,34	7,62
3	1,05	1,25	1,45	2,79
5	1,01	1,04	1,06	1,36
7	1,00	1,01	1,01	1,06

с атмосферным воздухом. Банки герметизируются крышками для консервирования, трубки — резиновыми пробками или заглушками [17].

При водно-гелиевой съемке опробуются водопункты. Пробы отбираются в бутылки емкостью 0,2—0,5 л. Вода напускается спокойной струей с трехкратной сменой объема сосуда.

Съемки в приземном слое атмосферы проводятся прямыми определениями газов-индикаторов или с предварительным концентрированием их на селективных сорбентах, фильтрах, в растворах.

7.8. РЕЖИМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Режимные наблюдения проводятся для изучения временной структуры геохимического поля при атмо- и гидрохимических поисках. В геохимических ореолах рассеяния распределение высокоподвижных компонентов (газы, растворы) зависит от физико-химических условий в области их разгрузки и питания. Давление, температура и другие параметры этих зон обусловлены метеорологической обстановкой в атмосфере, меняющейся периодически в течение года. Режимные наблюдения позволяют получить устойчивые оценки геохимических параметров ореолов. Они состоят в периодическом отборе проб в фиксированных точках геохимического поля, характеризующих наиболее типичные аномалии и область фона (рис. 114). Данные режимных наблюдений используются для введения поправок в фоновые и аномальные концентрации с учетом влияния гидрометеорологической обстановки.

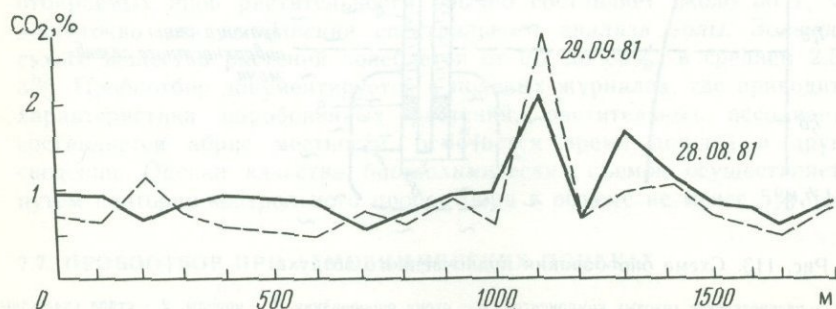


Рис. 114. Воспроизводимость аномалий в подпочвенном воздухе

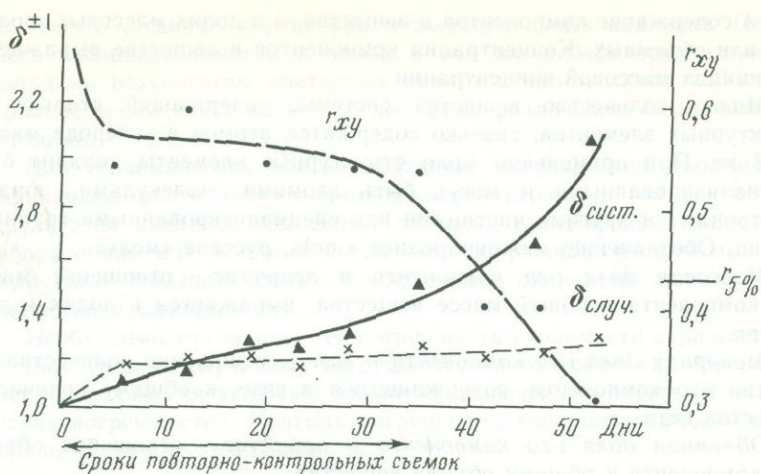


Рис. 115. Изменение параметров воспроизводимости режимных замеров

Режимные наблюдения проводят в составе опытно-методических работ, а также при необходимости в течение всего периода поисковых съемок. При гидрохимических съемках режимные исследования ведутся в соответствии с требованиями, предъявляемыми к опробованию водопунктов [17]. Режимные измерения содержаний газов в подземной атмосфере выполняются с помощью стационарных газоприемников с металлическими трубками, выведенными на дневную поверхность. Газоприемники устанавливаются на забой скважин и герметизируются выбуренной породой с глинистым раствором. Использование стационарных газоприемников уменьшает ошибки пробоотбора.

Режимное опробование рыхлых отложений на различных глубинах выполняется при определении мощности зоны активного газообмена пород с атмосферой, что необходимо для выбора рациональной глубины опробования при поисковых съемках. Вертикальное зондирование производится газоприемниками, установленными с интервалом 0,2—0,4 м до глубины 2 м.

Режимные наблюдения на атмосферических ореолах рассеяния позволяют охарактеризовать их устойчивость во времени, что служит оценкой мощности газового потока из источника. Характер воспроизводимости аномалий показан на рис. 115.

7.9. АНАЛИЗ ВЕЩЕСТВА

По смысловой нагрузке термин «анализ» совпадает с термином «измерение» (ГОСТ 16263—70). Термин «измерение» допускается для физических методов анализа проб, выполняемых без их предварительной химической подготовки к анализу.

Единицы количества вещества и содержаний компонентов в веществе* в международной системе единиц выражаются в кг и в мо-

* Материал излагается по СТ СЭВ 1052—78 и РД 50—160—79.

лях, а содержание компонентов в веществе — в долях массовых, молярных или объемных. Концентрация компонентов в веществе выражается в единицах массовой концентрации.

Моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специализированными и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специализированными группами частиц. Обозначение: международное «mol», русское «моль».

Массовая доля i -го компонента в веществе — отношение массы i -го компонента к общей массе вещества, выражается в долях и процентах.

Молярная доля i -го компонента в газе — отношение количества вещества i -го компонента, содержащегося в газе, к общему количеству вещества газа.

Объемная доля i -го компонента в веществе — отношение объема i -го компонента к общему объему вещества.

Массовая, молярная и объемная доля компонента вещества — относительные безразмерные величины. В связи с этим единицами названных величин являются доли. Не допускается в этом случае использовать единицы г/кг, $1/\text{м}^3$, г/г и т. д. Массовые концентрации — размерные величины. Они выражаются в единицах г/т, мг/л или $\text{кг}/\text{м}^3$. Термин «концентрация» по отношению к безразмерным величинам использовать не следует.

7.10. КАЧЕСТВО АНАЛИЗОВ

Качество анализов определяется их точностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью. Обобщенной характеристикой качества анализов является *точность* (рис. 116).

Количественной характеристикой качества анализов является погрешность. Высокой точности анализа соответствует малая погрешность и наоборот. Сходимость и воспроизводимость количественно оценивается «погрешностью сходимости» и «погрешностью воспроизводимости». Типичный пример «погрешности воспроизводимости» — по-



Рис. 116. Обобщенная характеристика качества анализов

грешность, устанавливаемая при межлабораторных анализах. Погрешность воспроизводимости в одной и той же лаборатории устанавливается по результатам повторных анализов одним и тем же методом в разное время или в одно и то же время различными аналитическими методами.

Для геохимических поисков различие погрешностей сходимости и воспроизводимости имеет принципиальный характер, так как точность результатов анализов геохимических проб, выполненных в различных лабораториях или в одной и той же лаборатории различными методами (или в разное время), должна быть охарактеризована погрешностью воспроизводимости.

Необходимо учитывать, что погрешность сходимости отражает лишь средний уровень случайных погрешностей в то время как погрешность воспроизводимости включает также неисключенные остатки систематических погрешностей. Поэтому погрешность воспроизводимости обычно больше погрешности сходимости.

7.11. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Результаты анализа классифицируются по способу получения, по различию абсолютных средних случайных погрешностей определений, по величинам относительных погрешностей и по контролируемому параметру погрешностей.

Результаты прямых анализов получают непосредственно по опытным данным, например, взвешиванием.

Результаты косвенных анализов получают на основании известной зависимости между определяемой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Например, в одном из вариантов рентгеноспектрального метода содержание анализируемого элемента рассчитывают на основе результатов измерений интенсивностей флуоресцентного и некогерентнорассеянного на пробе излучения и последующих расчетов по определенной формуле. На практике чаще всего получают результаты косвенных анализов, реже — прямых.

Результаты равнорассеянных (равноточных) анализов характеризуются одним и тем же уровнем средних абсолютных случайных погрешностей. Анализы проб, выполненные с одинаковой средней относительной случайной погрешностью, являются равнорассеянными для логарифмов содержаний.

По величине относительных случайных погрешностей различают количественные и полуколичественные результаты анализов.

Граница между количественным и полуколичественным результатом условна. Целесообразно ее проводить на уровне 10—30% или, точнее, $1,1^{\pm 1}$ — $1,3^{\pm 1}$. Понятия «полуколичественный» или «количественный» относятся к результату анализа, но не к методу анализа, так как любой метод, даже прецизионный, в области предела обнаружения дает полуколичественные результаты.

Если по каждой пробе выполняются два определения в одинаковых условиях, но с разрывом во времени, то результаты, полученные в первый раз, называются первичными, во второй раз — повторными.

Если группа проб, проанализированная в одной лаборатории или одним аналитическим методом, направляется на контроль в другую лабораторию или на межметодический контроль в той же лаборатории, то результаты, полученные в контролируемой лаборатории или контролируемым методом, называются рядовыми или основными, а результаты, полученные в контролирующей лаборатории, — контрольными.

Параллельные определения (ПО) — проведение нескольких определений (измерений) для одной пробы в одинаковых условиях, подлежащих совместной обработке для получения результатов анализа. Термин ПО совпадает с принятым в метрологии термином «наблюдение».

7. 12. ПОГРЕШНОСТИ АНАЛИЗА

Погрешностью называется отклонение результата анализа от истинного значения измеряемой величины. Поскольку последнее всегда неизвестно, вместо него принимается значение, найденное по экспериментальным данным и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Различают абсолютную и относительную погрешности. Абсолютная погрешность выражается в единицах анализируемой величины. Относительная погрешность рассчитывается по отношению абсолютной погрешности к истинному значению анализируемой величины и выражается в долях единицы или процентах. Если сопоставляются результаты основных и контрольных анализов, то относительная погрешность рассчитывается по отношению к результатам контрольных анализов.

По природе погрешностей различают случайные и систематические погрешности. Случайная погрешность — составляющая погрешности результатов анализов, произвольно изменяющаяся при повторных анализах в одинаковых условиях. Случайная погрешность обусловлена влиянием многочисленных неподконтрольных факторов и поэтому непредсказуема в отдельных результатах ни по знаку, ни по величине. Экспериментально может быть оценен лишь средний уровень случайных погрешностей. Систематическая погрешность* — составляющая погрешности результатов анализов, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных анализах в одинаковых условиях. Эта погрешность может быть в значительной мере исключена введением поправок. Полностью исключить систематическую погрешность невозможно.

Показатели погрешностей могут быть нормируемыми (или допустимыми) и фактическими, первые устанавливаются директивным путем, вторые — на основе результатов параллельных или

* Следует различать понятия «систематическая погрешность» и «систематическое расхождение». Последнее используется, если результаты анализов двумя методами или двух лабораторий различаются значительно, однако неизвестно, какие из этих данных являются правильными. Перевод систематических расхождений в систематические погрешности производится по результатам специальных исследований.

повторных анализов. Установлены, например, допуски НСАМ на погрешность воспроизводимости результатов анализов минерального сырья и допуски Государственной комиссии по запасам (ГКЗ) на случайные погрешности. Допуски на точность результатов анализов проб при геохимических поисках, не являющихся минеральным сырьем, определяются действующей Инструкцией [17].

Численными показателями случайной погрешности являются: среднее квадратическое отклонение (СКО), среднее арифметическое отклонение (САО), размах и т. д. При анализе проб на содержание микроэлементов все промежуточные расчеты ведутся для логарифмов содержаний ($x = \lg C$) с последующим возвращением к натуральным числам.

Оценкой генерального СКО является выборочное СКО — s , а генерального САО — выборочное θ . Величины s и θ связаны соотношением: $s = 1,25 \theta$.

Если некоторая величина X проанализирована n раз и при этом получены результаты x_1, x_2, \dots, x_n , то в случае, когда величина генерального среднего μ известна (например, при анализах стандартных образцов)

$$s_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

Если μ неизвестно, то

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

где \bar{x} — среднее арифметическое из n значений x_i .

В случаях, когда для оценки s производятся двукратные параллельные анализы n проб и по каждой i -й пробе получены результаты x_i и y_i , то при наличии в двух сериях анализов различных по величине систематических погрешностей, постоянных для каждой серии

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{2(n-1)}}$$

где $d_i = x_i - y_i$ и $\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n}$.

Оценку СКО можно также рассчитать по размаху:

$$R = X_{max} - X_{min}$$

Переход от размаха к СКО для нормального распределения погрешностей производится по формуле

$$s = \beta R,$$

где коэффициент β берется из таблиц [17, 37]. Установлено, что расчет s может производиться и для результатов с распределением погрешностей, отличным от нормального.

Помимо средних случайных погрешностей рассматриваются предельные погрешности. Хотя теоретически возможно получить любые отклонения от средних погрешностей, практически их величина ограничивается некоторым числом k , кратным s . Это число зависит от закона распределения погрешностей и принятой доверительной вероятности (90, 95, 99%). Для нормального закона распределения погрешностей число k для доверительной вероятности 95% равно 1,96; для любого другого закона распределения погрешностей число k согласно неравенству Чебышева-Бьенэме не превышает 4,5.

Крупные погрешности не подлежат исключению из данных анализа; для уменьшения их влияния на окончательный результат используют робастные методы оценивания параметров (см. 2. 11).

Промахи, обусловленные путаницей в нумерации проб, ошибочным положением запятой в десятичном написании результатов и другими причинами, подлежат исключению из данных анализа, если установлено, что эти результаты являются промахами.

7. 13. ПРАВИЛА ОКРУГЛЕНИЙ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА

Три значащих цифры удерживают в результатах точных анализов при анализе на макрокомпоненты и при промежуточных расчетах. При полуколичественном анализе две цифры удерживают, если полученное число начинается с цифры 1 или 2. Одна значащая цифра удерживается, когда полученное число начинается с цифры 3 и более. В значении погрешности результатов удерживают не более двух значащих цифр.

Результаты анализов округляются до того же десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Результата анализа с округляемой цифрой 5 округляется до ближайшего четного числа.

7. 14. ПРЕДЕЛ ОБНАРУЖЕНИЯ

Предел обнаружения анализируемой величины — ее наименьшее значение, которое может быть надежно определено при однократных анализах по данной методике с применением конкретных средств измерений. Степень надежности оценивается принятой величиной доверительной вероятности. Не рекомендуется для понятия «предел обнаружения» использовать термин «чувствительность», так как этот термин имеет в метрологии другой смысл (ГОСТ 16263—70). Синонима рассматриваемого термина «порог чувствительности» следует также по возможности избегать, так как в метрологии «порог чувствительности» иногда относится не только к пределу обнаружения, но и к максимальному значению измеряемой величины, которая в данных условиях измерений не может быть определена.

Предел обнаружения рассчитывается по формуле $L=3s_0$, где s_0 — СКО, найденное при анализе стандартных образцов. Множитель «3», согласно неравенству Чебышева-Бьенэме, придает ему доверительную вероятность 0,90 и соответствует любому виду распределения, имеющему конечную дисперсию.

В практике геохимических поисков предел обнаружения имеет большое значение, так как значительная часть элементов, определяемых в геохимическом поле, характеризуется содержаниями, близкими к пределам их обнаружения применяемыми аналитическими методами.

7.15. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАВЫШЕНИЕ

Метрологическое завышение проявляется в завышении результатов анализов в области предела обнаружения L . Величина метрологического завышения становится практически незначимой при $C > 3$.

Кларки А. П. Виноградова для большинства химических элементов, имеющих атомный номер более 30, с 1956 г. по 1962 г. заметно снизились, что, очевидно, объясняется улучшением аналитических методов и пределов обнаружения.

7.16. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ АНАЛИТИЧЕСКИХ РАБОТ

Управление качеством аналитических работ (УКАР) осуществляется на основе информации, поступающей в результате внутрилабораторного и межлабораторного контроля.

При внутрилабораторном контроле оцениваются правильность результатов анализов, погрешности сходимости и воспроизводимости.

Правильность оценивается по результатам анализов стандартных образцов, при применении специальных приемов (разубоживание, способ добавок) и при межметодическом контроле. Одновременно с правильностью на основе результатов параллельных анализов оценивается погрешность сходимости.

Оценки погрешностей путем сопоставления результатов основных и контрольных анализов производятся в соответствии с действующими правилами (см. 7.12).

При направлении проб на межлабораторный контроль передача первичных результатов анализа контролирующей лаборатории совершенно недопустима и все вычисления погрешностей производятся сторонами (совместно или отдельно) после вручения проверяемой лаборатории результатов контрольного анализа. По итогам этих расчетов в специальной записке должно быть отражено качество аналитических работ в контролировавшейся лаборатории, приведены данные о величинах систематических и случайных погрешностей анализов и даны рекомендации по устранению установленных погрешностей с указанием их возможных причин.

7.17. СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Стандартные образцы (СО) — вещества (материалы), состав и свойства которых установлены при аттестации (см. ГОСТ 8.315—78).

Стандартные образцы предназначены для обеспечения единства и требуемой точности измерений посредством следующих операций: градуировки, аттестации и проверки средств измерений; аттестации методик выполнения измерений; контроля правильности результатов измерений; измерений состава и свойств веществ и материалов методом сравнения.

Основными метрологическими характеристиками СО, указываемыми в свидетельстве, являются значения аттестуемой характеристики СО и значение ее погрешности. Последняя обычно рассчитывается для 95% доверительной вероятности.

Стандартные образцы подразделяются на государственные (ГСО), отраслевые (ОСО) и СО предприятий (СОП).

Выбор категории СО определяется уровнем нормативно-технической документации, предусматривающей его применение, важностью измерений, выполняемых с используемыми СО и сферой реализации СО.

ГСО должны применяться: при выполнении работ органами государственной и ведомственной метрологической службы; для контроля правильности результатов анализов, выполняемых по методикам, регламентированным государственными стандартами, а также при выполнении особо точных и арбитражных анализов и для разработки ОСО и СОП.

ОСО применяются для контроля правильности анализов, выполняемых по методикам, регламентированным отраслевыми и республиканскими стандартами, для градуировки средств измерения и разработки СОП.

СОП применяются для контроля правильности результатов анализов, выполняемых по методикам предприятий и для градуировки средств измерения. Для градуировки могут применяться СО любых категорий; для контроля правильности результатов анализов проб при подсчете запасов минерального сырья — ОСО или ГСО.

Для градуировки анализаторов (помимо СО) могут использоваться контрольные пробы, изготовленные путем разбавления СО любых категорий и аттестованных на уровне предприятий.

ГСО горных пород, почв и донных осадков изготавливаются странами СЭВ (СССР, ГДР, НРБ, ВНР). В СССР, например, изготовлением ГСО занимаются следующие организации: ИГЕМ АН СССР (г. Москва), ВИМС МинГео СССР (г. Москва), ДВИМС (г. Хабаровск), НПО «Рудгеофизика» (г. Ленинград), «Союзпромгеофизика» (г. Калинин) и др. ОСО Мингео СССР изготавливает ПГО «Башкиргеология» (г. Уфа), «Уралгеология» (г. Свердловск), Киевский государственный университет и др.

7. 18. ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ (ЭСА)

ЭСА основан на регистрации спектров испускания атомов химических элементов в состоянии возбуждения [43]. Это позволяет проводить идентификацию элементов с помощью таблиц и атласов спектральных линий. О концентрации (массовой доле) химических элементов в пробе

судят по интенсивности аналитических линий или по вызываемому ими почернению на фотопластинке.

Интенсивность спектральных линий является функцией многих параметров. В практической деятельности учитывается, что интенсивность аналитических линий I связана с концентрацией элемента в пробе C формулой:

$$I = aC^b,$$

где a и b — параметры, устанавливаемые экспериментально путем фотографирования спектров эталонных проб.

Испарение пробы и возбуждение атомов с последующим излучением осуществляет источник света. При анализе геологических проб основным источником света служит электрическая дуга переменного тока (10—30 А), зажигаемая с помощью генераторов (ДГ-1, ДГ-2, ИВС-28 и др.). Образование спектра осуществляет спектральный прибор. Если спектр фиксируется на фотопластинку, прибор называется спектрографом, при фотоэлектрической регистрации — квантометром.

Основные приборы — дифракционные спектрографы типа ДФС-8 (рис. 117) и ДФС-13, комплектуемые дифракционными решетками 600, 1200 или 1800 штр/мм. В зависимости от применяемых решеток может быть получена разная дисперсия. Однако эти приборы не обладают большой светосилой. Хорошей дисперсией и светосилой характеризуется малогабаритный спектрограф, со скрещенной дисперсией — СТЭ-1 (рис. 118). Призмные спектрографы — ИСП-22, ИСП-28, ИСП-30 обладают небольшой дисперсией, но хорошей светосилой.

При геохимических поисках применяются полуколичественные и приближенно-количественные варианты эмиссионного спектрального анализа — (ПКЭСА), обладающие огромными преимуществами перед другими аналитическими методами, за исключением точности. Особенности ПКЭСА являются быстрота и простота выполнения, универсальность и массовость, возможность одновременного определения большого числа элементов.

Таблица 73

Пример аналитических линий [43]

Линия, нм	Энергия возбуждения, эВ	Интервал концентраций, %	Мешающий элемент	
			Линия, нм	Концентрация, %
Pb 283,307	4,40	$2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$	Ta 287,336	3
Pb 287,332	5,60	$1 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-1}$	Cr 287,348	3
Zn 334,502	7,78	$1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$	Mn 334,535	1
Zn 334,557	7,78	$3 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-1}$	Ca 334,45	5
			Cr 334,537	1
Sn 317,505	4,33	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	Mo 334,556	0,1
Sn 304,412	4,30	$1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$	Fe 317,544	10
			Cr 303,419	0,1
			W 303,420	0,1
Sn 242,950	5,50	$1 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-1}$	Mo 242,941	3

Рис. 117. Оптическая схема спектрографа ДФС-8 [43]

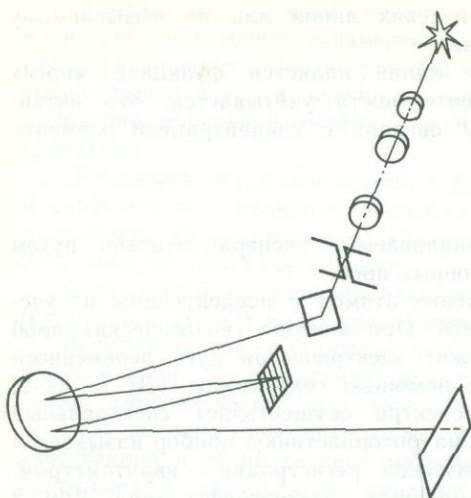
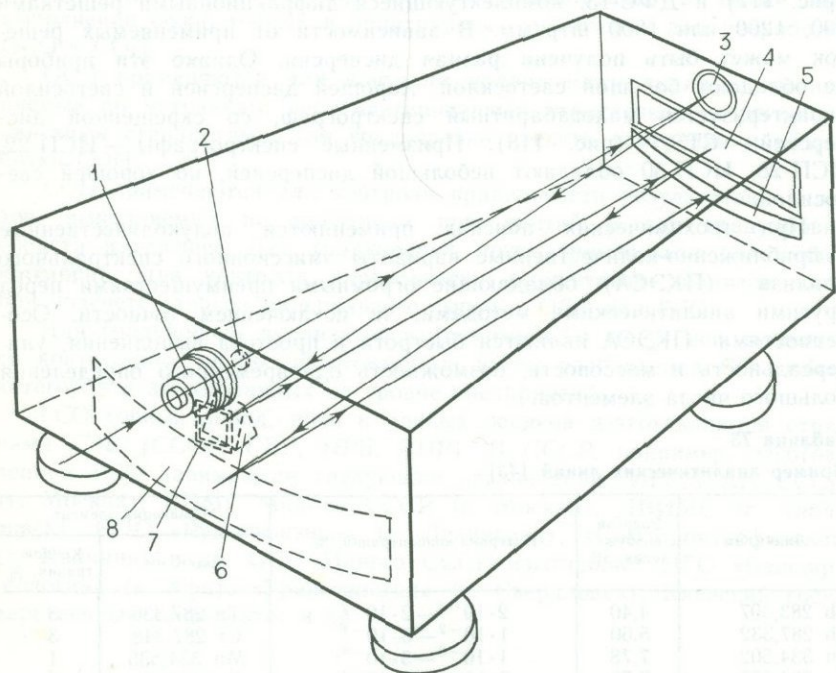


Рис. 118. Оптическая схема спектрографа СТЭ-1

1 — входная щель; 2 — цилиндрическая линза; 3 — сферический зеркальный объектив коллиматора; 4 — плоское поворотное зеркало; 5 — фотопленка или фотопластинка; 6 — сменная призма; 7 — сменная дифракционная решетка; 8 — сферический зеркальный объектив камеры



При ПКЭСА порошковые пробы вводятся в зону разряда способом просыпки-вдувания или испарением из кратера угольного электрода. При просыпке-вдувании улучшаются пределы обнаружения легко- и среднелетучих элементов, воспроизводимость результатов анализа и достигается более высокая производительность труда за счет уменьшения экспозиции до 20—30 сек.

Специальные аппараты массового ПКЭСА (УСА-4, УСА-5, УСА-6, АИ-3 и др.) позволяют автоматизировать введение порошковых проб в зону разряда.

При поисковых литохимических съемках в пробах определяются содержания до 40 химических элементов [17], при детальном анализе количество определяемых элементов сокращается. В табл. 73 приведены характеристики аналитических линий, по интенсивности которых определяются содержания Pb, Zn и Sn в пробах.

При визуальной оценке концентраций (полуколичественный анализ) для рассмотрения спектрограмм используются увеличительные аппараты-спектропроекторы, лупы; для количественной оценки почернений аналитических линий — микрофотометры, денситометры. Не следует считать, что точные результаты анализа обеспечиваются лишь инструментальным фотометрированием. Точность результатов зависит от многих факторов и, как показывают межлабораторные эксперименты, иногда точность «полуколичественных» методов выше, чем точность результатов, полученных при инструментальном фотометрировании. Поэтому следует делить на «полуколичественные» и «количественные» не методы, а результаты анализов.

При геохимических поисках к ПКЭСА предъявляется жесткое требование — получение результатов анализа не менее чем с десятью дискретными цифрами на каждый порядок содержаний определяемых элементов. Этот обязательный ряд (1; 1,2; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8) с достаточным приближением соответствует равномерной логарифмической шкале (рис. 119). Все результаты анализа должны выражаться в конкретных цифрах, не допускаются символы «>», «следы» и т. д.). Из двух близких результатов двукратного анализа одной пробы вычисляется среднее геометрическое содержание с округлением до одной или двух значащих цифр. При расхождениях между двумя анализа-

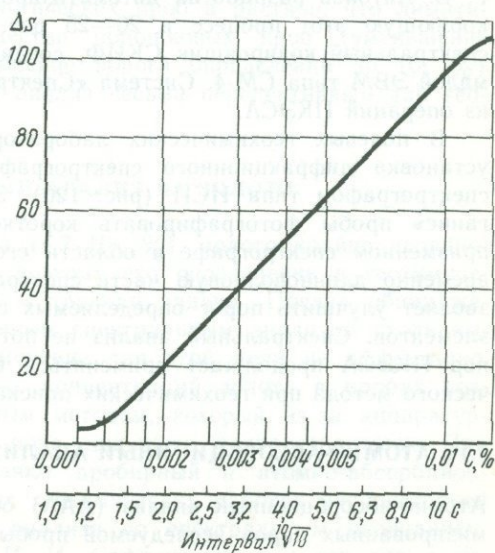


Рис. 119. Соответствие дискретных значений результатов спектрального анализа логарифмической шкале равномерных интервалов кратности почернений

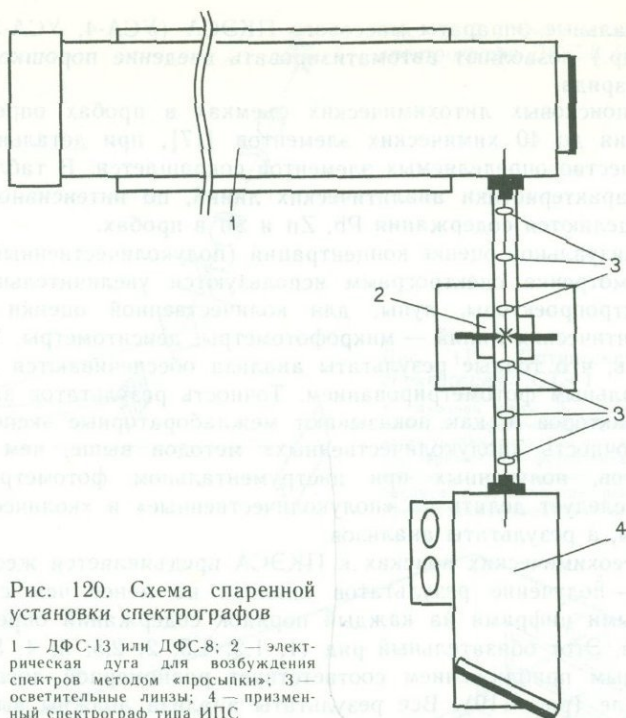


Рис. 120. Схема спаренной установки спектрографов

1 — ДФС-13 или ДФС-8; 2 — электрическая дуга для возбуждения спектров методом «просыпки»; 3 — осветительные линзы; 4 — призмный спектрограф типа ИПС

ми более трехкратной величины выполняется третий анализ. Для расшифровки спектрограмм при массовом ПКЭСА литохимических проб Г. В. Антонов разработал автоматизированную систему «Спектр», ускоряющую этот процесс в 20—25 раз. Основу системы составляют спектральный кодировщик СКИФ, соединенный с ЭВМ серии ЕС или малой ЭВМ типа СМ-4. Система «Спектр» автоматизирует только одну из операций ПКЭСА.

В полевых геохимических лабораториях практикуется спаренная установка дифракционного спектрографа типа ДФС с призмным спектрографом типа ИПС (рис. 120). Это позволяет за одно «сжигание» пробы фотографировать коротковолновую часть спектра на призмном спектрографе в области его хорошей дисперсии и одновременно длинноволновую часть спектра на дифракционном, что позволяет улучшить порог определяемых содержаний для части рудных элементов. Спектральный анализ не потерял своего значения, до сих пор ПКЭСА продолжает применяться в качестве главного аналитического метода при геохимических поисках рудных месторождений.

7.19. АТОМНО-АБСОРБЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Атомно-абсорбционный анализ (ААА) основан на просвечивании атомизированных паров исследуемой пробы монохроматическим светом с

длиной волны, соответствующей резонансной линии поглощения определяемого элемента. Метод предложен А. Уэлшем в 1955 г.

Атомное поглощение характеризуется экспериментальным законом уменьшения интенсивности проходящего света:

$$Y = Y_0 e^{-k \nu l},$$

где Y_0 — интенсивность падающего света; k_ν — коэффициент поглощения света, зависящий от частоты ν ; l — длина поглощающего слоя.

Установка состоит из следующих основных блоков.

Источник резонансного излучения обеспечивает интенсивное монохроматическое излучение просвечивающей линии определяемого элемента. Для этого применяются лампы с полым катодом и высокочастотные безэлектродные лампы.

Атомизатор обеспечивает перевод пробы в атомарный пар. Применяются атомизаторы двух типов: пламенные — распыленная проба (обычно в виде раствора) подается в пламя смеси воздуха и горючего газа (пропан, ацетилен и др.); электротермические — проба помещается в графитовое устройство, разогреваемое электрическим током.

Спектральный прибор (монохроматор) служит для выделения аналитической линии определяемого элемента.

Индикация и регистрация сигнала осуществляется по стандартным схемам. Используются ФЭУ с выходом на самописец, цифровой вольтметр, цифровая печать и т. п.

Современные приборы для атомно-абсорбционного анализа (Са-турн-2, С-112, СА-2 и др.) в значительной степени автоматизированы. При порогах определения рудных элементов, близких к ПКЭСА, атомно-абсорбционный анализ существенно превосходит его по точности, уступая, однако, в производительности. Последнее связано с необходимостью перевода геологических проб в раствор, что лимитирует ход анализа. Преимущества порошковых проб (уменьшение трудоемкости анализа и улучшение порога определений до $10^{-6}\%$) делают атомно-абсорбционный анализ весьма перспективным для геохимических поисков.

7.20. ХИМИКО-АДСОРБЦИОННЫЙ АНАЛИЗ НА ЗОЛОТО

Помимо очень низкого кларка ($4,7 \cdot 10^{-7}\%$), золото крайне неравномерно распределено в рудах, поэтому его определение в геохимических пробах — специфическая и трудная задача. Предел обнаружения золота обычным эмиссионным спектральным анализом столь высок ($5 \cdot 10^{-4}\%$), что его применение для этой цели не эффективно.

Прямое определение низких концентраций золота в пробах возможно нейтронно-активационным методом, который из-за аппаратурных трудностей не получил пока широкого распространения. При анализе рудных проб применяют пробирный и атомно-абсорбционный анализы, а при поисковых геохимических работах распространен химико-адсорбционный метод анализа со спектральным окончанием. Метод предложен в 1955 г. Н. И. Сафроновым и с тех пор с не-

большими изменениями широко применяется в практике. Навеска истертой пробы (10 г) для обогащения разлагается царской водкой, и золото адсорбируется активированным углем. Последний озоляется, и полученная зола анализируется полуколичественным спектральным методом. В результате двух этапов обогащения пробы достигается предел обнаружения золота порядка $5 \cdot 10^{-7}\%$. С целью улучшения чувствительности анализа использовалась навеска пробы 50 г, соосаждение проводилось с гидроксидом железа. Оптимизировались условия проведения анализа, в частности, уменьшение величины навески угля с 1 г до 0,2 г, увеличение силы тока и оптимизация условий разряда. В обоих случаях был достигнут предел обнаружения $2 \cdot 10^{-8}\%$.

В настоящее время экстракция золота производится дибутилсульфидом с последующим спектральным анализом выделенного концентрата. Порог определения при рядовых анализах остается $4 \cdot 10^{-7}\%$. Определение золота в пробах (до $1,8 \cdot 10^{-7}\%$) [6] проводилось с использованием экстракции золота раствором ди-н-бутилсульфида в толуоле, высушивании экстракта при комнатной температуре на угольном коллекторе с 0,5% NaCl и спектральным анализом.

Известны работы по атомно-абсорбционному и атомно-флуоресцентному определению золота в порошковых геологических пробах. Методом атомной абсорбции проводится определение золота в порошковых пробах, без перевода проб в раствор с помощью полевого анализатора ПАЗ-1 (конструкция ВИТР). К недостаткам этой методики относится использование малых навесок (60 мг). По данным авторов достигается предел обнаружения $5 \cdot 10^{-8}\%$, и погрешность 30—40%. При анализе рудных проб на золото в настоящее время практикуется его предварительное извлечение с помощью гидравлических классификаторов из больших навесок, а затем атомно-абсорбционный анализ «хвостов». Считается, что навеска пробы 30—50 г достаточно представительна.

7.21. РТУТНО-АБСОРБЦИОННЫЕ ФОТОМЕТРЫ

Ртутно-абсорбционные фотометры предназначены для определения содержания ртути. Действие прибора основано на поглощении энергии монохроматического излучения длиной волны 253,7 нм при пропускании его через газовую кювету с парами ртути. Источником монохроматического излучения служит ртутная лампа (рис. 121).

Таблица 74

Характеристика анализов на ртуть

Анализируемая среда	Объем		Порог определений	Ошибка $\delta_{\text{с.т.}}$
	пробы, навески	прокачки		
Почвенный воздух	1 л	1 л	$1 - 2 \cdot 10^{-9}$ мг/л	1,14
Вода	0,5—1 л	3 л	$5 \cdot 10^{-9}$ мг/л	1,40
Порода	50—100 мг	1 л	$1 \cdot 10^{-7}\%$	1,20

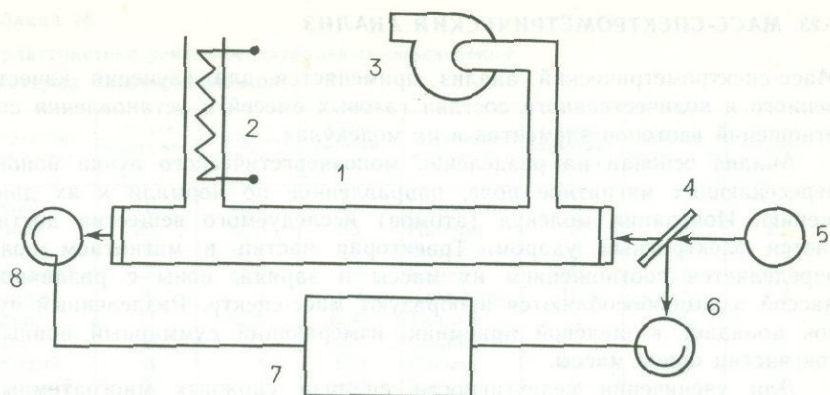


Рис. 121. Схема ртутно-абсорбционного фотометра

1 — газовая кювета; 2 — сорбент; 3 — насос; 4 — светоделитель; 5 — монохроматический источник; 6 — фотозлемент сравнительного канала; 7 — регистратор; 8 — фотозлемент рабочего канала

Для повышения чувствительности анализа пары ртути перед напуском в измерительную камеру концентрируют на золотом сорбенте. Десорбция достигается нагревом сорбента до 600°C .

Чувствительность и точность определений ртути в различных средах приведены в табл. 74.

7.22. ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Данный физико-химический метод изучения состава смесей газов применяется для определения состава газовых проб при атмохимических поисках твердых полезных ископаемых в закрытых районах. Принципы действия и схема устройства хроматографа (см. рис. 98) охарактеризованы выше (см. 6.7) применительно к геохимическим поискам месторождений нефти и газа. Важнейшие характеристики хроматографического анализа приведены в табл. 75.

Хроматографический анализ атмохимических проб при поисках твердых полезных ископаемых

Анализируемые газы	Сорбент	Газ-носитель	Детектор	Предел обнаружения, %
CO_2 , $\text{O}_2 + \text{N}_2$, H_2	Полисорб	He	Катарометр	$1 \cdot 10^{-3}$
O_2 , N_2 , CH_4	Молекулярные сита	He, H_2	Катарометр	$1 \cdot 10^{-3}$
He, H_2 , Ne	Активированный уголь	Ar, N_2	Катарометр	$1 \cdot 10^{-3}$
CH_4 , ТУВ	Алюмогель	He, N_2	Пламенно-ионизационный	$1 \cdot 10^{-8}$
COS , H_2S , SO_2 , CS_2	Силикагель	He	Пламенно-фотометрический	$1 \cdot 10^{-10}$
Фреоны	Алюмогель	He	Электронного захвата	$1 \cdot 10^{-10}$

7.23. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Масс-спектрометрический анализ применяется для изучения качественного и количественного состава газовых смесей и установления соотношений изотопов элементов в их молекулах.

Анализ основан на разделении моноэнергетического пучка ионов, пересекающих магнитное поле, направленное по нормали к их движению. Ионизация молекул (атомов) исследуемого вещества достигается электронным ударом. Траектория частиц в магнитном поле определяется соотношением их массы и заряда, ионы с различной массой взаимообособляются и образуют масс-спектр. Разделенный пучок попадает в щелевой приемник, измеряющий суммарный ионный ток частиц одной массы.

Для увеличения селективности анализа сложных многоатомных соединений с близкими молекулярными массами исследуемое вещество предварительно разделяют на хроматографических колонках.

Масс-спектрометрический метод позволяет для малого объема газа одновременно получать информацию о содержаниях микро- и макрокомпонентов в широком диапазоне концентраций: от $< 1 \cdot 10^{-6}$ до $\approx 100\%$.

7.24. РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Рентгеноспектральный анализ (РСА) горных пород обладает многими важными достоинствами: низкой погрешностью сходимости (1—3%), малой зависимостью результатов от матричного эффекта, низким ($\approx 10^{-4}\%$) пределом обнаружения многих химических элементов. Измерения содержания одного элемента в пробе занимает не более двух минут при высокой автоматизации аналитического процесса.

Используемый в производственных лабораториях вариант метода основан на регистрации интенсивности флуоресцентного излучения (ИФИ) линии определяемого элемента, возникающего под действием облучения пробы рентгеновским излучением, и интенсивности некогерентно рассеянного на пробе характеристического излучения (ИНРИ) используемого анода (молибденового или серебряного) рентгеновской трубки.

Для измерений используют одноканальные рентгеновские анализаторы типа АРФ. Во многих лабораториях они оснащаются серийной автоматической системой измерений (АСИ). В состав АСИ входят механизм транспорт-сменника (ТС) проб с датчиком номера гнезда, электронно-командное устройство (ЭКУ) и цифropечатающее устройство (ЦПУ). ЭКУ осуществляет управление прибором в заданном режиме и вывод информации на ЦПУ. К анализатору АРФ-6 прилагается перфоратор, с помощью которого результаты измерений направляются в ЭВМ. Производительность в смену с применением АСИ около 100 элементопределений малых содержаний и 150—200 элементопределений рудных содержаний.

Для рентгеноспектральных определений в рассматриваемом ва-

Таблица 76

Характеристики рентгеноспектральных определений некоторых микрокомпонентов

Определяемый элемент	Предел обнаружения, г/т	Погрешность δ_0 , %	Кларк литосферы, г/т	Определяемый элемент	Предел обнаружения, г/т	Погрешность δ_0 , %	Кларк литосферы, г/т
Медь	10	≤ 5	47	Цирконий	6	4	170
Цинк	20	≤ 5	83	Ниобий	3	4	20
Галлий	5	≤ 5	19	Молибден	3	4	1,1
Германий	5	≤ 5	1,4	Барий	300	≤ 5	650
Мышьяк	9	4	1,7	Вольфрам	10	≤ 5	1,3
Селен	3	≤ 5	0,05	Таллий	5	≤ 5	1
Бром	3	5	2,1	Свинец	3	3	16
Рубидий	3	3	150	Висмут	10	≤ 5	0,009
Стронций	3	3	340	Торий	3	3	9
Иттрий	3	4	29	Уран	3	3	2,5

рианте используют пробы, дотертые до 50 мкм (~ 300 меш). Эффективная по флуоресцентному излучению масса составляет около 0,25 г.

В табл. 76 приведены метрологические параметры рентгеноспектрального метода определений некоторых компонентов в виде параметров уравнения

$$\sigma = \sigma_0 + \delta_0 C = \frac{L}{3} + \delta_0 C.$$

Как видно, величина предела обнаружения L ($3\sigma_0$) для многих элементов составляет 3—5 г/т, а коэффициент мультипликативной погрешности δ_0 3—5%.

7.25. РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рентгенорадиометрический анализ (РРА) основан на измерениях интенсивности характеристического излучения химических элементов, возбуждаемого с помощью первичного ядерного излучения от радиоактивного изотопа. Метод используется для определения в условиях стационарной и полевой лаборатории содержаний химических элементов, у которых атомный номер более 18.

В качестве первичных излучателей применяют радиоизотопные источники: ^{59}Fe , ^{109}Cd , ^{249}Am , ^{57}Co , ^{170}Tm и др.

Детекторами излучения служат проточные, пропорциональные, сцинтилляционные и полупроводниковые счетчики. Последние обеспечивают наилучший предел обнаружения, однако требуют постоянного охлаждения жидким азотом.

Определение содержаний химических элементов методом РРА могут быть выполнены в двух вариантах: флуоресцентным и абсорбционным.

При флуоресцентном варианте РРА исследуемая проба, нанесенная тонким слоем на подложку из фильтровальной бумаги, облучается потоком гамма-квантов с энергией, достаточной для возбуждения K -уровня определяемого элемента. В процессе фотоэлектрического

поглощения, возникающего в результате взаимодействия фотонов с атомами определяемых элементов, генерируется характеристическое излучение, интенсивность которого измеряется детектором прибора.

Для повышения разрешающей способности флуоресцентного варианта РРА используют дифференциальные фильтры, которые позволяют выделить характеристическое излучение в узких участках энергетического спектра. Флуоресцентный вариант РРА в навесках 10—100 мг характеризуется пределами обнаружения для различных химических элементов от 0,05 до 0,3%. При измерениях в насыщенных слоях предел обнаружения снижается в 3—4 раза.

В абсорбционном варианте РРА используется зависимость коэффициента фотоэлектрического поглощения от энергии фотонов, близких к K - или L -краю поглощения определяемого элемента. В этом варианте анализируемую пробу просвечивают последовательно пучками фотонов монохроматического излучения, имеющих энергии несколько больше или меньше K - или L -края поглощения определяемого элемента. Метод используется для анализа порошков и растворов, насыпаемых или заливаемых в тонкостенные кюветы.

Предел обнаружения в абсорбционном варианте РРА составляет 0,03—0,04% в порошковых пробах и 2—3 г/л в растворах при длительности измерений при просвечивании каждым из двух пучков 4 мин.

Для абсорбционного варианта РРА характерна меньшая зависимость результатов анализа от химического состава проб и исключение погрешностей, связанных с разбалансом дифференциальных фильтров.

По отношению к рентгеноспектральному методу РРА имеет очень важные преимущества: возможность измерений по более жестким линиям K -серии характеристического излучения тяжелых элементов. Это позволяет существенно уменьшить погрешности, связанные с микроабсорбционной неоднородностью материала исследуемых проб, а при измерениях в тонких слоях уменьшить погрешности, связанные с избирательным поглощением и возбуждением.

Большим достоинством РРА, выделяющим его среди многокомпонентных методов анализа, является возможность использования метода не только в условиях полевой лаборатории, но и на месте залегания исследуемых пород на обнажения, в горных выработках и в скважинах.

В табл. 77 приведен перечень и краткая характеристика рентгенометрических анализаторов, большинство которых рассчитано на использование в флуоресцентном варианте.

7.26. ФОТОНЕЙТРОННЫЙ АНАЛИЗ НА БЕРИЛЛИЙ

Метод основан на ядерной реакции: $Be^9 + \gamma\text{-фотон} \rightarrow Be^8 + n$. Ядра Be характеризуются наименьшей энергией связи нейтронов — 1,666 МэВ. Следующий порог фотонейтронной реакции имеет дейтерий (2,226 МэВ), для остальных химических элементов эта энергия составляет от 4 до 8 МэВ. При облучении проб или горных пород в естественном залегании γ -лучами с энергией больше 1,666 МэВ, но

Таблица 77

Аппаратура для РРА проб горных пород и руд

Прибор	Число каналов анализатора	Тип детектора	Атомный номер определяемых элементов	Возможность использования для анализа пород в естественном залегании
Минерал-3	1	Сцинтилляционный пропорциональный	> 25	—
АЖР-1	2	Пропорциональный	25—42	—
ФРАД-1	2	Пропорциональный	20—42	—
Квант-С	2	Сцинтилляционный пропорциональный проточный	> 25 20—42 12—20	— — —
Минерал-4	1	Пропорциональный сцинтилляционный	> 20	+
БРА-6	1	Пропорциональный	20—42	+
РПС-4-01	1	Пропорциональный сцинтилляционный	> 20	+
БДР	256 1024	Полупроводниковый Ge или Si (Li)	> 20	—
РРК-103 (Поиск-1)	2	Сцинтилляционный пропорциональный	> 20	+
Эра-1	2	Сцинтилляционный пропорциональный	> 20	+
ФРАМ-1	6	Si (Li) детектор	> 20	—
РАЛ-М-102 (Экран)	8	Пропорциональный сцинтилляционный полупроводниковый	> 18 > 40 > 18	—
Минерал-6	5	Пропорциональный	> 20	+
РРША-4	2	Сцинтилляционный	> 40	+ (каротаж)
РАГ-Н-101 (Геолог)	6	Сцинтилляционный пропорциональный	> 40	+ (каротаж)
РАГ-М-102 (Поиск-2)	4—8	Пропорциональный	> 20	+

меньше 2,226 МэВ, достигается высокая избирательность фотонейтронной реакции на бериллий. Таким источником γ -лучей служит искусственный радиоактивный изотоп ^{124}Sb с периодом полураспада 53,7 дня и с энергией излучения 1,7—2,1 МэВ. Эмиссия нейтронов измеряется пропорциональными счетчиками, заполненными газом BF_6 . На

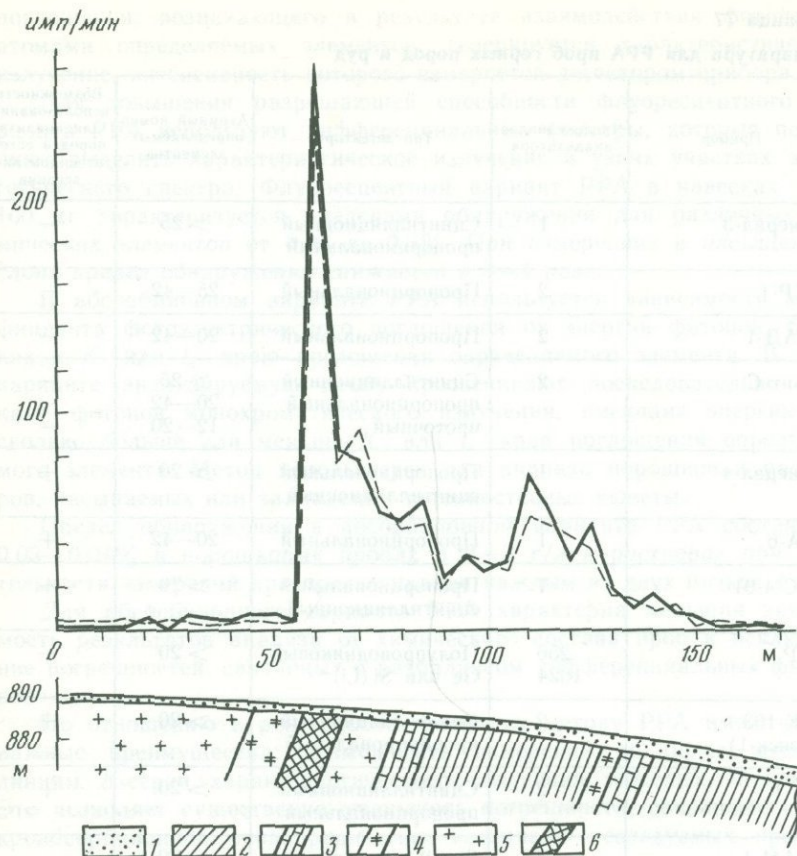


Рис. 122. Графики первичной и повторной фотонейтронной съемки

1 — элювиоделувий; 2 — сланцы; 3 — известняки; 4 — дайки эффузивов; 5 — граниты; 6 — рудное тело

этом принципе создан полевой прибор (бериллометр), позволяющий без пробоотбора измерять содержания бериллия в горных породах и рыхлых отложениях с докларковой чувствительностью (рис. 122).

7.27. НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Нейтронно-активационный анализ (НАА) основан на регистрации излучения радиоактивных нуклидов, образующихся при облучении исследуемых проб потоком нейтронов. Облучение проб производится в ядерном реакторе при потоке медленных нейтронов порядка 10^{13} нейтрон/см²·с и более.

Возникающее под действием нейтронов в исследуемых пробах гамма-излучение фиксируется с помощью радиометров или спектрометров.

Вместе с исследуемыми пробами в одинаковых условиях облучаются и стандартные образцы. Определения содержаний химических

элементов производится путем сравнения интенсивностей излучения проб и стандартных образцов в выбранных энергетических интервалах спектрометра, а при простом спектре гамма-излучения — по измерениям интегрального гамма-излучения.

Для анализа горных пород используются навески массой 300—400 мг. Такая навеска обеспечивает необходимую представительность пробы, радиационную безопасность для оператора и исключает эффект самоэкранирования.

После окончания облучения пробы выдерживают некоторое время («остывание»), после чего направляются на анализ. Последний выполняется непосредственно по пробе (инструментальный НАА-ИНАА) или после радиохимической подготовки, в процессе которой выделяется исследуемый радионуклид, что позволяет определить его содержание радиохимическим методом.

НАА отличается рядом достоинств: 1) обеспечивает количественные определения многих химических элементов из одной навески; 2) практически исключает зависимость результатов определений от химических свойств элементов; 3) обеспечивает возможность анализа малых навесок.

Метод имеет и ряд недостатков. В частности, для организации НАА необходимы территориальная близость к реактору, наличие специальных помещений для «остывания» облученных проб и для выполнения радиохимических и измерительных операций.

В табл. 78 приведены данные о пределах обнаружения различных химических элементов нейтронно-активационным методом при навесках проб 400 мг в потоках нейтронов $1,2 \cdot 10^{13}$ нейтрон/см²·с.

Как следует из таблицы, по отдельным элементам пределы обнаружения НАА больше кларка в литосфере. Приведенные в таблице значения пределов обнаружения соответствуют условиям массовых анализов. В литературе имеются указания на значительно более низкие

Таблица 78

Метрологические параметры НАА проб горных пород

Химический элемент	Предел обнаружения, %	Кларк в литосфере, %	Химический элемент	Предел обнаружения, %	Кларк в литосфере, %
Натрий	10^{-3}	2,5	Барий	$1 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$
Скандий	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$	Лантан	$8 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
Хром	$2 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	Церий	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$
Железо	$3 \cdot 10^{-2}$	4,65	Неодим	$5 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Кобальт	$7 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	Самарий	$6 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Цинк	$7 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	Европий	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Мышьяк	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	Гадолиний	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Селен	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-6}$	Тербий	$8 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$
Рубидий	$8 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	Иттербий	$8 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Стронций	$8 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	Лютеций	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
Цирконий	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	Гафний	$8 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Молибден	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	Тантал	$6 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Серебро	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-6}$	Вольфрам	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Кадмий	$5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	Золото	$6 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$
Сурьма	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	Торий	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Цезий	$5 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	Уран	$5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

пределы обнаруживаемости химических элементов при нерядовых анализах. В частности, U может быть определен на уровне $10^{-7}\%$, Th — $10^{-6}\%$, Au — $10^{-8}\%$, Sc — $10^{-7}\%$ и т. д.

7.28. ИОНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ

Ионо-селективные электроды применялись при геохимических поисках сульфидных месторождений еще в 1932—37 гг. Неоспоримые преимущества спектрального анализа в то время привели к прекращению работ с этим методом, современные достижения в технике определили возвращение к нему.

Ионо-селективные (избирательные) электроды второго рода представляют собой металлические стержни, окруженные труднорастворимой солью того же металла в растворе одноименного электролита. Поляризационный потенциал такого полужлемента избирательно зависит от концентрации соответствующего иона в растворе; измерения обычно ведутся в паре с каломелевым (нормальным) электродом. При необходимости наружную поверхность таких электродов делают из ионо-проницаемого стекла, для контакта нормального электрода с испытуемым раствором применяются агар-агаровые «ключи» с насыщенным раствором KCl. Например, при измерении с помощью свинцово-сульфатного электрода концентрации ионов SO_4^{2-} в растворе образуется следующая цепь: Pb — PbSO₄ — испытуемый раствор — KCl (насыщенный раствор) HgCl₂ — Hg. Современные электроды с твердой ионо-селективной мембраной имеют внутренний электрод сравнения.

Поляризационный потенциал избирательного электрода подчиняется уравнению Нернста:

$$E = E_0 + \frac{2,303RT}{nF} \log A,$$

где E_0 — потенциал электрода сравнения, R — газовая постоянная, T — абсолютная температура, F — постоянная Фарадея, n — заряд иона с учетом его знака и A — активность иона. Принимая активность иона, равной его концентрации в растворе C_x при 25° С, имеем (в мВ): $E = E_0 + 59,16 \log C_x$. Здесь 59,16 мВ — постоянная Нернста для одновалентных ионов (для двухвалентных, соответственно, 29,58 мВ).

С помощью ионо-селективного лантан-фторидного электрода LaF₃ с присадкой Eu²⁺ эффективно измеряется концентрация ионов фтора в растворе (от $10^{-6}\%$ F до насыщения), оптимальным для измерений является интервал pH 5—6,5 [31]. Кроме хорошо известных электродов для измерения pH, известны избирательные электроды для определения концентраций Cl⁻, Br⁻, J⁻, Ag⁺, S²⁻, Cu²⁺, Pb²⁺ и других ионов.

7.29. ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Данный метод позволяет получить информацию об элементном составе зерна минерала, включений в образце, штуфе, керне, шлифе, аншлифе площадью примерно $2 \cdot 10^3$ мкм².

При локальных исследованиях используется узконаправленное (игольчатое) излучение лазера. Промышленные установки МСЛ-4 и «Аргунь» предназначены для локального эмиссионного спектрального анализа минерального сырья. Установка «Аргунь» в стационарных условиях использует спектрограф СТЭ-1, а в полевом варианте (аппаратура размещается на автомашине УАЗ-452) — спектрограф ДФС-23. Принцип работы установки для локального анализа заключается в испарении вещества с помощью лазера, возбуждении образовавшихся паров импульсным высоковольтным разрядом (искрой) и регистрации спектра излучения атомов и ионов спектрографом. По точности результатов и пределу обнаружения локальный лазерный анализ приближается к количественному эмиссионному спектральному анализу [43].

7.30. ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫЙ МИКРОАНАЛИЗ

Электронно-зондовый микроанализ («микрозонд») представляет собой локальный вид рентгеноспектрального анализа [31].

Приводим некоторые характеристики приборов. Нижние пределы определения элементов 0,05—0,1% (зависят от элемента и характера материала). Увеличение микроскопа $300\times$ — $3000\times$, минимальный диаметр рабочего зонда <1 мкм, локальность сканирующего анализа порядка 1 мкм², общая площадь анализа до 100×100 мкм — 400×400 мкм.

Приборы обеспечивают получение растровых фотографий в поглощенных и обратно рассеянных электронах и в рентгеновском излучении, а также графиков, содержаний макроэлементов в объекте анализа в виде амплитуд вдоль заданного направления. Визуальный выбор участков локального анализа производится с помощью оптического микроскопа и на дисплеях.

7.31. ОБРАБОТКА ДАННЫХ НА МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРАХ

Характеристики распространенных типов МК даны в табл. 79.

МК применяют при решении прямых и обратных геохимических задач: оценки параметров потоков рассеяния, моделирования вторичных наложенных и остаточных ореолов рассеяния и др.

7.32. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Термину «АСОД» весьма близок по значению широко используемый термин «банк данных» [38]. Банк данных включает в себя базы данных (БД) — информационный массив или их совокупность. АСОД обеспечивает накопление информации в БД и их обработку. Накопление информации осуществляется с помощью автоматизированных информационно-поисковых систем (АИПС), а обработка — с помощью пакетов прикладных обрабатывающих программ (ППП).

АИПС обеспечивает ввод первичной информации с различных физических носителей, ее контроль, корректировку, ввод в БД для хранения, выбор нужной информации из БД по запросам пользователей и выпол-

Таблица 79

Характеристики отечественных микрокалькуляторов

Параметр	Микрокалькуляторы				
	непрограммируемые		программируемые		
	БЗ-38	МК-51	БЗ-21	МК-61	МК-54
Число разрядов мантииссы	5	5	8	8	8
Число регистров памяти	1	1	13	14	14
Вычисление функций: $\ln x$, e^x , $\sin x$, $\cos x$, $1/x$, x^2 , \sqrt{x} , x^y	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Представление углов	Градусы, радианы	Градусы, радианы	Градусы, радианы	Градусы, радианы	Градусы, радианы
Выделение целой и дробной части числа	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть
Определение максимального значения из 2 чисел, абсолютного значения числа	—	—	Нет	Есть	Есть
Перевод временных, градусных величин в доли часа, градуса; обратный переход	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть
Операции в регистрах памяти	Есть	Есть	Нет	Нет	Нет
Поразрядные логические операции	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть
Статистические расчеты	Есть	Есть	Нет	Нет	Нет
Генератор случайных чисел	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть
Максимальное число шагов программы	—	—	60	105	105
Адресация	—	—	Прямая	Прямая и косвенная	Прямая и косвенная
Время выполнения арифметических операций, не более с	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Внутренний магнитный носитель	—	—	Нет	Нет	Есть

нение других операций, связанных с преобразованием и хранением информации. Существующие АИПС подразделяются на документальные и фактографические. Документальные АИПС в ответ на запрос выдают адрес документа в соответствующем хранилище и краткую его характеристику (например, аннотацию, реферат) или копию. Такими системами являются АИПС для хранения кадастров месторождений. Документальные АИПС, как правило, в АСОД не входят, а функционируют автономно. Фактографические системы в ответ на запрос выдают фактические данные, а при необходимости — ссылку на источник информации и другие сведения. Именно фактографические АИПС входят в состав АСОД.

Важной составной частью любой АИПС является программа управления доступом к базам данных, называемая системой управления базами данных (СУБД). СУБД воспринимает запрос пользователя на поиск и интерпретирует его, а также выполняет конкретные операции над базой данных. Разработаны универсальные СУБД, которые, в принципе, можно использовать для хранения данных любой структуры. По модели хранения данных различают реляционные, иерархические

и сетевые СУБД. Наиболее гибкими из них являются реляционные СУБД. Для ЕС ЭВМ к универсальным СУБД относятся такие системы, как «ИНЕС», «АДАБАС» и др. При создании систем обработки геохимических данных создаются специализированные СУБД.

Пакеты прикладных программ обеспечивают математическую обработку данных, переданных им через АИПС, и передачу вторичных данных другим обрабатывающим программам или АИПС для хранения. В автоматизированную систему обработки данных геохимических поисков в обязательном порядке входят прикладные программы, обеспечивающие выделение, классификацию и оценку геохимических аномалий. Ориентировочный список пакетов программ для обработки геохимических данных приведен в табл. 80. Обработка геохимической информации с помощью АСОД ведется, как правило, в диалоге исследователя с ЭВМ, под которым понимается геохимик (владелец информации) и АДБ (администратор АСОД).

АСОД — ГППИ (Геохимические поиски полезных ископаемых) разработана в ИМГРЭ Л. А. Верховской, Э. Н. Поздняковым, В. Н. Бондаренко. Состоит из автоматизированной информационно-поисковой системы «ГЕОНАВТ» и обрабатывающих программ, реализующих методику «ГЕОПОЛЕ». АСОД — ГППИ функционирует на ЭВМ серии ЕС. АИПС

Таблица 80

Пакеты прикладных программ АСОД «Геохимические поиски»

Пакеты прикладных обрабатывающих программ	Группы программ, входящих в состав пакетов
Статистическая и специальная обработка геохимических поисковых данных	Вычисление статистических и специальных (геохимических) параметров выборок; стандартные преобразования данных опробования; факторный анализ; классификация переменных; классификация наблюдений; классификация выборок; регрессионный анализ, дисперсионный анализ
Формирование регуляризованных моделей геохимических полей	Формирование и обслуживание регуляризованных моделей; устранение неоднородностей поля (систематики), построение комплексных геохимических полей (мультипликация, вычисление значений факторов и т. д.); сглаживание полей
Выделение аномалий	Вычисление параметров фона, выделение аномалий, оконтуривание аномалий, вычисление параметров аномалий, классификация аномалий
Оценка прогнозных ресурсов	Количественная интерпретация потоков рассеяния, оценка прогнозных ресурсов по параметрам вторичных остаточных ореолов рассеяния, оценка прогнозных ресурсов по параметрам первичных ореолов
Картографирование геохимических данных	Построение карт на устройствах печати; построение карт на графопостроителях
Обработка эталонной информации по рудным месторождениям	Накопление и содержание эталонной информации, изучение геохимической зональности, сопоставление эталонов между собой и с неизвестными объектами

Примечание. АСОГД «Геохимические поиски» разработана В. А. Николаевым на кафедре геохимии МГУ.

«ГЕОНАВТ» обеспечивает создание банка первичных геохимических данных: подготовку документации к перфорации, перфорацию, ввод данных в ЭВМ, их контроль, корректировку: накопление и хранение, поиск информации и передачу обрабатывающих программ. Комплекс обрабатывающих программ, обеспечивающих методику «ГЕОПОЛЕ» создан в вариантах обработки площадных и профильных данных, позволяет осуществлять фильтрацию исходных данных, определять фоновые содержания элементов и затем вычитать их из детерминированной составляющей, вести обработку геохимического поля методом главных компонент, обрабатывать результаты опробования горных выработок алгоритмами сканирования («ГЕОСКАН—200», «ГЕОСКАН—50»; Б. С. Коган, Л. Н. Гинзбург, ИМГРЭ).

АСОД — Прогноз разработан в КазВИРГе Д. Н. Беляшовым, Е. А. Голдобиной и др. Система предназначена для обработки геолого-геофизических и геохимических данных. Состоит из информационно-поисковой системы фактографического типа и системы вычислительных (проблемных) программ. АСО-Прогноз работает под управлением операционной системы ДОС-ЕС.

Автоматизированная система обработки геохимической информации «АСОИ-ГЕОЛОГИЯ» разработана в ИВЦ ПГО «Севзапгеология» коллективом под руководством В. И. Мишина. Обеспечивает накопление, хранение, преобразование, поиск, отбор и математическую обработку данных; ориентирована на решение геологоразведочных задач. Система работает под управлением ОС ЕС.

7.33. ГРАФОПОСТРОИТЕЛИ

Графопостроители представляют собой приборы периферийного оборудования ЭВМ, которые управляются специальными программами графического сервиса, работающими в рамках операционной системы ЭВМ. Графопостроители позволяют представлять результаты математической обработки числовых массивов в виде рисунков, графиков, разрезов и карт в заданном масштабе, в том числе в аксонометрической (трехмерной) проекции и в многоцветном исполнении. Наряду с графической информацией могут выводиться текст и числовые данные. Строковая информация может быть представлена различными шрифтами (прямой, курсив) и литерами (строчные, прописные, русские, латинские, греческие буквы). Цифры и буквы могут вписываться в изолинии карт и пояснительным текстом сопровождать рисунки.

7.34. СЧИТЫВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Считывающие устройства применяются для ввода текстовых, графических (карты, разрезы и т. д.) и фотографических (аэрокосмоснимки) данных в ЭВМ.

Считывание текста и фотоснимков производится оптическими или лазерными устройствами сканирующего типа, фиксирующими степень почернения (окраски) бумаги на строке.

Ввод картографических материалов ведется с карт, разрезов и дру-

гих материалов, закрепленных на сенсорных планшетах. Площадь планшетов составляет 0,2—1,5 м². Объекты ввода — геологические границы, изоконцентраты геохимического поля, горизонталы рельефа, стволы скважин прослеживаются визиром (магнитный карандаш и др.), сопряженным с планшетом. При обводке линий их координаты непрерывно или дискретно, нажатием на визире, вводятся в память ЭВМ.

Считывающие устройства (DEGITAISER, SISTEMA PERICOLOR и др.) оснащены собственными процессорами, позволяющими редактировать и обрабатывать введенные данные, переводить их в алфавитно-цифровой вид. По окончании ввода данные могут быть записаны на магнитный носитель и переданы на обработку или хранение в ЭВМ большей мощности.

7.35. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕШЕНИЙ

Оптимизация решений в узком смысле — процесс нахождения вариантов действий, наилучших в смысле некоторого заранее выбранного критерия оптимальности. Для решения таких задач существует хорошо развитый аппарат математического программирования. Задача оптимизации в этом случае ставится как задача нахождения экстремального значения некоторой функции (называемой целевой) многих переменных при наличии ограничений на значения переменных. Ограничения задают область поиска оптимума и могут быть представлены как уравнениями, так и неравенствами. В зависимости от вида целевой функции и ограничений различают задачи линейной, квадратичной, выпуклой оптимизации и т. д.

В то же время исследование результатов, полученных при бурении одной скважины, может дать дополнительную информацию о наиболее целесообразном месте закладки второй скважины, и т. д. Подобного рода оптимизационные задачи не могут быть решены математически до начала работ, но могут иметь алгоритмические решения. Теория игр позволяет в некоторых случаях сформулировать оптимальную стратегию принятия решений в зависимости от результатов каждого шага исследования, однако в большинстве случаев используемые стратегии по необходимости имеют лишь эмпирический характер.

7.36. ДЕЛОВЫЕ ИГРЫ

Деловые игры — одно из важнейших технических средств обучения и повышения квалификации специалистов, основанное на имитации производственного процесса с помощью ЭВМ. В области методики геохимических поисков полезных ископаемых деловая игра «Поиск КИЦМ» разработана в Красноярском институте цветных металлов Ю. Г. Шестаковым.

В течение 4—5 дней по 1,5—2 часа машинного времени в день, удается имитировать работы от мелкомасштабных региональных геохимических съемок до детальных поисково-оценочных геохимических и горно-буровых работ на выявленных месторождениях, выполнение которых в реальных условиях растягивается на 8—10 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ✓ 1. *Архипов А. Я., Кучерук Е. В., Петухов А. В.* Геохимические методы поисков месторождений нефти и газа. М., изд. ВИНТИ, 1980.
2. *Барсуков В. Л., Григорян С. В., Овчинников Л. Н.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., Наука, 1981.
3. *Барташевич О. В.* Нефтегазопроисхождение битуминология. М., Недра, 1984.
- ✓ 4. *Беспамятнов Г. П., Кротов Ю. А.* Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Л., Химия, 1985.
5. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М., Наука, 1980.
- ✓ 6. *Вассоевич Н. Б.* Геохимия органического вещества и происхождение нефти. М., Наука, 1986.
7. *Вернадский В. И.* Очерки геохимии. М., Наука, 1983.
8. *Геохимические и геофизические методы поисков рудных месторождений на Северо-Востоке СССР.* Магадан, изд. СВКНИИ, 1985.
9. *Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений / О. В. Барташевич, Л. М. Зорькин, С. Л. Зубайраев и др.* М., Недра, 1980.
10. *Геохимические методы поисков рудных месторождений.* Новосибирск, Наука, Ч. 1, 1981; Ч. 2, 1982.
- ✓ 11. *Гидрогеохимические методы поисков рудных месторождений и прогноза землетрясений.* Новосибирск, Наука, 1983.
12. *Григорян С. В.* Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений. М., Недра, 1987.
13. *Добровольский В. В.* География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М., Мысль, 1983.
14. *Дубов Р. Н.* Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1974.
15. *Зорькин Л. М., Старобинец И. С., Стадник Е. В.* Геохимия природных газов нефтегазоносных бассейнов. М., Недра, 1984.
16. *Зубайраев С. Л., Петухов А. В., Иванов А. Б.* Нефтегазопроисхождение литогеохимия в СССР и за рубежом. М., изд. ВИЭМС, 1982.
17. *Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений.* М., Недра, 1983.
18. *Каждан А. Б.* Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Научные основы поисков и разведки. М., Недра, 1984.
19. *Каждан А. Б.* Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Производство геологоразведочных работ. М., Недра, 1985.
20. *Квятковский Е. М.* Литохимические методы поисков эндогенных рудных месторождений. Л., Недра, 1977.
21. *Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых / Разведка и охрана недр, № 4, 1982, с. 40—48.*
22. *Кукал З.* Скорость геологических процессов. М., Мир, 1987.
23. *Методические рекомендации по применению АСОД — ГППИ при геохимических поисках месторождений.* М., изд. ИМГРЭ, 1984.
24. *Миляев С. А.* Литохимические поиски полиметаллических месторождений. М., Недра, 1988.
25. *Основы гидрогеохимических поисков рудных месторождений / Б. А. Колотов, С. Р. Крайнов, В. З. Рубейкин и др.* М., Недра, 1983.
- ✓ 26. *Отбор и анализ природных газов нефтегазоносных бассейнов / Под ред. М. К. Калинин, И. С. Старобинца.* М., Недра, 1985.
27. *Перельман А. И.* Геохимия. М., Высшая школа, 1989.
- ✓ 28. *Петухов А. В., Ванюшин В. А., Сиротюк В. А.* Комплексный анализ данных геохимических поисков месторождений нефти и газа. М., Недра, 1981.

29. *Проблемы прикладной геохимии.* (Материалы Второго Международного симпозиума «Методы прикладной геохимии».) Новосибирск, Наука, 1983.
- ✓ 30. *Промышленные типы месторождений металлических полезных ископаемых* / А. Е. Карякин, П. А. Строна, Б. Н. Шаронов и др. М., Недра, 1985.
31. *Ривес Р. Д., Брукс Р. Р.* Анализ геологических материалов на следы элементов. М., Недра, 1983.
32. *Рыс Ю. С.* Геоэлектрические методы разведки. Л., Недра, 1983.
- ✓ 33. *Сафронов Н. И.* Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., Недра, 1971.
- ✓ 34. *Сборник руководящих материалов по геолого-экономической оценке месторождений полезных ископаемых.* М., изд. ГКЗ, 1985, 1986. Тома I, II, III.
35. *Смирнов В. И.* Геология полезных ископаемых. М., Недра, 1982.
36. *Соловов А. П.* Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М., Недра, 1985.
37. *Соловов А. П., Матвеев А. А.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. Сборник задач. М., изд. МГУ, 1985.
- ✓ 38. *Справочник по математическим методам в геологии* / Д. А. Родионов, Р. И. Коган, В. А. Голубева и др. М., Недра, 1987.
- ✓ 39. *Справочник по поискам и разведке месторождений цветных металлов* / А. И. Кривцов, И. З. Самонов, Е. И. Филатов и др. М., Недра, 1985.
- ✓ 40. *Физико-химические основы прямых поисков залежей нефти и газа* / Под ред. Е. В. Карус. М., Недра, 1986.
- ✓ 41. *Фурсов В. З.* Газортутный метод поисков месторождений полезных ископаемых. М., Наука, 1983.
- ✓ 42. *Хант Дж.* Геохимия и геология нефти и газа. М., Мир, 1982.
43. *Хохлов В. В.* Многоэлементный спектральный анализ в геологии. Л., Недра, 1986.
44. *Хьюбер П.* Робастность в статистике. М., Мир, 1984.
45. *Щеглов А. Д.* Основы металлогенического анализа. М., Недра, 1980.
46. *Goldschmidt V. M.* Geochemistry. Oxford, Clarendon Press, 1954.
- ✓ 47. *Govett G. S.* Handbook of Exploration Geochemistry. V. 1—3, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1981—1983.
- ✓ 48. *Levinson A. A.* Introduction to Exploration Geochemistry. Second Edition, Wilmette, 1980.
49. *Rose A. W., Hawkes H. E., Webb J. S.* Geochemistry in Mineral Exploration. London, Acad. Press, 1979.

Предметный указатель

- Автокорреляция** 172
Аккумуляция 25, 122, 139
Анализ
атомно-абсорбционный (ААА) 308
газов 262
кластерный 231
лазерный локальный 318
масс-спектрометрический 264, 312
нейтронно-активационный (НАА) 316
полуколичественный 299
рентгенорадиометрический (РРА) 313
рентгеноспектральный (РСА) 312
спектральный эмиссионный (ЭСА) 304
— приближенно-количественный (ПКЭСА) 238, 305
факторный 139, 230
фотонейтронный 314
химико-адсорбционный 309
хроматографический 311
частично-фазовый 152, 169
Анализатор
атомно-абсорбционный ртути 108
лазерный (лидар) 108
рентгеновский АРФ-6 312
Аномалия
атмохимическая (газовая) 258
безрудная 52, 66, 122, 167
биогеохимическая 100
гидроморфная 166, 168
гидрохимическая 100
гипергенная 122
зоометрическая 101
испарительная 167, 168
ландшафтная 171
литохимическая 100
локальная 7
породная 122
рудная 52, 122
слабая 55, 81, 146
техногенная 122
явная 80
Ассоциация элементов
геохимическая 47, 100
парагенная 53
Атмосфера 8, 50, 100
подземная 71, 297
приземная 71, 131, 275
Атомизатор 309
Аэрофотоснимки 122, 286

База данных (БД) 321
Баланс влаги 50
Банк данных 321
Барьер
биогеохимический 52
восстановительный 52, 129
гравитационный (механический) 52
инфильтрационный 53
испарительный 52, 65
окислительный 52
сорбционный 52, 65
физико-химический 30, 52
физиологический 134
Бассейн
водосбора 114
денудации 115, 139
нефтегазоносности 45, 248, 268
осадконакопления 31
солеродный 45, 94
угленосный 45, 94
Биосфера 8, 100

Вектор зональности 215
Вероятность обнаружения 102, 104
Взаимосвязанность аномалий 99
Воспроизводимость
анализа 140, 298
газовой аномалии 297
«Встречаемость» элементов 15
Выборка 80, 85
Вытяжки 169
Вязкость 164, 259

Газ-носитель 263
Газоприемник 297
Гидратация ионов 60
Гидролиз 31
Горизонт
водоносный 52
почв генетический 64
представительный 49, 149, 157, 287
Градиент
концентрации 158
продуктивности 213
Градуировка анализаторов 304
Графопостроители 324

Дегазация 8, 265
Дендрограмма 181
Денудация 7, 57, 161
Детекторы 262, 311—315
Деформация ореолов 164
Диогенез 31, 199, 261
Диаграмма
двухмерная 226
корреляционная 181
трехмерная 227
Дисперсия 83, 84, 91
Дифференциация
кристаллизационная 30

магматическая 8
механическая 31
Диффузия газов 258

Завышения метрологические 303
Задача Бюффона 103
Задачи прямые 192
Закон
Вернадского 7, 14
Дарси 259
распределения 88
Фика 258
Запасы
геохимические 29, 34, 239
глобальные 28
«истинные» 239
нефти и газа 284, 285
промышленные 32, 34, 239
Значимость различий 183
Зольность растений 294
Зона
апокатагенеза 249, 250
геохимическая верхняя (ВГЗ) 259
геохимическая нижняя (НГЗ) 259
гипергенеза 51
катагенеза 250
мезокатагенеза 249, 250
нефтеобразования главная (ГЗН) 250
окисления 53, 59
пластового окисления 95, 129
рассеянной минерализации (ЗРМ) 245
Зональность
биоклиматическая 49, 63
оруденения 212
— вертикальная 74, 241
— горизонтальная 215
— минеральная 238
— обратная 236
— осевая 212, 215, 246
первичных ореолов 74, 218
рудных полей 232
рудных районов 233

Игры деловые 325
Индикатор магниторазрядный 133
Интеграл вероятностей 86, 158
Интервалы доверительные 82, 90

Каротаж 72, 265
Категории
запасов 32
ресурсов 32, 69
Качество анализов 298
Кларк концентрации 27, 28, 171
Кларки 7
Классификатор гидравлический 125
Классификация
геохимических элементов 15
— Вернадского 16
— Гольдшмидта 17
ландшафтов 49

месторождений
— десятичная 33
— нефти и газа по запасам 284
ореолов рассеяния 145
Контрастность
геохимического барьера 31
слабой аномалии 81, 139
Контроль анализов 303
Концентрации предельно допустимые 106
Концентрирование
микроэлементного состава воды 292
рудных элементов 30, 31
Кора выветривания 47, 61
древняя 49, 140, 161
пестроцветная 148, 287
Кора земная 8
Кoeffициент
биологического поглощения 66, 134
водной миграции 50
гипергенного рассеяния 120, 159
диффузии 159, 259
зональности 246, 247
изменения объема 163
корреляции 84, 181—183
остаточной продуктивности 158, 161
подобия 241, 242
пропорциональности 114, 124
склоновый аллювия 116
талассофильности (морелюбивости) 51
Кривая распределения 85, 86
Критерий
аномальности 80
«достаточно больших» площадей 144
Колмогорова 88
Пирсона 91
согласия 88
Стьюдента 90
Фишера 90

Ландшафты 47
горно-лесные 58
горно-луговые 49, 57
степные и лесостепные 49
сухих степей и пустынь 49
таежно-мерзлотные 49
Линейка Дубова 194
Линии аналитические 305
Ловушка пластовая 255
— гидродинамическая 257

Масштаб съемок 95
Мельница стержневая 291
Месторождение
вулканогенно-осадочное 209
гидрогенное 93, 129
гидротермальное 206
крупное 33, 40, 46
магматогенное 210
метаморфогенное 93
осадочное 93, 210

погребенное 93, 98, 155, 202
слепое 74, 93, 98
уникальное 33, 41, 46
феноменальное 41, 46
эндогенное 76
эталонное 202
Метод
аналогий 46
Барсукова 243
Бураго — Шварова 244
главных компонент (МГК) 139, 230
дистанционный 272
концентрирования 292, 293
наименьших квадратов (МНК) 121, 244
поисков 70, 71
— атмосферический 71
— биогеохимический 134
— зоометрический 101, 135
— подвижных форм (МПФ) 95, 110, 169
— шлихо-геохимический 70, 125
— эманационный трековый (ЭТМ) 137
размерностей 159
скользящего окна 171, 172
терромагнитных фракций (ТМФ) 170
«трех уровней» 160
частичного извлечения металла (ЧИМ) 95, 110, 154
Микроанализ электронно-зондовый 319
Микрокалькуляторы 319
Микроэлементы 19, 87
Множитель
поправочный 117, 124, 188, 243
стандартный 80, 87
Модель
геохимическая 206, 241
месторождения 206—210
рудноносных территорий 47
Модуль стока 55
— растворимого 55, 56
— твердого 55, 56
Монохроматор 309
Мультипликация 145, 171, 172

Наблюдения
первичные 140
повторно-контрольные 141
режимные 296
Нагрузка факторная 230
Номенклатура картографическая 67
Номограмма
ЛГИ (Квятковского) 176, 177
Шварова 223

Образцы стандартные (СО) 303, 304
Ожидание математическое (МО) 85
Опробование
горных выработок и керна скважин 185, 289
интерпретационное канав 186

лотковое 126, 165, 185
многогоризонтное 202
Оптимизация решений 324
Ореол
мультипликативный 153
первичный 73
полиформационный 73
Ореол рассеяния
аккумулятивный 147, 148
вторичный 78, 145
выщелоченный 147, 148
газовый 131, 145
гидрохимический 127, 146
гипергенный 145
диффузионный 147, 148
закрытый 146, 147
механический 145
наложенный 146, 147
остаточный 146, 147, 158
открытый 146, 147, 165
оторванный 147, 148
погребенный 147, 148
предельно-разубоженный 147, 148
солевой 145, 147
Осмотр геологический 111, 121, 165
Отклонение
среднее квадратическое 301
стандартное 80, 83
Оценка
аномалии 72, 123, 168
априорная территории 45
доли забалансовых руд 192
мировых ресурсов 44
параметров фона 80, 89
прогнозных ресурсов 47, 69, 123
ресурсов по надрудным первичным ореолам 243
робастная параметров 84, 89
уровня эрозионного среза 183
Ошибки (погрешности) 140

Пакеты прикладных программ (ППП)
321
Палетка Дубова круговая 194
Палетки Дубова 176, 177
Парадокс крутых склонов 164
Параметры геохимические 82—85
Плотность
вероятности 85
пробоотбора 102
Площадь
аномалии 104
водосбора 114
Погрешность
анализа 298
— абсолютная 300
— допустимая 140
— мультипликативная 313
— относительная 300
— предельная 302
— систематическая 299, 300

- случайная 299, 300
- воспроизводимости 299
- съёмки 152
- Подвижность элементов гипергенная 159
- диффузионная 259
- Поиски геохимические бокситов 198
- в районах моренно-ледниковых отложений 138
- кимберлитов 195
- месторождений нефти и газа на акваториях 280
- нерудных полезных ископаемых 198
- по наложенным ореолам рассеяния 151
- рудных месторождений 3, 72, 73
- Показатель геохимической зональности 220
- контрастности 81, 169, 171
- миграционной способности 219
- монотонный 221
- мультипликативный 238, 246
- непараметрический 82
- нефтегазоносности 260—269
- параметрический 82
- погрешностей анализа 300
- случайно монотонный 222
- щелочно-кислотный (рН) 60, 269
- Поле геохимическое 7, 78
- Порог чувствительности 302
- Поток рассеяния 78
- Правильность анализа 298, 303
- Предел обнаружения 302
- Преобразователи полимерные 135
- Принцип подобия 188, 202
- суперпозиции 7
- эквивалентности 158, 175
- Проба бороздовая 185
- контрольная 121
- лотковая (шлиховая) 122
- пунктирная 122
- сборная штучная 122
- Пробоотбор детализационный 121
- повторно-контрольный 121, 294
- Прогноз оруденения на глубину 241
- Программа «Геонавт» 323
- «Геоскан — 200» 323
- «Модель — 31» 245
- мультипликации и сглаживания 171, 172
- «НЮ-3» 223
- «Перебор» 229
- «Поток» 119
- Продуктивность аномалии — линейная 157
- надфоновая 142, 157
- площадная 144, 150, 157, 187
- потока рассеяния 114
- истинная 114, 119
- кажущаяся 115
- удельная 142
- Процесс гидротермально-метасоматический 30
- магматический 30
- осаждения 31
- Размах значений 83, 184, 301
- Размеры аномалий 82, 101
- «Разноска» результатов анализа 139, 149, 165
- Районирование территорий ландшафтно-геохимическое 47
- по задачам геохимических поисков 91, 93
- Распределение логнормальное 87
- нормальное (НР) 84
- пространственно-упорядоченное (детерминированное) 83, 158
- случайное 89, 158
- Рассеяние элементов 15, 145
- Растения-концентраторы 134
- Реконструкция эродированной части месторождения 242
- Ресурсы прогнозные 32
- Робастность 89
- Рудоносность территории 47
- Россыпи 93
- Рудопроявление непромышленное 33
- Руды забалансовые 239
- Ряд зонального отложения 213, 214, 216
- цифр дискретный 307
- Сглаживание данных 171
- Сеть съёмочная 172
- Сигнал полезный 171
- слабый 169
- Система автоматизированная информационно-поисковая (АИПС) 321
- автоматизированная «Спектр» 308
- автоматизированной обработки геохимических данных (АСОГД) 320
- АСОД — ГПНГ 284
- АСОД — ГППИ 323
- АСОД — ПРОГНОЗ 323
- АСОИ — ГЕОЛОГИЯ 323
- управления базами данных (СУБД) 321
- Слой денудации ежегодный 56, 57
- Смещение ореолов 163, 184
- Совокупность генеральная 85
- Содержание бортовое 38, 239
- максимальное 82, 165

- среднее
 — арифметическое 89
 — геометрическое 87
 — скользящее 171
 — элементов в горных породах 19
 углеводородов фоновое 252
 Спектр геохимический 179
 — круговой (радиальный) 180
 — линейный 179, 184
 Спектрограф
 дифракционный (ДФС) 305
 призмный (ИСП) 305
 Среда
 восстановительная 52
 Срез эрозионный 98, 183, 190
 Стадии
 выветривания 61
 геологоразведочного процесса 3, 69
 геохимических поисков нефти и газа 276
 литохимических съемок 109
 разведки 69, 200
 Станция автоматическая «Прогноз» 282
 Сходимость анализа 298
 Съемка
 автомобильная 71, 276
 атмосферическая 96, 97, 131
 аэрогаммаспектральная 70
 аэрогеохимическая 69, 72, 107, 286
 биогеохимическая 96, 97, 133
 биогеохимическая 134
 виды и масштабы 95
 водногелиевая 296
 газовая 248
 — глубинная 259
 — дистанционная 273
 — наземная лазерная 275
 — тепловая 274
 газортутная 132
 гелиевая 133
 геохимическая
 наводная 72, 129
 подводная 72, 129
 гидрохимическая 96, 97, 126
 глубинная 69, 155
 зоометрическая 101
 капаметрическая 135
 литохимическая 109
 — по вторичным ореолам рассеяния 97, 109, 149
 — по наложенным ореолам 109, 151
 — по первичным ореолам 97, 109
 — по потокам рассеяния 97, 109, 110
 наземная 70, 72, 109, 286
 обзорная литохимическая 109, 137
 повторно-контрольная 121, 140
 подземная 71
 рудничная 96
 флуориметрическая 101
 шлиховая 124
- Таксирование рудных пересечений 225
 Теория происхождения нефти осадочно-миграционная 248
 Типы
 вторичных ореолов рассеяния 147
 геохимических барьеров 54
 поисково-оценочных задач 200
 почвенных профилей 64
 Точность анализа 137, 298
 Триады Страхова 214
- Углеводороды 253
 Углерод органический 251
 Уголь активированный 262, 310
 Управление качеством аналитических работ (УКАР) 303
 Уравнение
 остаточного ореола рассеяния 158
 потока рассеяния 114—119
 Уровень
 значимости 89
 рудной зоны 222
 Усиление слабых аномалий 169
 Установка газоаналитическая МАГМАСС-2 264
 Устройства считывающие 324
- Фаза главная**
 газообразования (ГФГ) 250
 нефтеобразования (ГФН) 250
 Фильтр частотный 172
 Фильтрация газов 259
 Фон геохимический 80, 83
 Формула Шурыгина 104, 157
 Формулировка поисковой задачи 98
 Формы
 нахождения элементов 24
 рудных тел 204
 Фотометр ртутно-абсорбционный 310
 Фракция 124, 135, 287
Функция
 мультипликативная 231
 осреднения весовая 172
 распределения 83—87
 рассеяния 158
 Стеклова 173
- Хроматограф газовый 262, 263, 311
Цель стратегическая 41
 «Центры тяжести» графиков 212, 222
- Частота** 85, 88
Число
 коррелирующихся точек 80, 81
 показателей зональности 221
 степеней свободы 181, 182
 Чувствительность анализа 15, 302
- Шаг съемки** 102
 Шельф 130, 252
 Шлих 124
 Шум (помеха) 81, 172

Экспресс-анализ 71, 149
Эксцесс 84
Электроды ионо-селективные 129, 318
Элементоприемник 154
Элементы
активные водные мигранты 50, 111, 161
индикаторы оруденения 74, 246
когерентные (совместимые) 17, 18
мешающие 305
минералофильные 24
минералофобные 24
радиоактивные 19, 46

редкие и рассеянные 16, 19, 46
рудные 19
спутники 76, 125
типоморфные 172
примеси в минералах 237
Элювий 61
Элювиоделувий 161, 287
Энергия рудообразования 30
Эпигенез 31
Эрозия 10, 57
Эффективность геохимических поисков 121
Эффузия газов 79, 146

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Общие сведения	
1.1. Геохимическое поле. <i>А. П. Соловов</i>	7
1.2. Кларки геосфер. <i>А. А. Ярошевский</i>	7
1.3. Закон Вернадского. <i>А. А. Ярошевский</i>	14
1.4. Геохимические классификации элементов. <i>А. А. Ярошевский</i>	15
1.5. Средние содержания элементов в горных породах. <i>А. А. Ярошевский</i>	19
1.6. Формы нахождения химических элементов в природе. <i>Е. М. Квятковский</i>	24
1.7. Соотношение между рассеянным и концентрированным состоянием химических элементов. <i>Е. М. Квятковский</i>	28
1.8. Факторы и условия концентрирования элементов. <i>А. А. Ярошевский</i> ..	30
1.9. Категории прогнозных ресурсов и промышленных запасов. <i>С. А. Милляев</i>	32
1.10. Классификация месторождений по крупности. <i>Е. М. Квятковский</i>	33
1.11. Геолого-промышленные типы месторождений. <i>С. А. Милляев</i>	35
1.12. Требования промышленности к полезным ископаемым. <i>А. П. Соловов</i>	38
1.13. Крупнейшие месторождения мира. <i>В. А. Бугров, А. А. Матвеев</i>	41
1.14. Учетные запасы, добыча и оценка мировых ресурсов полезных ископаемых. <i>В. А. Бугров</i>	44
1.15. Априорные оценки территорий. <i>А. П. Соловов</i>	45
1.16. Ландшафтно-геохимическое районирование. <i>А. И. Перельман</i>	47
1.17. Баланс влаги на земле. <i>А. П. Соловов</i>	50
1.18. Коэффициенты водной миграции. <i>А. И. Перельман</i>	50
1.19. Талассофильность химических элементов. <i>А. И. Перельман</i>	51
1.20. Геохимические барьеры. <i>А. И. Перельман</i>	52
1.21. Модуль стока главнейших рек СССР. <i>С. А. Милляев</i>	55
1.22. Ежегодный слой денудации. <i>С. А. Милляев</i>	57
1.23. Растворимость минералов. <i>А. И. Перельман, А. П. Соловов</i>	58
1.24. рН осаждения гидроксидов металлов. <i>А. И. Перельман</i>	60
1.25. Стадии выветривания. <i>А. И. Перельман</i>	61
1.26. Типы почвенных профилей. <i>А. И. Перельман</i>	64
1.27. Коэффициент биологического поглощения элементов. <i>А. И. Перельман</i>	66
1.28. Картографическая номенклатура. <i>А. П. Соловов</i>	67
Глава 2. Основы геохимических поисков	
2.1. Стадии геологоразведочного процесса. <i>С. А. Милляев</i>	69
2.2. Методы геохимических поисков полезных ископаемых. <i>А. П. Соловов</i>	70
2.3. Первичные ореолы месторождений. <i>С. В. Григорян</i>	73
2.4. Вторичные ореолы и потоки рассеяния месторождений полезных ископаемых. <i>А. П. Соловов</i>	78
2.5. Геохимический фон и явные аномалии. <i>А. П. Соловов</i>	80
2.6. Слабые аномалии и показатель контрастности. <i>А. А. Матвеев</i>	81
2.7. Геохимические параметры. <i>А. П. Соловов</i>	82
2.8. Непараметрические геохимические показатели. <i>А. П. Соловов</i>	82
2.9. Параметры распределения случайных величин. <i>Б. Я. Юфа</i>	83
2.10. Нормальное распределение. <i>Б. Я. Юфа</i>	84
2.11. Робастные методы оценки геохимических параметров. <i>Б. Я. Юфа</i>	89
2.12. Уровень значимости. <i>Б. Я. Юфа</i>	89
2.13. Доверительные интервалы оценок. <i>Б. Я. Юфа</i>	90

2.14. Геологическое районирование СССР по задачам геохимических поисков. <i>А. А. Матвеев</i>	91
2.15. Виды и масштабы геохимических съемок. <i>С. А. Миляев</i>	95
2.16. Формулировка поисковой задачи. <i>А. П. Соловов</i>	98
2.17. Взаимосвязанность аномалий в различных геосферах. <i>А. А. Матвеев</i> ...	99
2.18. Эффективные размеры аномалий. <i>А. П. Соловов</i>	101
2.19. Вероятность обнаружения объекта поисков. <i>А. П. Соловов</i>	102
2.20. Задача Бюффона. <i>А. П. Соловов</i>	103
2.21. Формула Шурыгина. <i>А. П. Соловов</i>	104
2.22. Полузакрытые территории. <i>А. П. Соловов</i>	104
2.23. Предельно допустимые концентрации химических элементов в окружающей среде. <i>А. П. Соловов</i>	106

Глава 3. Региональные геохимические съемки

3.1. Аэрогеохимические съемки. <i>С. А. Воробьев</i>	107
3.2. Наземные геохимические съемки. <i>А. П. Соловов</i>	109
3.3. Литохимические съемки. <i>А. П. Соловов</i>	109
3.4. Литохимические съемки по потокам рассеяния. <i>В. А. Бугров</i>	110
3.5. Уравнения идеального потока рассеяния. <i>А. П. Соловов</i>	114
3.6. Кажущаяся продуктивность потока рассеяния. <i>А. П. Соловов</i>	115
3.7. Уравнения реального потока рассеяния. <i>А. П. Соловов</i>	119
3.8. Программа «Поток». <i>Ю. В. Шваров</i>	119
3.9. Геологический осмотр аномалий на местности. <i>А. А. Матвеев</i>	121
3.10. Оценка прогнозных ресурсов категории R_3 . <i>В. А. Бугров</i>	123
3.11. Шлиховая съемка. <i>А. П. Соловов</i>	124
3.12. Гидрохимические съемки. <i>А. А. Матвеев</i>	126
3.13. Наводные и подводные геохимические съемки. <i>С. А. Воробьев</i>	129
3.14. Атмохимические съемки. <i>С. А. Воробьев</i>	131
3.15. Газоргутные съемки. <i>С. А. Воробьев</i>	132
3.16. Гелиевые съемки. <i>А. П. Соловов</i>	133
3.17. Биогеохимические съемки. <i>С. А. Миляев</i>	133
3.18. Прочие виды геохимических съемок. <i>А. П. Соловов</i>	135
3.19. Геохимические съемки в районах моренно-ледниковых отложений. <i>Е. М. Квятковский</i>	138
3.20. Повторно-контрольные съемки и допустимые погрешности. <i>С. А. Воробьев</i>	140
3.21. Мелкомасштабное обобщение. <i>А. П. Соловов</i>	141
3.22. Критерий «достаточно больших» площадей. <i>А. П. Соловов</i>	144

Глава 4. Поисковые и детальные геохимические съемки в рудных районах

4.1. Классификация геохимических ореолов рассеяния. <i>А. П. Соловов</i>	145
4.2. Главнейшие типы вторичных литохимических ореолов рассеяния. <i>А. А. Матвеев</i>	147
4.3. Поисковые литохимические съемки по вторичным остаточным ореолам рассеяния. <i>А. П. Соловов</i>	149
4.4. Геохимические поиски по наложенным ореолам рассеяния. <i>С. А. Воробьев</i>	151
4.5. Метод частичного извлечения металлов (ЧИМ). <i>С. А. Миляев</i>	154
4.6. Глубинные литохимические съемки. <i>В. А. Бугров</i>	155
4.7. Уравнение остаточного ореола рассеяния. <i>А. П. Соловов</i>	158
4.8. Коэффициент гипергенного рассеяния. <i>А. П. Соловов</i>	159
4.9. Коэффициент остаточной продуктивности. <i>А. П. Соловов</i>	161
4.10. Смещение ореолов рассеяния. <i>А. П. Соловов</i>	163
4.11. Парадокс крутых склонов. <i>А. П. Соловов</i>	164
4.12. Геологический осмотр и детализация остаточных ореолов рассеяния. <i>А. П. Соловов</i>	165
4.13. Оценка геохимических аномалий в закрытых рудных районах. <i>С. А. Воробьев</i>	168
4.14. Усиление слабых аномалий. <i>С. А. Воробьев</i>	169
	333

4.15. Программы для мультипликации и сглаживания геохимических данных на ЭВМ. <i>В. А. Николаев</i>	172
4.16. Детальные литохимические съемки. <i>А. П. Соловьев</i>	173
4.17. Принцип эквивалентности. <i>Е. М. Квятковский</i>	175
4.18. Палетки Дубова. <i>Е. М. Квятковский</i>	177
4.19. Номограмма ЛГИ. <i>Е. М. Квятковский</i>	177
4.20. Геохимические спектры объектов. <i>А. А. Матвеев</i>	179
4.21. Корреляционные зависимости между содержаниями элементов. <i>С. А. Воробьев</i>	181
4.22. Оценка уровня эрозионного среза. <i>А. А. Матвеев</i>	183
4.23. Задание первых канав и скважин. <i>В. А. Бугров</i>	184
4.24. Опробование горных выработок и кернa скважин. <i>В. А. Бугров</i>	185
4.25. Интерпретационное опробование канав. <i>С. А. Милев</i>	186
4.26. Подсчет прогнозных ресурсов категорий P_2 и P_1 по параметрам остаточных ореолов рассеяния. <i>А. П. Соловьев</i>	187
4.27. Оценка доли забалансовых руд. <i>А. П. Соловьев</i>	192
4.28. Решение прямых задач при литохимических поисках. <i>А. П. Соловьев</i>	192
4.29. Линейка и круговая палетка Дубова. <i>С. А. Милев</i>	194
4.30. Геохимические поиски кимберлитов. <i>С. А. Воробьев</i>	195
4.31. Геохимические поиски бокситов и нерудных полезных ископаемых. <i>С. А. Воробьев</i>	198

Глава 5. Геохимические исследования на стадиях разведки рудных месторождений

5.1. Типы поисково-оценочных геохимических задач. <i>А. П. Соловьев</i>	200
5.2. Принцип подобия. <i>А. П. Соловьев</i>	202
5.3. Формы рудных тел и запасы руд. <i>А. П. Соловьев</i>	204
5.4. Геохимическая модель рудного месторождения. <i>А. П. Соловьев</i>	206
5.5. Модель гидротермального месторождения. <i>Е. М. Квятковский</i>	206
5.6. Модель вулканогенно-осадочного месторождения. <i>Е. М. Квятковский</i>	209
5.7. Модель магматогенного месторождения. <i>Е. М. Квятковский</i>	210
5.8. Модель осадочного месторождения. <i>Е. М. Квятковский</i>	210
5.9. Методы выявления зональности оруденения. <i>Е. М. Квятковский</i>	212
5.10. Ряды зонального отложения элементов. <i>С. В. Григорян, А. П. Соловьев</i>	214
5.11. Показатели зональности. <i>С. В. Григорян</i>	220
5.12. Программа «Ню-2». <i>В. А. Николаев</i>	221
5.13. Программа «Ню-3». <i>Ю. В. Шваров</i>	223
5.14. Условная метрика оруденения. <i>А. П. Соловьев</i>	224
5.15. Таксирование рудных пересечений. <i>А. А. Матвеев</i>	225
5.16. Двухмерные диаграммы. <i>А. А. Матвеев</i>	226
5.17. Трехмерные диаграммы. <i>А. А. Матвеев</i>	227
5.18. Программа «Перебор». <i>Ю. В. Шваров</i>	229
5.19. Многомерная классификация. <i>В. А. Николаев</i>	230
5.20. Зональность рудных полей. <i>А. А. Матвеев</i>	232
5.21. Зональность рудных районов. <i>А. А. Матвеев</i>	233
5.22. Обратная зональность. <i>С. В. Григорян</i>	236
5.23. Элементы-примеси в минералах. <i>С. В. Григорян</i>	237
5.24. «Истинные» запасы металла в месторождении. <i>А. П. Соловьев</i>	239
5.25. Прогноз оруденения на глубину. <i>А. П. Соловьев</i>	241
5.26. Реконструкция эродированной части месторождения. <i>А. П. Соловьев</i>	242
5.27. Оценка ресурсов по надрудному первичному ореолу. <i>А. П. Соловьев</i>	243
5.28. Метод Барсукова. <i>С. В. Григорян</i>	243
5.29. Метод Бураго — Шварова. <i>Ю. В. Шваров</i>	244
5.30. Зоны рассеянной минерализации (ЗРМ). <i>С. В. Григорян</i>	245

Глава 6. Геохимические поиски месторождений нефти и газа (А. Я. Архипов)

6.1. Осадочно-миграционная теория происхождения нефти и газа	248
6.2. Содержание органического вещества в горных породах	250
6.3. Фоновые содержания углеводородов	252

6.4. Состав нефтей и горючих газов	253
6.5. Условия локализации залежей	255
6.6. Атмохимические аномалии над газонефтяными залежами	258
6.7. Методы анализа газовых проб	262
6.8. Газовый каротаж	265
6.9. Битуминологические исследования	266
6.10. Гидрохимические показатели нефтегазоносности	268
6.11. Литохимические аномалии над газонефтяными залежами	269
6.12. Дистанционные методы ГПНГ	272
6.13. Стадийность проведения ГПНГ	276
6.14. Геохимические поисковые исследования на акваториях	280
6.15. Обработка данных ГПНГ на ЭВМ	283
6.16. Классификация месторождений по запасам. Мировые запасы и добыча	284

Глава 7. Производство полевых, лабораторных и камеральных работ при геохимических поисках

7.1. Топографическая основа геохимических съемок. <i>А. П. Соловов</i>	286
7.2. Отбор проб при литохимических поисках. <i>В. А. Бугров</i>	286
7.3. Обработка и анализ литохимических проб. <i>А. П. Соловов</i>	291
7.4. Пробоотбор при гидрохимических поисках. <i>С. А. Миляев</i>	291
7.5. Методы концентрирования микроэлементного состава воды. <i>С. А. Миляев</i>	292
7.6. Пробоотбор при биогеохимических поисках. <i>С. А. Миляев</i>	293
7.7. Пробоотбор при атмохимических поисках. <i>С. А. Воробьев</i>	294
7.8. Режимные наблюдения. <i>С. А. Воробьев</i>	296
7.9. Анализ вещества. <i>Б. Я. Юфа</i>	297
7.10. Качество анализов. <i>Б. Я. Юфа</i>	298
7.11. Результаты анализа. <i>Б. Я. Юфа</i>	299
7.12. Погрешности анализа. <i>Б. Я. Юфа</i>	300
7.13. Правила округления результатов анализа. <i>Б. Я. Юфа</i>	302
7.14. Предел обнаружения. <i>Б. Я. Юфа</i>	302
7.15. Метрологическое завышение. <i>Б. Я. Юфа</i>	303
7.16. Управление качеством аналитических работ. <i>Б. Я. Юфа</i>	303
7.17. Стандартные образцы. <i>Б. Я. Юфа</i>	303
7.18. Эмиссионный спектральный анализ. <i>Д. М. Гершман</i>	304
7.19. Атомно-абсорбционный анализ. <i>Д. М. Гершман</i>	308
7.20. Химико-адсорбционный анализ на золото. <i>Д. М. Гершман</i>	309
7.21. Ртутно-абсорбционные фотометры. <i>С. А. Воробьев, Д. М. Гершман</i>	310
7.22. Хроматографический анализ. <i>С. А. Воробьев</i>	311
7.23. Масс-спектрометрический анализ. <i>С. А. Воробьев</i>	312
7.24. Рентгеноспектральный анализ. <i>Б. Я. Юфа</i>	312
7.25. Рентгенорадиометрический анализ. <i>Б. Я. Юфа</i>	313
7.26. Фотонейтронный анализ на бериллий. <i>А. А. Матвеев</i>	314
7.27. Нейтронно-активационный анализ. <i>Б. Я. Юфа</i>	316
7.28. Ионно-селективные электроды. <i>А. П. Соловов</i>	318
7.29. Лазерный локальный анализ. <i>Д. М. Гершман</i>	318
7.30. Электронно-зондовый микроанализ. <i>Д. М. Гершман</i>	319
7.31. Обработка данных на микрокалькуляторах. <i>С. А. Воробьев</i>	319
7.32. Автоматизированные системы обработки геохимических данных. <i>В. А. Николаев</i>	319
7.33. Графопостроители. <i>С. А. Воробьев</i>	322
7.34. Считывающие устройства. <i>С. А. Воробьев</i>	322
7.35. Оптимизация решений. <i>Ю. В. Шваров</i>	323
7.36. Деловые игры. <i>В. А. Николаев</i>	323
Список литературы	324
Предметный указатель	326

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Соловов Александр Петрович,
Архипов Александр Яковлевич,
Бугров Виктор Алексеевич и др.**

**СПРАВОЧНИК ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ
ПОИСКАМ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Заведующий редакцией *В. А. Крыжановский*
Редактор издательства *Ю. А. Рожнов*
Технический редактор *Л. Я. Голова*
Корректор *Г. П. Вергун*

ИБ № 7769

Сдано в набор 13.02.90. Подписано в печать 16.08.90. Формат 60х90 1/16. Бумага офсетная № 1. Гарнитура Литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,0. Усл. кр.-отт. 21,0. Уч.-изд. л. 25,53. Тираж 4520 экз. Заказ 1077/2004 — 2. Цена 1 р. 80 к.

Ордена „Знак Почета“ издательство „Недра“,
125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3

Набрано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО „Первая Образцовая типография“ Государственного комитета СССР по печати, 113054, Москва, Валовая, 28

Отпечатано в Московской типографии № 6 Госкомпечати СССР,
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24

18918